

## Estudio de sequías meteorológicas anuales por medio del índice de aridez, en el estado de Zacatecas, México

### *Annual Meteorological Droughts Study by Means of the Aridity Index, in the Zacatecas State of Mexico*

Campos-Aranda Daniel Francisco

*Profesor Jubilado de la UASLP*

*Correo: campos\_aranda@hotmail.com*

Información del artículo: recibido: septiembre de 2015, aceptado: mayo de 2016

#### Resumen

Las *sequías meteorológicas* son una aberración temporal de la ocurrencia normal de la precipitación. Sus características, como: duración, severidad, frecuencia y área afectada, están gobernadas por los parámetros climáticos de la región, que son consecuencia de la dinámica atmosférica global y por ello, su estudio se ha abordado con base en el *índice de aridez* ( $IA = P/ETP$ ), definido como el cociente entre la precipitación ( $P$ ) y la evapotranspiración potencial ( $ETP$ ), ambas anuales. En este trabajo se analizan estadísticamente las 16 series cronológicas del  $IA$ , calculadas en el periodo común de 65 años de 1950 a 2014, en el estado de Zacatecas, México; para definir de manera puntual la ocurrencia de las sequías leves, moderadas, severas y extremas. Además, tales registros se integran en tres zonas geográficas y entonces, se analiza la ocurrencia de las sequías severas y extremas por regiones y en dos periodos del lapso común. Se detectan años con mayor número de estaciones climatológicas afectadas y se formulan las conclusiones sobre los años y secuencias de estos, con sequías críticas y libres de tales eventos.

#### Descriptor:

- sequías meteorológicas anuales
- índice de aridez anual
- precipitación anual
- evapotranspiración potencial anual
- pruebas estadísticas
- promedios móviles

## Abstract

Meteorological droughts are a temporary aberration of the normal occurrence of precipitation. Their characteristics, such as duration, severity, frequency and affected area, are governed by climatic parameters of the region, which are a consequence of the global atmospheric dynamics and therefore their study has been addressed based on the aridity index ( $AI = P/PET$ ), defined as the ratio of precipitation ( $P$ ) to potential evapotranspiration ( $PET$ ), both annual. This paper statistically analyzes the 16 time series of the IA, in the state of Zacatecas, Mexico, calculated on the common 65-year period from 1950 to 2014; in order to punctually define the occurrence of light, moderate, severe and extreme droughts. Moreover, such records are integrated into three geographic zones and then, the occurrence of the severe and extreme droughts is analyzed by regions and in the two periods of the common lapse. Years with the most affected number of climatological stations are identified and conclusions on the years and their sequences, with critical droughts and free of such events are formulated.

### Keywords:

- annual meteorological droughts
- annual aridity index
- annual precipitation
- annual potential evapotranspiration
- statistical tests
- moving averages

## Introducción

### Generalidades

Las sequías son quizás la amenaza natural más compleja. Las sequías son reconocidas como un desastre ambiental que interesa a los meteorólogos, hidrólogos, ecólogos y agrónomos. Ocurren prácticamente en todas las zonas climáticas, las sequías también se estudian por ingenieros civiles, economistas y sociólogos. Una sequía es un periodo prolongado del déficit de agua, que ocurre en una zona que no recibe la precipitación normal durante varios meses o algunos años. *La sequía es una aberración temporal*. En contraste, la *aridez* es una característica permanente del clima y está restringida a regiones de baja precipitación. Con frecuencia existe confusión, entre *onda de calor* y sequía, pero el lapso de ocurrencia típico de la primera es de una semana y la segunda persiste por meses o incluso años. La ocurrencia simultánea de ambos fenómenos meteorológicos tiene consecuencias socioeconómicas desastrosas (Morid *et al.*, 2006; Mishra y Singh, 2010).

Según Byun y Wilhite (1999), debido a su complejidad, las sequías se han estudiado con cuatro enfoques; el primero busca mejorar el entendimiento de la circulación atmosférica asociado a su ocurrencia. El segundo intenta evaluar la severidad, frecuencia y extensión de las sequías de diversas duraciones. El tercero se encarga de describir y cuantificar los impactos de las sequías, centrándose en las pérdidas y sus costos. Por último, el cuarto enfoque busca estrategias de preparación y medidas de mitigación de los daños de las sequías.

Los estudios del segundo enfoque, pretenden definir el inicio y final de las sequías, así como su intensidad; se llevan a cabo con base en diversos *índices de sequía*, los cuales por lo general utilizan datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración y el balance de humedad en el suelo. Comenzaron a mediados de los años sesenta (Palmer, 1965) y han evolucionado hasta el presente, ahora intentando *pronosticar* las sequías (Mishra y Singh, 2011).

Los estudios orientados a caracterizar las sequías de una localidad (Dogan *et al.*, 2012; Campos, 2015a), comúnmente se basan en detectar las anomalías de la precipitación en diversas duraciones y con diversos índices. Por otra parte, los estudios de carácter regional (Tsakiris *et al.*, 2007; Elagib, 2009), se han abordado utilizando índices que emplean tanto el abastecimiento atmosférico (precipitación  $P$ ), como la demanda atmosférica (evapotranspiración potencial  $ETP$ ), por ejemplo a través del *índice de aridez (IA)*, definido como el cociente de ambas estimaciones ( $IA = P/ETP$ ).

### Justificación del estudio

El *objetivo* de este trabajo consiste en analizar regionalmente el comportamiento de las sequías anuales en el estado de Zacatecas, México. Lo anterior, a través del índice de aridez, calculado utilizando los registros de 16 estaciones climatológicas de amplio periodo, para el lapso común de 65 años, de 1950 a 2014. De acuerdo con la ubicación en el estado, de los 16 registros, se establecen tres zonas de estudio (norte, centro y sur) y se procesan estadísticamente en ellas los índices de aridez anual, para caracterizar regionalmente los años con sequías severas y extremas.

## Métodos y materiales

### Regiones climáticas e índice de aridez

De manera general, la inconsistencia o irregularidad de las variables que caracterizan los procesos del ciclo hidrológico, es la responsable de la ocurrencia de los eventos extremos y por ello, regiones con alta variabilidad en la lluvia y su escurrimiento, son más propensas a las sequías y las crecientes (Pandey *et al.*, 2008). De acuerdo con Ponce *et al.* (2000), las regiones centrales del espectro climático, es decir, los climas árido, semiárido y subhúmedo ( $0.0833 < IA < 1.3333$ ), son las más susceptibles a desarrollar sequías severas y extremas. También se acepta que el *cambio climático* puede acrecentar el déficit hídrico, generado por la demanda en aumento debido al desarrollo económico.

En resumen, las características de las sequías están gobernadas por los parámetros climáticos regionales, entre ellos la precipitación y la evapotranspiración, los cuales son relativamente fáciles de estimar. La precipitación de una localidad depende de la latitud, época del año, factores geográficos, proximidad a los océanos, circulación atmosférica de mesoescala, presión atmosférica y condiciones de la superficie terrestre. En cambio, la evapotranspiración depende de la radiación solar neta, del déficit de presión de vapor, de la rugosidad de la superficie y de su índice de área foliar (Ponce *et al.*, 2000; Pandey y Ramasastri, 2002; Pandey *et al.*, 2008).

Tomando en cuenta lo anterior, el United Nations Environment Programme propuso originalmente (UNEP, 1992) el Cociente de Sequedad (dryness ratio) anual para caracterizar las zonas desérticas, cuando tal relación  $P/ETP$  es menor de 0.200. Recientemente, tal cociente se denomina *Índice de Aridez* (aridity index)  $IA$  y define los climas áridos con  $0.050 < IA < 0.200$  y los hiperáridos con  $IA < 0.050$  (UNEP, 2006).

### Registros de precipitación anual

Al analizar las amplitudes de los 30 registros de lluvia anual procesados por Campos (2015b) en el estado de Zacatecas, México, se observa que 16 de ellos tienen registros mayores de 63 datos hasta el año de 2012. Esas series se seleccionaron. En esa referencia se detalla cómo se integraron los registros y cómo se dedujeron sus valores faltantes. A través de la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua, se obtuvieron los datos correspondientes a los años 2013 y 2014, tanto de precipitación anual como de temperatura media anual. Los 16 registros de las estaciones climatológicas que serán procesados, definen un *periodo común máximo de 65 años* en el

lapso de 1950 a 2014. En la tabla 1 se citan los datos generales y sus respectivos valores promedio anual de precipitación ( $PMA$ ); en esta tabulación las estaciones se exponen por zonas y en orden progresivo de  $PMA$ . En la figura 1 se muestra su ubicación dentro del estado de Zacatecas, el cual se localiza en el centro de México.

### Registros de temperatura media anual

De igual forma a como se integraron los registros de lluvia anual en el estudio de Campos (2015b), se obtuvieron ahora los 16 de temperatura media de cada año. Como algunos de estos registros comenzaron varios años después de los pluviométricos, para tales valores faltantes se empleó su promedio anual. Tal fue el caso, en las estaciones Cañitas de Felipe Pescador, Río Grande, Villa de Cos y Villanueva. En la tabla 1 se dan los valores promedio anual de temperatura media ( $TMA$ ).

### Estimación de evapotranspiración potencial anual

Para la estimación de la  $ETP$  anual se empleó la fórmula empírica de Hargreaves y Samani (1982), la cual permite la estimación de la  $ETP$  media diaria en milímetros, con base únicamente en la temperatura media ( $Tt$ ) expresada en grados Fahrenheit y de la radiación solar incidente media diaria expresada en milímetros de lámina de agua evaporada ( $Ri'$ ), tal ecuación es:

$$ETP = 0.0075 \cdot Ri' \cdot Tt \quad (1)$$

La radiación solar incidente ( $Ri$ ) se aproximó al promedio de los 12 valores mensuales, citados por Campos (2015b), obtenidos para la ciudad de Zacatecas en los mapas de Almanza y López (1975); se adoptó un valor de  $495 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ . Para transformar a lámina de agua evaporada se emplea:

$$Ri' = 10 \cdot Ri / Hv \quad (2)$$

en donde,  $Hv$  es el llamado calor latente de evaporación o energía necesaria para evaporar 1 g o un  $\text{cm}^3$  de agua, se estima con la ecuación siguiente, estando la temperatura media ( $Tt$ ) en  $^{\circ}\text{C}$ :

$$Hv = 595.9 - 0.55 \cdot Tt \quad (3)$$

Utilizando en las ecuaciones 1 y 3 la temperatura media anual y el valor de  $Ri = 495 \text{ lg/d}$  se obtiene la  $ETP$  media diaria, que al multiplicarse por 365 conduce al valor buscado de la  $ETP$  anual. También en la tabla 1 se muestran los valores promedio anual en los 16 registros procesados.

Tabla 1. Datos generales de las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México

Núm.	Estación (Núm. en el AC)	Latitud N	Long. WG	Altitud (msnm)	Zona	PMA (mm)	TMA (°C)	ETP (mm)	IA
1	Cañitas de Felipe P. (9)	23° 36'	102° 44'	2025	Norte	371.3	16.0	1404.3	0.265
2	Río Grande (73)	23° 48'	103° 02'	1890	Norte	384.7	16.9	1442.7	0.267
3	Fresnillo (30)	23° 11'	102° 53'	2195	Norte	415.9	16.9	1442.4	0.289
4	Leobardo Reynoso (25)	23° 11'	103° 12'	2090	Norte	418.3	16.1	1406.9	0.298
5	Villa de Cos (98)	23° 17'	102° 21'	2050	Norte	426.4	17.5	1468.2	0.291
6	Santa Rosa (69)	22° 56'	103° 07'	2240	Norte	459.3	14.8	1349.8	0.341
7	San Pedro Piedra G. (83)	22° 27'	102° 21'	2032	Centro	411.5	16.8	1439.7	0.286
8	Villa García (99)	22° 10'	101° 57'	2102	Centro	443.3	16.3	1417.6	0.313
9	Pinos (65)	22° 17'	101° 35'	2408	Centro	448.3	16.3	1415.9	0.318
10	Zacatecas (103)	22° 46'	102° 35'	2485	Centro	463.2	15.7	1390.6	0.334
11	Villanueva (102)	22° 22'	102° 53'	1920	Centro	470.9	16.9	1441.3	0.327
12	Presa El Chique (68)	22° 00'	102° 53'	1620	Sur	543.6	20.9	1615.0	0.337
13	Juchipila (42)	21° 23'	103° 07'	1270	Sur	691.7	21.7	1649.7	0.419
14	Nochistlán (58)	21° 22'	102° 51'	1850	Sur	700.2	18.6	1515.4	0.462
15	Tlaltenango (94)	21° 47'	103° 18'	1700	Sur	701.5	18.0	1491.4	0.471
16	Excamé (27)	21° 39'	103° 20'	1740	Sur	736.5	18.5	1512.0	0.488

Simbología: AC archivo de CONAGUA

msnm: metros sobre el nivel del mar

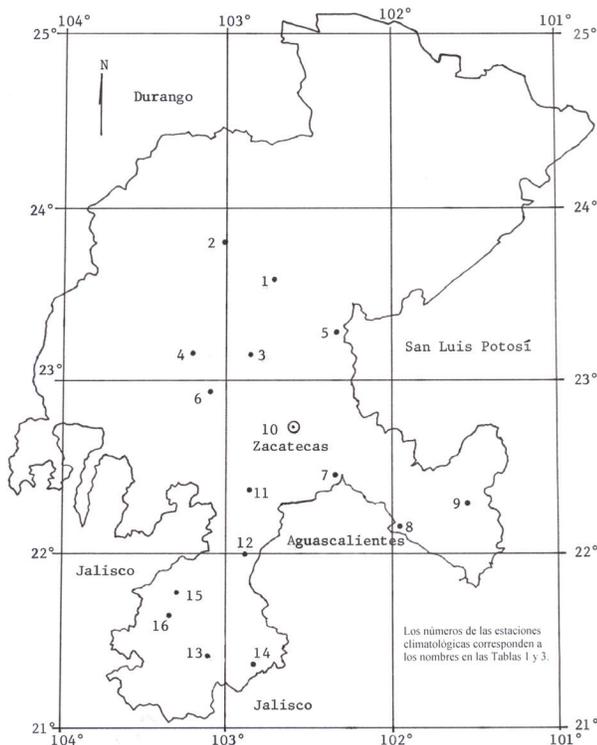


Figura 1. Ubicación de las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México

### Cálculo de las series de índices de aridez

Al dividir los valores de la precipitación anual entre los de la ETP anual calculados en cada uno de los 16 registros procesados, se definen las 16 series de 65 datos de índices de aridez (IA), cuyos valores promedio anual se

tienen en la tabla 1. En cambio, en la tabla 2 se exponen los datos y resultados anuales, en los tres registros seleccionados como representativos de cada zona geográfica analizada. En la figura 2 se muestran dos de tales registros de IA, como series cronológicas.

### Determinación del tipo de sequía

Cada serie de IA anuales se ordena de menor a mayor. En seguida se obtiene su mediana y se considera que todos los IA menores que ella son sequías; con esta mitad del registro, se forman cuatro grupos buscando que tengan igual número de elementos (*ns*). Los *ns* valores más bajos definen los años con sequía extrema (SE), los siguientes *ns* elementos establecen los años con sequía severa (SS), después habrá *ns* valores de IA relativos a los años con sequía moderada (SM) y por último, *ns* magnitudes de IA que terminan antes de la mediana y que son años con sequía leve o ligera (SL). En las columnas 7, 12 y 17 de la tabla 2 se tienen las designaciones del tipo de sequía (TS), obtenidas con el procedimiento anterior usando *ns* = 8, en los tres registros representativos de las zonas analizadas del estado de Zacatecas, México. Cuando se conozcan los porcentajes de cada tipo de sequía que ocurren en la localidad o región estudiada, se aplicarán a la mitad del registro y entonces el *ns* será variable.

### Análisis estadísticos y regionales

#### Verificación de la homogeneidad

Con base en cada serie cronológica de IA anual se realizó un análisis de calidad estadística, buscando compo-

Tabla 2. Datos y cálculos anuales de sequías con base en el IA, en las tres estaciones climatológicas indicadas del estado de Zacatecas, México

Núm.	Año	Leobardo Reyoso (El Sauz)			Pinos			Tlaltenango			IA	TS	
		PA	TM	ETP	PA	TM	ETP	PA	TM	ETP			
1	1950	397.3	16.7	1433.3	0.277	410.3	1429.0	0.287	310.9	1497.8	18.2	SL	SE
2	1951	431.6	16.7	1433.3	0.301	659.1	1472.0	0.448	448	1532.2	19.0	SM	SS
3	1952	305.9	16.7	1433.3	0.213	347.9	1429.0	0.243	598.5	1497.8	18.2	SM	SS
4	1953	453.2	15.7	1390.4	0.326	376.1	1390.4	0.270	761.8	1484.9	17.9	SM	SM
5	1954	292.4	16.5	1424.7	0.205	224.5	1416.2	0.159	637.2	1506.4	18.4	SE	SM
6	1955	467.6	16.0	1403.3	0.333	616.9	1411.9	0.437	642.0	1506.4	18.4	SE	SM
7	1956	281.2	15.8	1394.7	0.207	516.3	1373.3	0.376	636.3	1437.6	16.8	SE	SL
8	1957	278.3	16.2	1411.9	0.192	473.9	1394.7	0.340	539.0	1489.2	18.0	SE	SE
9	1958	807.3	15.5	1381.9	0.584	667.9	1360.5	0.491	920.8	1489.2	18.0	SE	SE
10	1959	595.5	15.7	1390.4	0.428	739.1	1369.0	0.540	1044.7	1497.8	18.2	SE	SE
11	1960	306.9	16.2	1411.9	0.217	333.5	1386.2	0.241	567.9	1480.6	17.8	SS	SS
12	1961	412.8	16.2	1411.9	0.292	468.8	1407.6	0.296	468.8	1480.6	17.8	SL	SE
13	1962	310.4	16.6	1429.0	0.217	223.0	1450.5	0.154	778.4	1648.9	21.7	SE	SE
14	1963	434.2	16.8	1437.6	0.302	487.5	1433.3	0.340	777.0	1618.6	21.0	SS	SS
15	1964	470.3	16.3	1416.2	0.332	316.0	1433.3	0.220	567.2	1532.2	19.0	SS	SS
16	1965	435.3	15.9	1399.0	0.311	431.8	1437.6	0.300	640.1	1545.2	19.3	SS	SS
17	1966	478.8	15.9	1399.0	0.342	554.2	1411.9	0.393	640.1	1497.8	18.2	SE	SE
18	1967	455.2	16.0	1403.3	0.324	710.0	1424.7	0.498	1053.1	1476.3	17.7	SE	SE
19	1968	463.0	15.3	1373.3	0.337	260.5	1437.6	0.181	470.0	1480.6	17.8	SE	SS
20	1969	241.9	16.5	1434.7	0.170	170.5	1433.3	0.119	601.0	1454.8	17.2	SE	SS
21	1970	524.7	15.7	1390.4	0.377	328.0	1407.6	0.237	757.2	1493.5	18.1	SS	SS
22	1971	508.1	16.1	1407.6	0.361	433.0	1437.6	0.298	700.3	1506.4	18.4	SS	SS
23	1972	344.4	16.5	1424.7	0.242	297.5	1416.2	0.210	593.5	1549.5	18.5	SL	SL
24	1973	762.9	15.4	1377.6	0.554	478.6	1424.7	0.336	668.9	1510.7	18.4	SL	SL
25	1974	286.9	16.0	1403.3	0.204	444.0	1369.0	0.324	624.2	1493.5	18.1	SM	SM
26	1975	412.0	15.4	1377.6	0.299	506.3	1377.6	0.368	652.6	1506.4	18.4	SM	SM
27	1976	565.9	15.0	1360.5	0.416	746.5	1322.0	0.568	652.6	1476.3	17.7	SM	SM
28	1977	314.0	15.7	1390.4	0.226	227.5	1437.6	0.155	652.6	1489.2	18.0	SE	SE
29	1978	285.3	16.2	1411.9	0.202	339.5	1420.5	0.239	678.4	1493.5	18.1	SM	SM
30	1979	294.4	15.9	1399.0	0.210	350.5	1424.7	0.246	664.9	1506.4	18.4	SM	SM
31	1980	418.4	16.5	1424.7	0.294	417.0	1433.3	0.317	624.2	1489.2	18.0	SM	SM
32	1981	429.6	16.5	1424.7	0.302	391.5	1441.9	0.272	1095.1	1527.9	18.9	SM	SM
33	1982	286.2	16.8	1437.6	0.199	310.5	1437.6	0.216	643.5	1519.3	18.7	SM	SM
34	1983	394.6	15.8	1394.7	0.283	431.5	1459.1	0.296	746.6	1476.3	17.7	SM	SM
35	1984	565.1	16.6	1429.0	0.395	518.8	1403.3	0.370	865.1	1394.7	15.8	SM	SM
36	1985	498.7	16.7	1433.3	0.348	398.2	1454.8	0.274	776.0	1480.6	17.8	SM	SM
37	1986	481.1	16.3	1416.2	0.340	498.2	1437.6	0.285	661.2	1480.6	17.8	SM	SM
38	1987	565.5	16.1	1407.6	0.402	199.5	1497.8	0.133	798.4	1437.6	16.8	SM	SM
39	1988	502.5	16.1	1407.6	0.357	587.1	1416.2	0.415	693.3	1266.6	12.8	SM	SM
40	1989	371.6	16.7	1433.3	0.259	558.1	1433.3	0.250	567.9	1351.9	14.8	SM	SM
41	1990	507.3	17.0	1446.2	0.351	773.4	1381.9	0.405	1065.8	1463.4	17.4	SM	SM
42	1991	494.5	16.3	1416.2	0.349	773.4	1416.2	0.546	1065.8	1523.6	18.8	SM	SM
43	1992	413.7	15.8	1394.7	0.297	686.7	1416.2	0.485	851.3	1484.9	17.9	SM	SM
44	1993	347.2	16.6	1429.0	0.230	482.8	1351.9	0.357	706.0	1484.9	17.9	SM	SM
45	1994	333.1	17.0	1446.2	0.267	461.7	1390.4	0.332	655.2	1497.8	18.2	SM	SM
46	1995	380.3	16.5	1424.7	0.224	569.9	1394.7	0.299	871.3	1459.1	17.3	SM	SM
47	1996	446.4	15.9	1399.0	0.319	408.4	1364.8	0.308	715.7	1540.9	19.2	SM	SM
48	1997	310.0	15.5	1381.9	0.224	488.1	1343.4	0.363	858.5	1463.4	17.4	SM	SM
49	1998	299.4	16.6	1429.0	0.179	427.0	1386.2	0.308	470.2	1506.4	18.4	SM	SM
50	1999	250.2	15.8	1394.7	0.179	265.0	1377.6	0.192	575.3	1523.6	18.8	SM	SM
51	2000	306.4	16.0	1403.3	0.218	178.5	1394.7	0.128	544.4	1506.4	18.8	SM	SM
52	2001	285.8	15.6	1386.2	0.206	303.0	1327.9	0.200	680.2	1502.1	18.3	SM	SM
53	2002	527.7	16.2	1411.9	0.381	526.6	1540.9	0.342	653.1	1515.0	18.6	SM	SM
54	2003	475.3	16.0	1403.3	0.339	552.6	1510.7	0.233	779.9	1536.6	19.1	SM	SM
55	2004	540.9	15.5	1381.9	0.391	526.6	1533.8	0.323	758.3	1480.6	17.8	SM	SM
56	2005	380.0	16.3	1416.2	0.268	201.2	1416.2	0.192	611.5	1502.1	17.8	SM	SM
57	2006	442.7	15.9	1399.0	0.316	542.7	1407.6	0.386	723.7	1480.6	18.3	SM	SM
58	2007	399.2	15.6	1386.2	0.288	769.0	1390.4	0.553	634.6	1411.9	16.2	SM	SM
59	2008	643.3	15.3	1373.3	0.468	407.0	1407.6	0.275	934.4	1467.7	17.5	SM	SM
60	2009	386.5	16.0	1403.3	0.254	384.8	1407.6	0.295	684.6	1489.2	18.0	SM	SM
61	2010	346.9	15.1	1364.8	0.215	568.6	1381.9	0.411	644.0	1450.5	17.1	SM	SM
62	2011	183.5	16.2	1411.9	0.130	288.4	1424.7	0.202	406.1	1506.4	18.4	SM	SM
63	2012	301.2	16.0	1403.3	0.215	594.4	1377.6	0.431	543.3	1502.1	18.3	SM	SM
64	2013	640.2	15.9	1399.0	0.458	622.0	1369.0	0.454	805.8	1497.8	18.2	SM	SM
65	2014	409.0	15.6	1386.2	0.295	557.3	1369.0	0.407	774.6	1519.3	18.7	SM	SM
PROM	-	418.3	16.1	1406.9	0.298	448.3	1415.9	0.318	701.5	1491.4	18.0	SM	SM

Simbología:

PA precipitación anual, en milímetros

TM temperatura media del año, en °C

ETP evapotranspiración potencial anual, en milímetros

IA

TS

Índice de aridez, adimensional

tipo de sequía: SL (leve), SM (moderada), SS (severa) y SE (extrema)

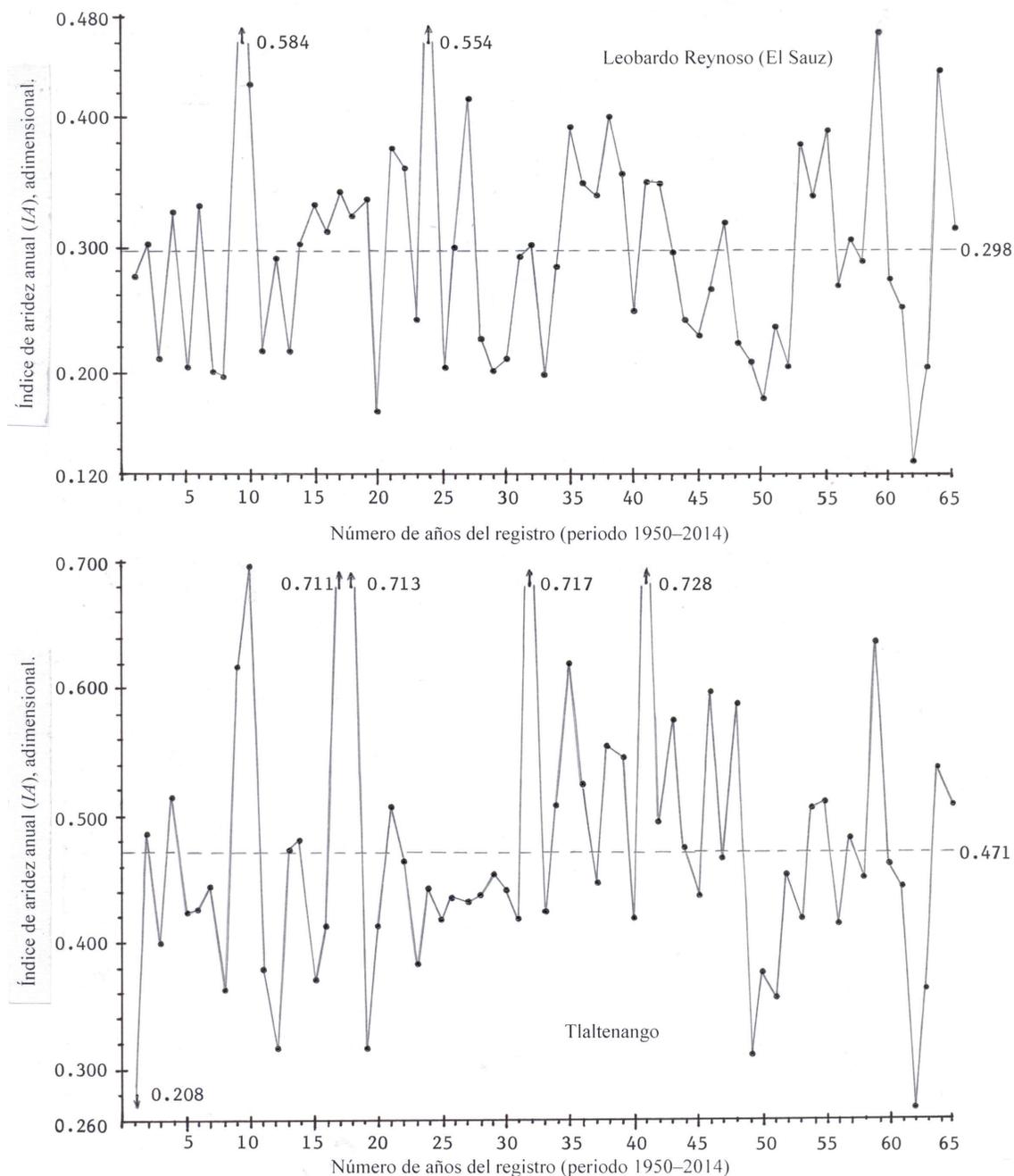


Figura 2. Series cronológicas del índice de aridez en las estaciones climatológicas Leobardo Reynoso (El Sauz) y Tlaltenango, del estado de Zacatecas, México

nentes determinísticas con dos pruebas generales (test de Helmer y Secuencias) y seis específicas: de persistencia (Anderson y Sneyers), de tendencia (Kendall y Spearman), de variabilidad (Bartlett) y de cambio en la media (Cramer). La mayoría de estas pruebas se pueden consultar en WMO (1971), o en Machiwal y Jha (2008; 2012). En la tabla 3 se concentran los resultados

de tales pruebas; observándose que 11 registros son perfectamente homogéneos, cuatro muestran persistencia y uno alta variabilidad. Se detecta de la tabla 3, que la persistencia está asociada al valor de coeficiente de correlación serial de orden uno ( $r_1$ ). Es relevante indicar que en el lapso de estudio (1950-2014), ningún registro de IA presentó tendencia.

Tabla 3. Coeficiente de correlación serial de orden uno ( $r_1$ ) y resultados de las pruebas de homogeneidad, en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas

Núm.	Estación	$r_1$	Resultados de las pruebas de homogeneidad
1	Cañitas de Felipe P.	-0.129	Homogénea
2	Río Grande	-0.075	Según pruebas básicas (Helmert y Secuencias) oscila mucho
3	Fresnillo	0.034	Homogénea
4	Leobardo Reynoso	0.013	Homogénea
5	Villa de Cos	0.012	Homogénea
6	Santa Rosa	0.176	Según pruebas básicas oscila poco y muestra persistencia ligera
7	San Pedro Piedra G.	0.133	Homogénea
8	Villa García	-0.031	Homogénea
9	Pinos	0.160	Oscila poco según test de Helmert
10	Zacatecas	0.097	Homogénea
11	Villanueva	0.388	Según pruebas básicas oscila poco y se detecta persistencia
12	Presa El Chique	0.174	Según pruebas básicas oscila poco y muestra persistencia ligera
13	Juchipila	0.093	Homogénea
14	Nochistlán	0.047	Homogénea
15	Tlaltenango	0.052	Homogénea
16	Excamé	0.092	Homogénea

#### Los diez años más secos

A partir de las series de valores *IA* ordenados de menor a mayor, se seleccionan los diez más bajos y se obtienen sus años de ocurrencia. Tales valores de *IA* y sus años respectivos se han concentrado en la tabla 4. Para obtener en cuáles años se presentó el mayor número de sequías más extremas, se realizó una tabulación por zona geográfica, con 65 renglones relativos a cada año del periodo analizado (1950-2014) y diez columnas para los órdenes de magnitud decrecientes (10, 9, . . . , 2, 1).

Después cada uno de los diez años de cada registro (tabla 4), se llevaron a la tabulación de su zona, marcando únicamente su ocurrencia en el renglón y columna que le corresponde; se sumaron los respectivos órdenes de magnitud y se designaron por SUM. Los años con 3 o más ocurrencias, es decir, estaciones climatológicas afectadas (ECA) con sequía extrema, se exponen en la tabla 5.

En la tabla 5 se observa que en las zonas norte, centro y sur ocurren, respectivamente, 10, 9 y 8 años con tres o más estaciones climatológicas afectadas. En un contexto secuencial, los 18 años detectados en la Tabla 5 son los siguientes: 1950, 1952, 1954, 1956, 1957, 1960, 1961, 1962, 1969, 1974, 1979, 1982, 1989, 1998, 1999, 2000, 2001 y 2011; mostrando que las sequías extremas en el estado de Zacatecas, México, tienen un intervalo promedio de recurrencia de *aproximadamente 10 años*. También se observa que las sequías extremas de los años cincuenta fueron las de más amplia duración y cobertura. Se deduce de la Tabla 5, que los años con sequías extremas en las tres zonas geográficas fueron exclusivamente, 1957, 1999 y 2011.

#### Secuencias mínimas de 5 años

Con base en la técnica de promedios móviles de orden cinco, se identificaron en las 16 series cronológicas del *IA*, las tres secuencias mínimas, cuyos valores y ubicación se detallan en la tabla 6. Se deduce que en la zona Norte las secuencias de 5 años con sequías más severas son de 1997 al 2001, después la de 1950 a 1957 y por último, según la estación Fresnillo, la de 1960 a 1965. En la zona Centro y con excepción de la estación Pinos, el resto define un lapso amplio de 1977 a 1989 para estas secuencias mínimas. En la zona Sur, con excepción de Nochistlán, el resto define sus secuencias mínimas de 5 años en el inicio de los registros, es decir, de 1950 a 1957.

#### Estudio regional de las sequías severas y extremas

En la tabla 7 se indican únicamente los años con sequía severa (SS) y extrema (SE); está dividida en dos periodos, del inicio a 1980 y de 1981 al 2014. La suma de tales sequías en las zona Norte, Centro y Sur es, respectivamente, de 56, 43 y 41 eventos en el primer periodo estudiado y de 40, 37 y 39 eventos, en el segundo lapso de análisis. En resumen, en el primer periodo estudiado ocurrió un total de 140 eventos (SS y SE) y en el segundo lapso, únicamente 116 eventos.

Contrario a lo que se podría esperar debido a los efectos del *cambio climático*, no ocurren más sequías extremas en las épocas recientes, es decir, en el lapso de 1981 a 2014, en comparación con el periodo de 1950 a 1980. Para reforzar lo anterior, se observa en la última columna de la tabla 7, que el número de años sin se-

Tabla 4. Valores de los 10 menores índices de aridez (IA) anuales y sus años respectivos, en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México

Núm.	Nombre	Dato	Valores de IA en orden creciente de magnitud y sus años respectivos									
			10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	Cañitas de Felipe P.	IA	0.112	0.130	0.131	0.136	0.140	0.142	0.145	0.152	0.161	0.166
		Año	2011	1999	1980	1975	1974	1952	1957	2001	1969	1989
2	Río Grande	IA	0.090	0.101	0.107	0.138	0.152	0.160	0.162	0.168	0.173	0.174
		Año	1957	1956	1960	2011	1950	1982	1995	1989	2012	2001
3	Fresnillo	IA	0.133	0.137	0.152	0.158	0.169	0.176	0.183	0.188	0.191	0.200
		Año	1965	2011	2012	1979	1960	1964	1969	1999	1974	1954
4	Leobardo Reynoso	IA	0.130	0.170	0.179	0.197	0.199	0.202	0.202	0.204	0.205	0.206
		Año	2011	1969	1999	1957	1982	1956	1978	1974	1954	2001
5	Villa de Cos	IA	0.075	0.122	0.136	0.144	0.155	0.176	0.176	0.180	0.182	0.183
		Año	1954	1979	2011	1982	1956	1999	2000	1995	1963	1980
6	Santa Rosa	IA	0.151	0.158	0.168	0.188	0.192	0.202	0.209	0.213	0.213	0.224
		Año	1952	1957	1950	1979	2011	1953	1964	1956	1969	1954
7	San Pedro Piedra G.	IA	0.080	0.122	0.127	0.129	0.139	0.162	0.170	0.172	0.174	0.180
		Año	1988	1979	1987	1969	1999	1982	1960	2011	1952	1950
8	Villa García	IA	0.147	0.162	0.168	0.176	0.177	0.183	0.189	0.192	0.198	0.207
		Año	1969	1999	1954	1989	1982	1962	1974	1993	1957	2000
9	Pinos	IA	0.119	0.128	0.133	0.154	0.158	0.159	0.181	0.192	0.192	0.200
		Año	1969	2000	1987	1962	1977	1954	1968	1999	2005	2001
10	Zacatecas	IA	0.124	0.157	0.176	0.177	0.201	0.202	0.212	0.215	0.216	0.227
		Año	1969	2012	1957	2011	1954	1978	1982	1962	1979	1960
11	Villanueva	IA	0.147	0.154	0.155	0.173	0.185	0.188	0.192	0.194	0.213	0.214
		Año	1960	1979	1978	1969	2011	1982	1952	1957	1998	1961
12	Presa El Chique	IA	0.170	0.190	0.195	0.223	0.240	0.240	0.244	0.248	0.249	0.258
		Año	2011	1953	1961	1957	1998	1976	1989	1952	1979	1997
13	Juchipila	IA	0.171	0.211	0.222	0.296	0.302	0.313	0.321	0.323	0.333	0.349
		Año	2011	1957	1994	2000	1956	1952	1972	1950	1951	2012
14	Tlaltenango	IA	0.208	0.270	0.312	0.317	0.317	0.357	0.362	0.362	0.370	0.378
		Año	1950	2011	1998	1961	1968	2000	2012	1957	1964	1999
15	Nochistlán	IA	0.219	0.262	0.265	0.278	0.281	0.314	0.321	0.322	0.325	0.341
		Año	1989	1952	2005	2001	1999	1960	2011	1959	1998	2009
16	Excamé	IA	0.230	0.265	0.280	0.310	0.336	0.336	0.347	0.360	0.377	0.378
		Año	2011	1957	1994	1993	2000	1969	1961	1998	1999	1950

Tabla 5. Años con tres o más estaciones climatológicas afectadas (ECA), por zonas geográficas en el estado de Zacatecas, México

Zona Norte (EC = 6)			Zona Centro (EC = 5)			Zona Sur (EC = 5)		
Año	ECA	SUM	Año	ECA	SUM	Año	ECA	SUM
1954	4	14	1954	3	19	1950	3	14
1956	4	23	1957	3	13	1952	3	17
1957	4	30	1960	3	15	1957	4	28
1969	4	17	1962	3	15	1961	3	19
1974	3	13	1969	5	44	1998	4	19
1979	3	23	1979	3	20	1999	3	9
1982	3	18	1982	4	20	2000	3	18
1999	3	20	1999	3	18	2011	5	43
2001	3	5	2011	3	16	-	-	-
2011	7	58	-	-	-	-	-	-

Tabla 6. Promedios y lapsos de las tres secuencias mínimas de cinco años en las series cronológicas del IA, en las 16 estaciones climatológicas procesadas del estado de Zacatecas, México

Núm.	Estación	Primera secuencia	Segunda secuencia	Tercera secuencia
1	Cañitas de Felipe P.	0.194 (1997–2001)	0.200 (2008–2012)	0.202 (2007–2011)
2	Río Grande	0.189 (1953–1957)	0.208 (1952–1956)	0.216 (1997–2001)
3	Fresnillo	0.205 (1961–1965)	0.212 (1960–1964)	0.218 (1997–2001)
4	Leobardo Reynoso	0.207 (1997–2001)	0.230 (1996–2000)	0.239 (1998–2002)
5	Villa de Cos	0.187 (1997–2001)	0.191 (1996–2000)	0.192 (1995–1999)
6	Santa Rosa	0.214 (1950–1954)	0.229 (1952–1956)	0.231 (1953–1957)
7	San Pedro Piedra G.	0.206 (1985–1989)	0.216 (1984–1988)	0.218 (1950–1954)
8	Villa García	0.238 (1950–1954)	0.255 (1985–1989)	0.267 (1996–2000)
9	Pinos	0.209 (1968–1972)	0.219 (1999–2003)	0.234 (1998–2002)
10	Zacatecas	0.246 (1960–1964)	0.250 (1959–1963)	0.266 (1978–1982)
11	Villanueva	0.190 (1978–1982)	0.212 (1977–1981)	0.216 (1979–1983)
12	Presa El Chique	0.255 (1953–1957)	0.260 (1952–1956)	0.260 (1951–1955)
13	Juchipila	0.344 (1953–1957)	0.344 (2009–2013)	0.348 (1950–1954)
14	Tlaltenango	0.384 (1998–2002)	0.404 (1960–1964)	0.406 (1950–1954)
15	Nochistlán	0.357 (1997–2001)	0.369 (1998–2002)	0.379 (1996–2000)
16	Excamé	0.403 (1998–2002)	0.411 (1950–1954)	0.420 (2007–2011)

Tabla 7. Sequías severas (SS) y extremas (SE) anuales en las 16 estaciones climatológicas procesadas y sus ocurrencias por estación, zona y periodo, en el estado de Zacatecas, México

Núm.	Año	Estaciones zona Norte					Estaciones zona Centro					Estaciones zona Sur					Suma Sur	Est. por Edo. (Núm. zonas)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	1950		SE		SS	SE	SS	SS					SE		SE	SS	3	8 (3)
2	1951											SS	SS		SS	3	3 (1)	
3	1952	SE	SS		SS	SE	SS	SS		SE		SE	SE	SE	SS	5	12 (3)	
4	1953					SE						SE				1	2 (2)	
5	1954	SS	SS	SS	SS	SE	SS	SE	SE	SE			SS		SS	2	12 (3)	
6	1955																0 (3)	
7	1956		SE		SE	SE	SS					SE				1	5 (2)	
8	1957	SE	SE	SE	SE	SE	SS	SS	SE	SE	4	SE	SE	SS	SE	5	13 (3)	
9	1958																0 (3)	
10	1959												SE			1	1 (1)	
11	1960		SE	SE	SS		SE		SS	SE	3			SE	SS	2	8 (3)	
12	1961			SS					SS	SS	2	SE		SE	SE	3	6 (3)	
13	1962	SS	SS	SS	SS	SS	SE	SE	SE	SE	3						7 (2)	
14	1963					SS			SS		1						2 (2)	
15	1964			SE		SE	SE	SS			2			SS	SS	1	5 (3)	
16	1965		SS	SE		SS					2			SS	SS	1	3 (2)	
17	1966																0 (3)	
18	1967																0 (3)	
19	1968							SE			1			SE	SS	1	2 (2)	
20	1969	SS	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	SE	5	SS	SS	SS	SE	5	14 (3)	
21	1970							SS			1						1 (1)	
22	1971																0 (3)	
23	1972			SS				SS			1		SE		SS	2	4 (3)	
24	1973																0 (3)	
25	1974	SE	SS	SE	SS	SS	SE	SE			2	SS				1	7 (3)	
26	1975	SE			SS	SS				SS	1			SE			3 (2)	
27	1976											SE				1	1 (1)	
28	1977	SS	SS					SE			2						4 (2)	
29	1978				SE				SE	SE	2						3 (2)	
30	1979	SS	SE	SS	SE	SE	SE		SS	SE	3	SS		SS	SS	3	11 (3)	
31	1980	SE			SS	SS			SS	SS	1						3 (2)	
SUMAS		10	9	9	10	8	10	8	8	9	43	9	8	6	10	8	41	
32	1981									SS	1						1 (1)	
33	1982	SE	SS	SE	SE			SS	SE	SE	5						9 (2)	
34	1983																0 (3)	
35	1984																0 (3)	

continúa ...



quías extremas (SS y SE) en el primer periodo es de solo 6 (1955, 1958, 1966, 1967, 1971 y 1973) y en el segundo de 13, es decir del doble, ocurriendo en este lapso dos secuencias de años sin sequías extremas: 1983 a 1986 y 1990 a 1992.

También se observa en la última columna de la tabla 7, que los años con mayor número de estaciones climatológicas afectadas por las sequías extremas (SS y SE), fueron 1950 con 8, 1952 y 1954 con 12, 1957 con 13, 1960 a 1962 con 6 a 8, 1969 con 14, 1974 con 7, 1979 con 11, 1982 con 9, 1989 con 7, 1998 con 9, 1999 con 15, 2000 con 10, 2001 con 8, 2011 con 16 y 2012 con 9. De los años anteriores, exclusivamente los años de 1962 y 1982 no afectaron la zona Sur. Las sequías de los años 1952, 1954, 1957, 1969 y 1999, abarcaron casi la totalidad de las tres zonas estudiadas. El año 2011 ocurrió en las 16 estaciones climatológicas procesadas.

## Conclusiones

Se ha desarrollado un procedimiento para obtener los cuatro tipos de sequías meteorológicas (leves, moderadas, severas y extremas), en las 16 series cronológicas de índices de aridez anuales (IA) procesadas del estado de Zacatecas, México, lo cual constituye un análisis local o puntual de las sequías. Esas series tuvieron un *periodo común* de 65 años en el lapso de 1950 a 2014. Los resultados de tal procedimiento se ilustraron en la tabla 2.

El análisis regional, en tres zonas geográficas del estado de Zacatecas, México, permite concluir en relación con las 10 sequías más críticas (tabla 4), que los años con tres o más estaciones climatológicas afectadas por zona fueron: 1950, 1952, 1954, 1956, 1957, 1960, 1961, 1962, 1969, 1974, 1979, 1982, 1989, 1998, 1999, 2000, 2001 y 2011. Únicamente los años 1957, 1999 y 2011 fueron comunes en las tres zonas (Tabla 5).

La presencia generalizada (tabla 6) de las secuencias mínimas de 5 años del IA, obtenidas a través de la técnica de promedios móviles, ocurre en la zona norte en el periodo 1997 a 2001, en la zona centro en el lapso de 1977 a 1989 y en la zona sur, en el inicio de los registros de 1950 a 1957.

La ocurrencia global de las sequías severas (SS) y extremas (SE) se analizó en dos periodos, el primero del año 1950 a 1980 y el segundo de 1981 a 2014 (tabla 7). La suma de esas sequías en las zona Norte, Centro y Sur es, respectivamente, de 56, 43 y 41 eventos en el primer periodo estudiado y de 40, 37 y 39 eventos, en el segundo lapso de análisis. Entonces, en el periodo inicial ocurrió un total de 140 eventos y en el segundo, únicamente 116 eventos. Además se observa que el número de años sin sequías críticas (SS y SE), en el primer

periodo es de sólo 6 y en el segundo de 13, es decir del doble. Por lo anterior, se concluye que no se detectan efectos del *cambio climático* en la ocurrencia de sequías críticas en el estado de Zacatecas, México, con los análisis realizados.

Según resultados de la última columna de la tabla 7, las sequías críticas (SS y SE) de los años 1952, 1954, 1957, 1969, 1979 y 1999, abarcaron casi la totalidad de las tres zonas estudiadas. El año 2011 ocurrió en las 16 estaciones climatológicas procesadas. Con base en estos resultados y de manera aproximada, se deduce que las sequías críticas en el estado de Zacatecas, México, tienen una recurrencia del orden de los 10 años.

Todos los análisis estadísticos realizados con los IA anuales, se pueden llevar a cabo con el mes o meses más lluviosos, así como para la época de lluvias normal, como lo ha ilustrado Elagib (2009).

## Agradecimientos

Se aprecian las observaciones y correcciones sugeridas por los dos árbitros anónimos, las cuales permitieron mejorar la redacción del texto y clarificar sus resultados y conclusiones.

## Referencias

- Almanza R. y López S. *Radiación solar global en la República Mexicana mediante datos de insolación*. Series del Instituto de Ingeniería, Núm. 357, UNAM, Ciudad Universitaria, México, 1975, 20 p.
- Byun H.R. y Wilhite D.A. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, volumen 12 (número 9), 1999: 2747-2756.
- Campos Aranda D.F. Contraste de los índices DPP, SPI y RDI para clasificación de Sequías, en la estación climatológica Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, volumen VI (número 1), 2015a: 183-193.
- Campos Aranda D.F. Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, Volumen XVI (número 3), 2015b: 357-370.
- Dogan S., Berktaç A., Singh V.P. Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, volumen 470-471, 2012: 255-268.
- Elagib N.A. Assessment of drought across central Sudan using UNEP dryness ratio. *Hydrology Research*, volumen 40 (número 5), 2009: 481-494.
- Hargreaves G.H. y Samani Z.A. Estimating Potential Evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, volumen 108 (número IR3), 1982: 225-230.

- Machiwal D. y Jha M.K. Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: Applications to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, volumen 53 (número 2), 2008: 353-366.
- Machiwal D. y Jha M.K. *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*, Chapter 4: Methods for Time Series Analysis, pp. 51-84, Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2012, 303 p.
- Mishra A.K. y Singh V.P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, volumen 391 (números 1-2), 2010: 202-216.
- Mishra A.K. y Singh V.P. Drought modeling—A review. *Journal of Hydrology*, volumen 403 (números 1-2), 2011: 157-175.
- Morid S., Smakhtin V., Moghaddast M. Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran. *International Journal of Climatology*, volumen 26 (número 7), 2006: 971-985.
- Palmer W.C. *Meteorological Drought*. Research Paper No. 45, US, Weather Bureau, Washington, USA. 1965, 58 p.
- Pandey R.P. y Ramasastry K.S. Incidence of droughts in different climatic regions, *Hydrological Science Journal*, volumen 47 (número especial), 2002: S31-S40.
- Pandey R.P., Sharma K.D., Mishra S.K., Singh R., Agarwal A. Drought Characterization. Chapter 21, pp. 761-792, en: *Hydrology and Hydraulics*, editado por Vijay P. Singh, Highlands Ranch, Colorado, Water Resources Publications, 2008, 1080 p.
- Ponce V.M., Pandey R.P., Ercan S. Characterization of drought across climatic spectrum. *Journal of Hydrological Engineering*, volumen 5 (número 2), 2000: 222,224.
- Tsakiris G., Tigkas D., Vangelis H., Pangalou D. Regional drought identification and assessment. Case study in Crete, Chapter 9, pp. 169-191, en: *Methods and tools for drought analysis and management*, editado por Rossi G., Vega T. and Bonaccorso B. Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2007, 418 p.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *World Atlas of Desertification*, Edward Arnold, Londres, Inglaterra, 1992, 69 plates.
- United Nations Environment Programme (UNEP). *Global Deserts Outlook*. Edited by E. Ezcurra, Division of Early Warning and Assessment, Nairobi, Kenya, 2006, 148 p.
- World Meteorological Organization (WMO). *Climatic Change*. Annexed III: Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations, pp. 58-71, Technical Note Núm. 79, WMO-Núm. 195, Genova, Suiza, Secretariat of the WMO, 1971, 79 p.

#### Este artículo se cita:

##### Citación estilo Chicago

Campos-Aranda, Daniel Francisco. Estudio de sequías meteorológicas anuales por medio del índice de aridez, en el estado de Zacatecas, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVII, 03 (2016): 405-417.

##### Citación estilo ISO 690

Campos-Aranda D.F. Estudio de sequías meteorológicas anuales por medio del índice de aridez, en el estado de Zacatecas, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVII (número 3), julio-septiembre 2016: 405-417.

#### Semblanza del autor

*Daniel Francisco Campos-Aranda*. Obtuvo el título de ingeniero civil en diciembre de 1972, en la entonces Escuela de Ingeniería de la UASLP. Durante el primer semestre de 1977, realizó en Madrid, España un diplomado en hidrología general y aplicada. Posteriormente, durante 1980-1981 llevó a cabo estudios de maestría en ingeniería en la especialidad de hidráulica, en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En esta misma institución, inició (1984) y concluyó (1987) el doctorado en ingeniería con especialidad en aprovechamientos hidráulicos. Ha publicado trabajos principalmente en revistas mexicanas de excelencia: 51 en *Tecnología y Ciencias del Agua* (antes *Ingeniería Hidráulica en México*), 19 en *Agrociencia* y 19 en *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. Es autor de siete textos que versan sobre tópicos de hidrología superficial. En noviembre de 1989 obtuvo la medalla Gabino Barrera de la UNAM y en 2008 le fue otorgado el Premio Nacional "Francisco Torres H." de la AMH. Es profesor jubilado de la UASLP, desde el 1° de febrero del 2003. A partir de septiembre de 2013 ha vuelto a ser Investigador Nacional nivel I.