

Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años

Search of Trends in Annual Rainfall of the State of Zacatecas, Mexico, in 30 Records over 50 Years

Campos-Aranda Daniel Francisco

Profesor Jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Correo: campos_aranda@hotmail.com

Información del artículo: recibido: enero de 2014, reevaluado: abril de 2014, aceptado: junio de 2014

Resumen

Las primeras predicciones del cambio climático para México han establecido que en general la precipitación disminuirá y la temperatura ambiente aumentará. Por ello, en este trabajo se aborda el estudio de la precipitación anual del estado de Zacatecas, México, para buscar tendencias climáticas, a través de dos enfoques: el primero de carácter estadístico para detectar tendencia o cambios en la media, lo que significa pérdida de homogeneidad en los registros analizados; el segundo de tipo cuantitativo consistente en evaluar el cociente entre la precipitación media reciente y la de largo plazo para observar si se aparta de la unidad. Para estimar una precipitación media estable, únicamente se procesaron 30 estaciones pluviométricas con registros de más de 50 años. Se encontró que no existe evidencia estadística general de tendencia, pues únicamente dos registros mostraron un comportamiento decreciente; sin embargo, la lluvia anual se está reduciendo como lo detecta el cociente (CO_{15}) entre la lluvia media de los últimos 15 años y la de largo plazo, cuya moda de 27 valores es 0.975.

Abstract

For Mexico, it has been predicted that climatic change will generally decrease precipitation and increase the mean temperature. In this paper the annual rainfall of the state of Zacatecas, Mexico was studied. Two approaches were used to look for climatic trends: the first one, a statistical approach to detect trends and/or changes in the mean, which means a loss of homogeneity in the records analyzed; the second one, a quantitative approach which consists in evaluating the ratio of the recent average precipitation to the long run, to observe if it deviates from the unit. To estimate a stable average precipitation only 30 rain gauge stations with records of more than 50 years were processed. It was found that there is no general statistical evidence of trend, because only two records showed a decreasing behavior; however, through the ratio (CO_{15}) between the average rainfall of the last 15 years and the long run (whose mode of 27 values is 0.975) shows a decrease in the annual rainfall.

Descriptor:

- homogeneidad
- persistencia
- tendencia
- cambio en la media
- estacionalidad
- pruebas paramétricas
- pruebas no paramétricas

Keywords:

- homogeneity
- persistence
- trend
- change in mean
- seasonality
- parametric tests
- non parametric tests

Introducción

Durante las dos últimas décadas se han planteado dos preguntas fundamentales en relación con el *cambio climático* (CC), la primera es si realmente existe a nivel global y a corto plazo; la segunda es si son las actividades humanas las que lo han originado. En 2007, con el 4º reporte del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), estas preguntas fueron contestadas afirmativa y categóricamente. La consecuencia fundamental del CC es una elevación significativa de la temperatura ambiente del planeta, la cual pone en marcha una serie de efectos como el derretimiento de los glaciares y polos, con la consecuente elevación del nivel del mar, el incremento en la evaporación en suelos y superficies de agua, lo cual origina un cambio en los patrones de lluvia, generándose una alteración de los ecosistemas, etcétera (Raynal, 2011).

Los últimos escenarios del IPCC establecen, en términos generales, que en México, por su ubicación geográfica, las precipitaciones disminuirán y las temperaturas aumentarán (Martínez y Aguilar, 2008). Además, debido a sus condiciones socioeconómicas, México presentará una elevada *vulnerabilidad* al CC. Las afectaciones al ciclo hidrológico de las cuencas, establecen la necesidad de revisar con detalle los planes actuales y futuros sobre el aprovechamiento de los recursos hídricos (Martínez y Patiño, 2010). Entonces, para formular las *medidas de adaptación* que permitan mitigar los efectos del CC, con el propósito de alcanzar niveles razonables de *sustentabilidad* en el uso del agua, primero se deben identificar los cambios en tales variables meteorológicas, tanto en forma cualitativa como cuantitativa (Kundzewicz y Robson, 2004; Madsen *et al.*, 2013).

El *objetivo* de este trabajo consiste en buscar cambios significativos en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México. Lo anterior se hizo mediante dos enfoques, el primero de tipo estadístico intenta detectar componentes determinísticas como tendencia y cambios en la media en los registros de lluvia y el segundo de carácter cuantitativo, evalúa un cociente entre la precipitación media reciente y la de largo plazo del registro analizado. Para ello, se procesaron 30 registros de precipitación anual con más de 50 años y se utilizaron tres pruebas estadísticas generales y 13 específicas, citando sus referencias básicas y describiendo con detalle el procedimiento operativo de las relativas a la tendencia en los apéndices. Los resultados indican que en el estado de Zacatecas no existe evidencia estadística general del CC, pues los registros no muestran tendencia, sin embargo, la lluvia anual se está reduciendo como lo detecta el cociente (CO_{15}) entre la lluvia media de los

últimos 15 años y la de largo plazo, cuya media y moda son 0.978 y 0.975, respectivamente.

Metodología

Estaciones pluviométricas procesadas

De inicio se estableció emplear solo estaciones pluviométricas con un periodo amplio de registro; se encontró conveniente, por disponibilidad, usar las de más de 50 años de registro. El archivo en Excel de la precipitación mensual de la Dirección Local Zacatecas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), cuenta con 133 estaciones pluviométricas. De ellas únicamente 22 tienen un registro mayor de 50 años, pero las estaciones Trancoso, Jeréz y Teúl de González Ortega, fueron eliminadas por tener muchos años incompletos; entonces se utilizaron las 19 mostradas en la tabla 1, que no contienen datos en la columna 7 de dicha tabla.

Utilizando la información histórica contenida en los *Boletines Climatológicos* (SARH, 1977; 1980a; 1980b) para 11 estaciones más se logró completar sus registros, según se indica en la columna 7 de la tabla 1, integrando un total de 30 registros por procesar de precipitación anual en milímetros. En la figura 1 se muestra la ubicación geográfica de las 30 estaciones pluviométricas procesadas.

En la figura 1 se indican los parteaguas de las cuatro regiones hidrológicas que comprende el estado de Zacatecas. La región hidrológica núm. 11 de los Ríos Presidio y San Pedro que drenan al Océano Pacífico, abarca la porción menor en el oeste del estado, en esa zona únicamente se ubicó la estación Chalchihuites. En la región hidrológica núm. 12 Parcial del Río Santiago, que también fluye al Océano Pacífico, se ubican las zonas sur del estado y centro poniente; en esta región se procesaron 15 estaciones pluviométricas.

La región hidrológica núm. 36 de los ríos Nazas y Aguanaval es endorreica y estos confluyen a lo que era la Laguna de Mayrán, cerca de la Comarca Lagunera. Esta región comienza en la zona centro del estado y avanza hacia el norte con la cuenca del río Aguanaval y en ella se ubican las cinco estaciones pluviométricas analizadas. Otra porción de esta región se ubica en el norte del estado. Finalmente, la región hidrológica núm. 37 denominada El Salado que también es endorreica y está integrada por ríos y corrientes de poca importancia, comprende la porción norte y oriente del estado. En esta zona se procesaron nueve estaciones pluviométricas.

Tabla 1. Características generales de las 30 estaciones pluviométricas procesadas del estado de Zacatecas, México

Núm.	Nombre	Latitud Norte	Longitud W.G.	Altitud m.s.n.m.	R. H. ¹	Periodo del registro (NA ²)		
						Núm.	Boletín SARH	CONAGUA
1	Chalchihuites	23° 29'	103° 52'	2260	11	–	1962–2012 (51)	(51)
2	El Cazadero	23° 42'	103° 06'	1920	36	–	1958–2012 (55)	(55)
3	Leobardo Reynoso (El Sauz)	23° 11'	103° 12'	2090	36	1938–1946 (9)	1947–2012 (66)	(75)
4	Juan Aldama	24° 17'	103° 23'	1995	36	1962–1974 (13)	1975–2012 (38)	(51)
5	Río Grande	23° 48'	103° 02'	1890	36	1947–1965 (19)	1975–2012 (38)	(66 ³)
6	Santa Rosa	22° 56'	103° 07'	2240	36	1939–1946 (8)	1947–2012 (66)	(74)
7	Agua Nueva	23° 47'	102° 06'	1932	37	–	1963–2012 (50)	(50)
8	Calera	22° 54'	102° 39'	2192	37	–	1958–2012 (55)	(55)
9	Concepción del Oro	24° 37'	101° 23'	1940	37	1951–1959 (8)	1960–2012 (53)	(61)
10	Cañitas de Felipe Pescador	23° 36'	102° 44'	2025	37	1942–1973 (32)	1974–2012 (39)	(71)
11	Fresnillo	23° 11'	102° 53'	2195	37	–	1949–2012 (64)	(64)
12	Gruñidora	24° 16'	101° 53'	1825	37	–	1963–2012 (50)	(50 ⁴)
13	Pinos	22° 17'	101° 35'	2408	37	–	1947–2012 (66)	(66 ³)
14	Villa de Cos	23° 17'	102° 21'	2050	37	1942–1961 (20)	1962–2012 (51)	(71)
15	Zacatecas	22° 46'	102° 35'	2485	37	1930–1952 (23)	1953–2012 (60)	(83 ⁴)
16	El Platanito	22° 34'	104° 03'	990	12	–	1957–2012 (56)	(56)
17	Excámé	21° 39'	103° 22'	1740	12	–	1946–2012 (67)	(67)
18	Jiménez del Teúl	23° 15'	103° 48'	1900	12	–	1963–2012 (50)	(50)
19	Juchipila	21° 23'	103° 07'	1270	12	–	1947–2012 (66)	(66)
20	La Florida	22° 41'	103° 36'	1870	12	–	1954–2012 (58)	(58)
21	La Villita	21° 36'	103° 20'	1790	12	–	1957–2012 (56)	(56)
22	Loreto	22° 17'	101° 59'	2029	12	–	1963–2012 (50)	(50)
23	Monte Escobedo	22° 20'	103° 32'	2190	12	1957–1963 (7)	1964–2012 (49)	(56)
24	Nochistlán	21° 22'	102° 51'	1850	12	–	1950–2012 (63)	(63)
25	Ojo Caliente	22° 25'	102° 16'	2050	12	–	1961–2012 (52)	(52)
26	Presa El Chique	22° 00'	102° 53'	1620	12	1960–1963 (3)	1951–2012 (59)	(62)
27	San Pedro Piedra Gorda	22° 27'	102° 21'	2032	12	–	1942–2012 (71)	(71)
28	Tlaltenango	21° 47'	103° 20'	1700	12	–	1950–2012 (63)	(63)
29	Villa García	22° 10'	101° 57'	2102	12	–	1950–2012 (63)	(63)
30	Villanueva	22° 22'	102° 53'	1920	12	1950–1962 (13)	1963–2012 (50)	(63)

¹ región hidrológica ² número de años ³ se estimaron varios años por regresión ⁴ se transportó información de estación cercana

Deducción de datos faltantes

Con excepción de las estaciones pluviométricas Fresnillo y Leobardo Reynoso (El Sauz), el resto tienen registros de precipitación mensual incompletos, por ello se adoptó el proceso siguiente para su estimación. Cuando en un año incompleto faltaba un máximo de tres meses, estos se consideraron iguales a la media mensual. Si los tres meses faltantes se ubicaban en la época de lluvias (junio a septiembre) o bien eran más, se estimó el valor anual de la precipitación mediante regresión lineal con el registro más cercano.

Con este procedimiento se estimó el lapso faltante de 1966 a 1975 en la estación pluviométrica Río Grande, con base en los datos de El Cazadero, usando como periodo común 1975 a 2012 ($n = 38$) y suprimiendo seis valores dispersos para mejorar el coeficiente de correlación lineal (r_{xy}) de 0.7536 a 0.8912. Para estimar el lapso de 1987 a 1992 en la estación pluviométrica Pinos, no se pudieron utilizar los registros cercanos, pues también carecen de información, por ello se empleó la estación El Nigromante, con un periodo común de 22 datos en el lapso de 1984 a 2012; al suprimir dos valores dispersos el r_{xy} resultó de 0.7083.

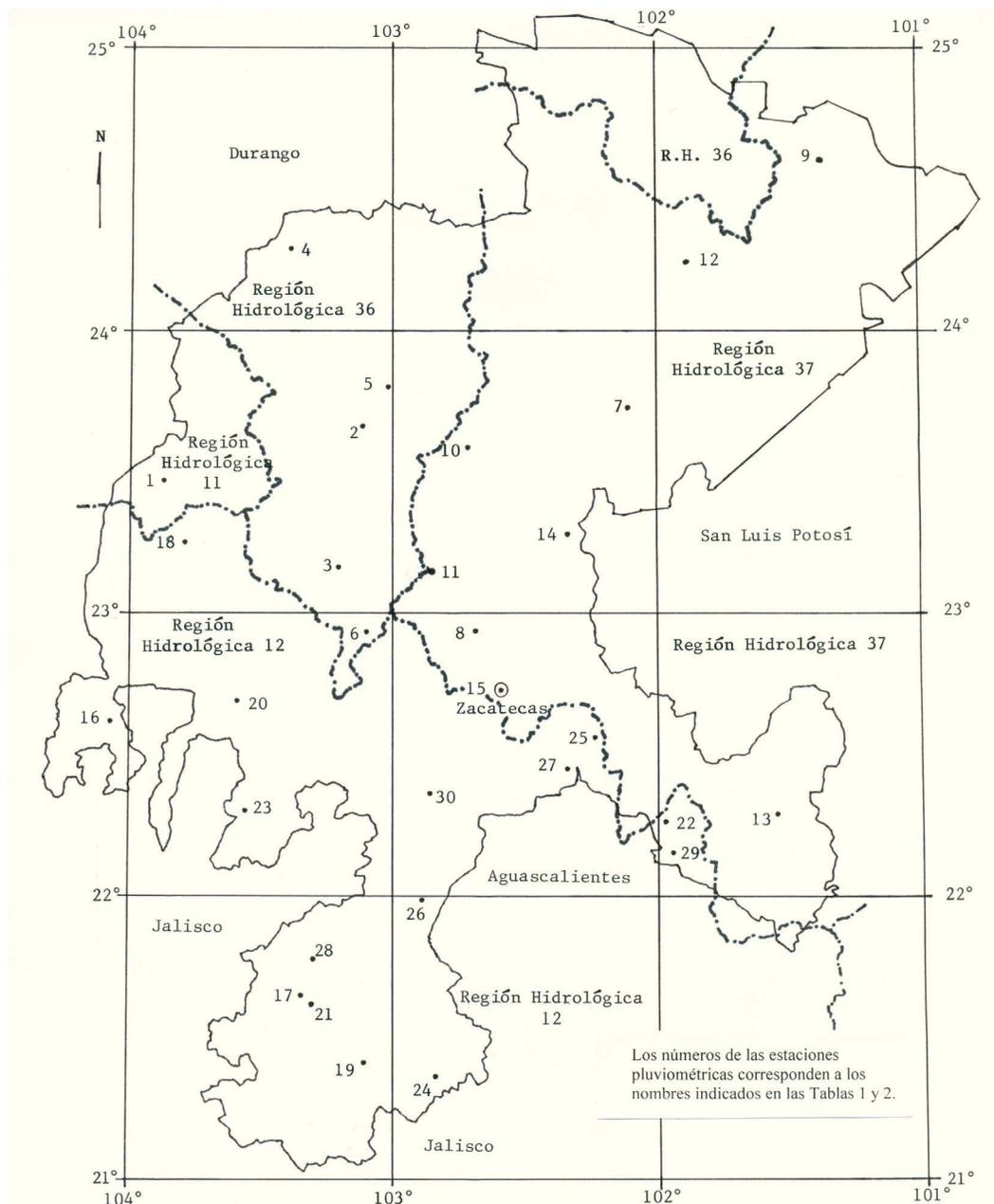


Figura 1. Localización geográfica de las 30 estaciones pluviométricas procesadas del estado de Zacatecas, México

Para completar el registro incompleto de la estación pluviométrica Zacatecas en los años 2010 a 2012, los datos mensuales faltantes se consideraron iguales a los registrados en la estación Guadalupe, que es bastante cercana, pues dista menos de 8 km en línea recta y se ubica en la misma zona geográfica. Por último, en la estación pluviométrica Gruñidora los años faltantes 2008, 2011 y 2012 se dedujeron con proporcionalidad de medias anuales en el lapso 1995 a 2012, con base en los datos de la estación Nuevo Mercurio que es la más cercana.

Pruebas estadísticas

Requerimientos estadísticos de los registros

Todos los análisis estadísticos y probabilísticos realizados con los registros hidrológicos o climatológicos de datos anuales, se basan en una serie de requerimientos estadísticos básicos, como son que la serie o registro sea consistente, libre de tendencia, no periódica y que constituya un proceso estocástico, cuya componente aleatoria siga una determinada función de distribución de probabilidades. La *consistencia* implica que todos los datos medidos pertenecen a la misma población estadística y tienen por lo tanto una media invariante en el tiempo; esta propiedad también se conoce como *homogeneidad* y sus pruebas estadísticas buscan cambios significativos en la media.

La *tendencia* ocurre en los datos si existe una correlación significativa (positiva o negativa) entre los datos y el tiempo. La tendencia vuelve a la serie *no estacionaria*, es comúnmente introducida por los cambios en el uso del suelo o por el cambio climático. Finalmente, la *aleatoriedad* en un registro hidrológico o climatológico significa que los datos fluctúan exclusivamente por el fenómeno natural (lluvia o escurrimiento); cuando no hay aleatoriedad el registro es persistente. La *persistencia* se define como la propensión de los datos de una serie a recordar la magnitud de sus valores antecedentes o a ser influenciados por ellos. Debido a lo anterior, se cuantifica con base en el coeficiente de correlación serial que define la dependencia entre cada elemento i y el $i-k$; por ello k se llama "tiempo de retraso" (Adeloye y Montaseri, 2002; Machiwal y Jha, 2008; 2012).

Pruebas y tests aplicados

Las pruebas estadísticas pueden ser *paramétricas* y *no paramétricas*; las segundas no están basadas en la consideración de que la población de los datos es normal, por ello se utilizan ampliamente, pero son pruebas que

tienen menor potencia que los tests paramétricos. Se ha llegado a establecer que para obtener la misma conclusión con igual nivel de confianza, las pruebas no paramétricas requieren de 5 a 35% más datos que los tests paramétricos (Machiwal y Jha, 2012).

La aplicación de las pruebas paramétricas requiere que los datos sigan una distribución normal, entonces primero se determinó con los tests del *cociente de Geary* (CG) y de Shapiro-Wilk (SW) que si para los registros procesados de precipitación anual se puede aceptar que provengan de una distribución normal. Los resultados de ambos tests se tienen en la tabla 2, las columnas 3 y 4 indican la *normalidad* con N y la no procedencia de una distribución normal con NN.

Las *pruebas de Helmer* (PH) y de las *secuencias* (PS) detectan si la serie o registro es *homogéneo*, debido a que no tiene persistencia o tendencia, cambio en la media, o bien, no oscila demasiado. En cambio, la *prueba de Von Neumann* (PV) es de aleatoriedad contra componentes determinísticas no especificadas. Los resultados de estas pruebas se exponen en las columnas 5 a 7 de la tabla 2, con H para registros homogéneos y con NH para los no homogéneos.

Respecto a los tests específicos, se aplicaron los 11 siguientes:

1. Dos de persistencia, el de Anderson (TA) y el de Sneyers (TS_1).
2. Tres de tendencia, el de Kendall (TK), el de Spearman (TS_2) y el de Mann-Kendall (TM).
3. Uno de variabilidad, el de Bartlett (TB).
4. Uno de cambio en la media, el de Cramer (TC) y
5. Cuatro que buscan cambios en la media o pérdida de homogeneidad con estadísticos basados en la curva de masa residual (TB_1 a TB_4).

Todas las pruebas se aplicaron con un nivel de significancia (α) de 5%. En el apéndice 1 se citan las referencias donde se pueden consultar 13 de los tests anteriores, pues los tres relativos a la tendencia se exponen en el apéndice 2. Los resultados de estos 11 tests específicos se muestran en las columnas 8 a 18 de la tabla 2, usando H cuando no detectan la componente que buscan y NH cuando la encuentran.

Discusión de resultados

Pruebas estadísticas

El test de Shapiro-Wilk detecta ocho registros que no proceden de una distribución normal. La correspondencia entre estos resultados y los valores del cociente

de Geary (CG), permite establecer que cuando excede a 1.060 o es menor que 0.940, la serie no presenta normalidad. Las diferencias encontradas en los resultados de ambos tests (tabla 2), ratifican que el CG es menos consistente, según señalan Machiwal y Jha (2012). Según valores de la tabla 4, cuando el coeficiente de asimetría (Cs) es mayor de 0.600, el registro no procede de una distribución normal.

En la tabla 3 se citan las componentes determinísticas detectadas en 18 estaciones pluviométricas que mostraron anomalías según las 14 pruebas estadísticas aplicadas. En general, cuando la prueba de Helmer o la de las Secuencias muestran falta de homogeneidad, se debe a exceso de secuencias y se señala como "oscila poco". Cuando con la prueba de Von Neumann se encontró pérdida de homogeneidad, el registro se indicó

Tabla 2. Resultados de las pruebas estadísticas en las 30 estaciones pluviométricas procesadas, del estado de Zacatecas, México

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Núm	Nombre	CG	SW	PH	PS	PV	TA	TS ₁	TK	TS ₂	TM	TB	TC	TB ₁	TB ₂	TB ₃	TB ₄
1	Chalchihuites	1.009	N	NH	NH	H	NH	H	H	H	H	H	H	H	NH	H	H
2	El Cazadero	0.983	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
3	Leobardo Reynoso	0.996	NN	H	H	H	H	NH	NH	NH	NH	H	H	H	H	H	H
4	Juan Aldama	1.057	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
5	Río Grande	1.002	N	NH	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
6	Santa Rosa	1.022	NN	NH	NH	NH	NH	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H
7	Agua Nueva	0.982	N	NH	NH	NH	NH	NH	H	H	H	NH	H	H	NH	H	H
8	Calera	1.061	NN	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
9	Concepción del Oro	0.973	NN	NH	NH	NH	NH	NH	H	H	H	H	H	H	NH	H	H
10	Felipe Pescador	0.978	NN	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
11	Fresnillo	1.045	N	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
12	Gruñidora	1.003	N	NH	NH	NH	NH	NH	NH	NH	NH	H	NH	NH	NH	NH	NH
13	Pinos	1.010	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
14	Villa de Cos	0.995	NN	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
15	Zacatecas	1.014	N	H	H	NH	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
16	El Platanito	1.032	N	H	NH	NH	NH	NH	H	H	H	H	H	NH	NH	H	H
17	Excamé	0.989	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
18	Jiménez del Teúl	1.017	N	NH	NH	H	H	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H
19	Juchipila	1.007	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
20	La Florida	0.997	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
21	La Villita	0.975	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
22	Loreto	0.965	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
23	Monte Escobedo	0.968	NN	NH	NH	H	H	NH	H	H	H	NH	H	H	H	H	H
24	Nochistlán	0.987	N	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
25	Ojo Caliente	1.013	N	H	H	NH	NH	NH	H	H	H	H	H	H	NH	H	H
26	Presa El Chique	1.057	N	H	NH	H	H	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H
27	San Pedro Piedra Gorda	0.991	N	H	H	NH	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
28	Tlaltenango	0.942	NN	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
29	Villa García	1.058	N	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
30	Villanueva	1.033	N	NH	NH	NH	NH	NH	H	H	H	H	H	H	H	H	H

Tabla 3. Relación de estaciones pluviométricas que mostraron componentes determinísticas y su descripción

Núm.	Nombre de la estación	Componentes determinísticas detectadas
1	Chalchihuites	Oscila poco, persistencia ligera
2	Leobardo Reynoso	Persistencia ligera y tendencia
3	Río Grande	Oscila poco
4	Santa Rosa	Oscila poco y persistencia
5	Agua Nueva	Oscila poco, persistencia y exceso de variabilidad (TB y TB ₂) por valor muy bajo de precipitación (38.0 mm en 1987)
6	Calera	Oscila poco
7	Concepción del Oro	Oscila poco, no aleatorio, persistencia y cambio en la media (TB ₂) por valor muy bajo de lluvia (95.7 mm en 1960)
8	Fresnillo	Oscila poco
9	Gruñidora	Persistencia, tendencia y cambio en la media
10	Zacatecas	No aleatorio y persistencia ligera
11	El Platanito	Oscila poco, no aleatorio, persistencia y cambio en la media (TB ₁ y TB ₂) por valor muy bajo de lluvia (261.8 mm en 2011)
12	Jiménez del Teúl	Oscila poco, persistencia ligera
13	Monte Escobedo	Oscila poco, persistencia ligera y exceso de variabilidad (TB) por valores altos de lluvia (1197.5 mm en 1958 y 1242.7 en 1963)
14	Nochistlán	Oscila poco
15	Ojo Caliente	No aleatorio y persistencia
16	Presa El Chique	Oscila poco, persistencia ligera
17	San Pedro Piedra Gorda	Oscila poco, persistencia ligera
18	Villanueva	Oscila poco, no aleatorio y persistencia

como “no aleatorio”. Por último, cuando la persistencia se detectó únicamente con alguna de las dos pruebas, se señaló como “persistencia ligera”.

La *persistencia* puede considerarse una característica estadística del registro que se procesa, la cual se debe tomar en cuenta al realizar el análisis estocástico de la serie, a través de los modelos ARMA (Adeloye y Montaseri, 2002; Machiwal y Jha, 2008). Por lo anterior, todas las estaciones pluviométricas que mostraron esta característica no se eliminan. En las figuras 2, 3 y 4 se muestra el comportamiento de los registros de las estaciones Leobardo Reynoso, Gruñidora y El Platanito, las dos primeras presentaron tendencia y la tercera, cambio en la media, según las pruebas TB₁ y TB₂. La estación Gruñidora solo resultó homogénea en el test de Bartlett. Es importante destacar que cada una de estas tres estaciones pluviométricas que resultaron no homogéneas, pertenecen a las regiones hidrológicas números 36, 37 y 12, respectivamente; indicando con ello que todos los ambientes geográficos del estado de Zacatecas son susceptibles de esas anomalías.

En estos registros se ajustó un modelo lineal para la tendencia y se buscó si su pendiente resultaba estadísticamente diferente de cero con una prueba basada en la distribución *t* de Student, únicamente en la estación Gruñidora resultó significativa, pero en Leobardo Reynoso quedó en el límite, pues su estadístico alcanzó un valor de 1.980 y el crítico es 1.993, con $\alpha = 5\%$. La descripción de esta prueba se presenta en el apéndice 3. Tomando en cuenta estos resultados y los de la tabla 3, se consideró necesario eliminar las estaciones Leobardo Reynoso, Gruñidora y El Platanito.

Cociente de precipitaciones medias

Hu y Liu (2010) analizaron 31 registros de precipitación anual de periodo amplio (más de 50 años) a través de China, cuyo valor medio oscila de menos de 50 mm a más de 2000 mm, es decir, abarcan desde los climas áridos hasta los húmedos; encontrando que el cociente de la lluvia reciente (últimos 10 años) a la de largo plazo fluctuó de 0.89 a 1.11, con un valor medio igual a la uni-

dad. Por ello, concluyen que la lluvia en tal país no muestra efectos del cambio climático.

La tabla 4 se forma por tres partes, en la primera se exponen los parámetros estadísticos de la precipitación anual: media (\bar{X}), desviación estándar (S) y coeficientes de variación (Cv), asimetría (Cs), curtosis (Ck) y correlación serial de orden uno (r_1). En la segunda parte, se tienen las medias (\bar{x}_i) de los últimos 5, 10 y 15 años del registro y en la tercera los cocientes de \bar{x}_i entre \bar{X} .

Los últimos dos renglones de la tabla 4 muestran que los valores de la media y de la moda de los tres cocientes son casi iguales, con una moda ligeramente me-

nor. Lo anterior implica que los 27 valores calculados de cada cociente no están sesgados, indicando que varían poco, como lo demuestran sus magnitudes mínima y máxima. El cociente CO_5 es el más bajo, debido a la presencia de la sequía de los años 2010 a 2012. El cociente CO_{10} es cercano a la unidad y además en 16 de los 27 valores calculados, excede la unidad. Desafortunadamente, el cociente CO_{15} tiene una media y moda menores que la unidad (0.978 y 0.975) y solo ocurren siete con magnitud mayor que uno y seis de ellos no exceden 1.10. La moda se estimó con base en la distribución gamma mixta.

Tabla 4. Parámetros estadísticos y cocientes de medias de la precipitación anual en las 27 estaciones pluviométricas de amplio registro del estado de Zacatecas, México

Núm.	Nombre	Parámetros estadísticos					Medias			Cocientes (\bar{x}_i / \bar{X})			
		\bar{X}	S	Cv	Cs	Ck	r_1	\bar{x}_5	\bar{x}_{10}	\bar{x}_{15}	CO_5	CO_{10}	CO_{15}
1	Chalchihuites	529.8	166.4	0.314	-0.315	2.694	0.220	528.5	596.4	564.6	0.998	1.126	1.066
2	El Cazadero	403.5	125.0	0.310	0.491	3.459	0.105	355.6	443.4	408.6	0.881	1.099	1.013
3	Juan Aldama	427.8	121.1	0.283	0.362	2.204	-0.041	427.5	475.6	436.9	0.999	1.112	1.021
4	Río Grande	382.9	126.3	0.330	0.461	3.303	-0.034	354.2	393.7	379.2	0.925	1.028	0.991
5	Santa Rosa	452.3	143.4	0.317	0.668	3.682	0.194	398.0	474.5	474.2	0.880	1.049	1.048
6	Agua Nueva	330.1	140.6	0.426	0.682	3.571	0.250	410.1	390.0	354.7	1.242	1.182	1.075
7	Calera	429.0	137.2	0.320	0.557	2.717	0.122	350.2	444.1	421.8	0.816	1.035	0.983
8	Concepción del Oro	418.5	163.9	0.392	0.832	5.164	0.243	327.7	402.5	368.5	0.783	0.962	0.880
9	Felipe Pescador	375.3	125.4	0.334	0.954	5.176	-0.134	311.1	364.5	359.2	0.829	0.971	0.957
10	Fresnillo	411.3	120.1	0.292	0.222	2.448	0.100	357.9	432.0	406.3	0.870	1.050	0.988
11	Pinos	447.4	149.0	0.333	0.306	2.734	0.103	454.1	470.8	427.3	1.015	1.052	0.955
12	Villa de Cos	422.2	159.6	0.378	0.780	3.866	0.055	362.2	421.4	385.0	0.858	0.998	0.912
13	Zacatecas	472.9	139.8	0.296	0.374	3.205	0.181	404.3	458.8	461.2	0.855	0.970	0.975
14	Excamé	733.1	153.1	0.209	-0.177	2.988	0.089	632.5	720.0	683.0	0.863	0.982	0.932
15	Jiménez del Teúl	473.8	127.2	0.269	0.064	3.535	0.171	435.3	454.5	448.8	0.919	0.959	0.947
16	Juchipila	694.8	142.5	0.205	0.038	3.301	0.077	583.5	663.1	666.2	0.840	0.954	0.959
17	La Florida	582.9	142.6	0.245	0.235	2.808	0.119	554.3	611.4	572.0	0.951	1.049	0.981
18	La Villita	771.7	178.7	0.232	0.570	3.657	0.139	625.8	730.3	726.7	0.811	0.946	0.942
19	Loreto	442.1	124.6	0.282	-0.505	3.691	0.011	397.6	435.2	415.2	0.899	0.984	0.939
20	Monte Escobedo	717.4	169.1	0.236	0.831	4.391	0.059	681.0	738.0	693.3	0.949	1.029	0.966
21	Nochistlán	699.9	164.6	0.235	0.006	3.061	0.065	594.7	644.1	610.8	0.850	0.920	0.873
22	Ojo Caliente	390.8	141.7	0.363	-0.057	2.788	0.337	436.4	442.7	407.7	1.117	1.133	1.043
23	Presa El Chique	541.5	118.2	0.218	-0.021	2.459	0.160	487.5	552.1	532.5	0.900	1.020	0.983
24	San Pedro Piedra Gorda	415.4	136.6	0.329	0.207	2.755	0.186	364.6	418.6	401.5	0.878	1.008	0.967
25	Tlaltenango	699.4	158.3	0.226	0.606	3.917	0.020	651.9	676.7	644.7	0.932	0.968	0.922
26	Villa García	441.2	126.4	0.286	0.046	2.227	-0.037	474.6	507.8	488.0	1.076	1.151	1.106
27	Villanueva	466.5	145.9	0.313	0.213	2.254	0.399	423.8	498.1	459.9	0.908	1.068	0.986
	Valores mínimos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.783	0.920	0.873
	Valores máximos	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.242	1.182	1.106
	Valores promedio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.920	1.030	0.978
	Valor de la moda	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.910	1.025	0.975

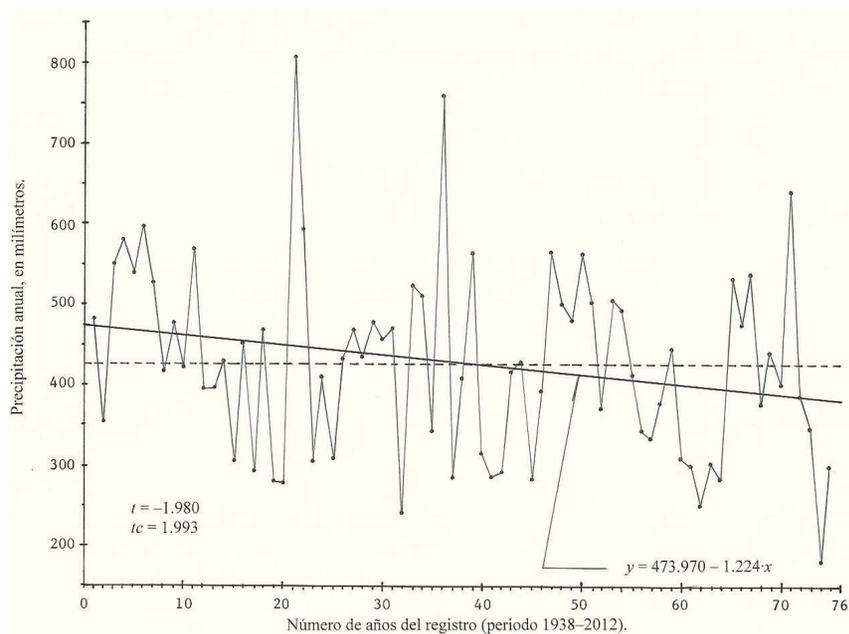


Figura 2. Serie cronológica de la precipitación anual (mm) de la estación pluviométrica Leobardo Reynoso, Zacatecas, México

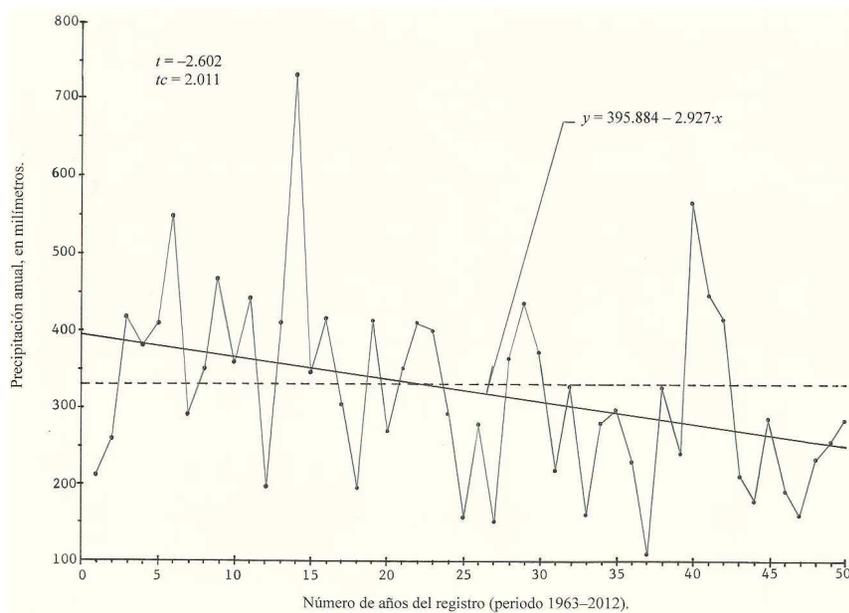


Figura 3. Serie cronológica de la precipitación anual (mm) de la estación pluviométrica Gruñidora, Zacatecas, México

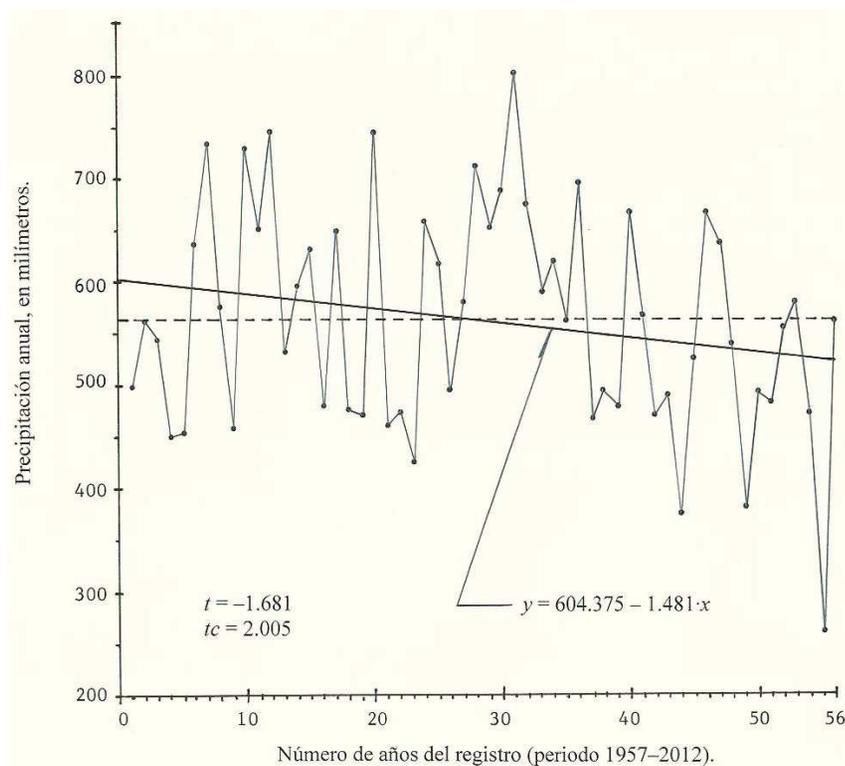


Figura 4. Serie cronológica de la precipitación anual (mm) de la estación pluviométrica El Platanito, Zacatecas, México

Conclusiones

El resultado relevante de este estudio, es que la precipitación anual del estado de Zacatecas, México, está disminuyendo, pues el cociente CO_{15} fue menor que la unidad en 20 de los 27 registros procesados y donde excedió a uno, la mayoría no llegó a 1.10; además la media y la moda fueron semejantes con los valores siguientes: 0.978 y 0.975, respectivamente.

Por otra parte, la comparación entre los tres cocientes (CO_5 , CO_{10} y CO_{15}), conduce a detectar la presencia de una sequía importante en los últimos 5 años, ya que el CO_5 es el más bajo con un valor medio de 0.92. Como el CO_{10} se recupera a un valor medio de 1.030, se intuye que la sequía citada tuvo una duración breve.

Aunque estadísticamente no existe evidencia general del cambio climático, pues únicamente dos registros de los 30 procesados, mostraron *tendencia* (estaciones pluviométricas Leobardo Reynoso y Gruñidora), esta fue *decreciente* en ambos y significativa en la estación Gruñidora y casi diferente de cero en la segunda (figuras 2 y 3). Los cocientes CO_{15} de las tres estaciones eliminadas (las dos anteriores y El Platanito), son respectivamente los siguientes: 0.901, 0.858 y 0.888.

En la estación pluviométrica El Platanito se han medido en los últimos 15 años, los tres valores más bajos

de precipitación de todo su registro de 56 años (figura 4). Esto influye, para ser detectado por dos pruebas basadas en la curva masa residual (TB_1 y TB_2) y encontrar cambio en la media o pérdida de homogeneidad en tal registro.

Es importante señalar que las estaciones pluviométricas que resultaron no homogéneas, pertenecen a las regiones hidrológicas 36, 37 y 12, por esto se intuye que todos los ambientes geográficos del estado de Zacatecas son susceptibles de tales anomalías.

Se sugiere realizar este análisis en otros estados de la República Mexicana, o bien, en otras regiones o subregiones hidrológicas, para establecer si esta disminución de la precipitación es generalizada y donde se encuentre, como en el estado de Zacatecas, México, formular medidas orientadas a considerar esa reducción de lluvia y redimensionar los aprovechamientos hidráulicos de todo tipo.

Agradecimientos

Se agradecen las observaciones y correcciones sugeridas por el árbitro anónimo A, las cuales permitieron mejorar el enfoque general del trabajo y ayudaron a destacar sus resultados prácticos.

Apéndice 1

Referencias de consulta de las pruebas estadísticas aplicadas

Prueba o Test	Símbolo	Referencias
Cociente de Geary	CG	Machiwal y Jha (2012)
Shapiro-Wilk	SW	Shapiro y Wilk (1965), Ruiz (1977) y Shapiro (1998)
Helmert	PH	Mather (1977) y Campos (1998)
Secuencias	PS	Thom (1971) y Campos (1998)
Von Neumann	PV	WMO (1971), Buishand (1982) y Machiwal y Jha (2012)
Anderson	TA	WMO (1971), Linsley <i>et al.</i> (1988) y Campos (1998)
Sneyers	TS ₁	WMO (1971)
Bartlett	TB	WMO (1971) y Ruiz (1977)
Cramer	TC	WMO (1971) y Campos (1998)
Buishand	TB ₁ a TB ₂	Buishand (1982), Gutiérrez <i>et al.</i> (2007) y Campos (2008)

Apéndice 2

Descripción de los Tests de Tendencia

Machiwal y Jha (2008) aplicaron 12 pruebas para detección de tendencia, la mayoría paramétricas y encontraron que los tres tests que serán expuestos, fueron los de mayor potencia o más confiables.

Test de Kendall (TK)

Esta prueba paramétrica también se conoce como de *correlación de rangos* (Machiwal y Jha, 2012), es muy efectiva si la tendencia fundamental es de tipo lineal o se aproxima a esta. Su procedimiento consiste en evaluar el número p , en todos los pares de observaciones (x_i, x_j con $i = 1$ a $n-1$; $j = i + 1$ a n) en que x_i es mayor que x_j después se calculan las estadísticas siguientes (Kottegoda, 1980):

$$\tau = \left[\frac{4p}{n(n-1)} \right] - 1 \quad (1)$$

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (2)$$

Si el cociente τ/σ_τ es menor que ± 1.960 , el registro no presenta tendencia en una prueba de dos colas con un nivel de significancia α de 5%.

Test de Spearman (TS₂)

En esta prueba no paramétrica que se conoce como *correlación del orden de rangos* (Machiwal y Jha, 2012), primero se ordenan los datos de menor a mayor y se sustituye cada elemento del registro por su rango (k_i), después para cada dato de la serie original se calculan las diferencias: $d_i = k_i - i$, con $i = 1$ a n y se evalúan las estadísticas siguientes (WMO, 1971; Adeloje y Montaseri, 2002):

$$R_k = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (3)$$

$$t = R_k \sqrt{\frac{n-2}{1-R_k^2}} \quad (4)$$

El valor de la ecuación anterior se compara con el intervalo que define $\pm t_c$ tomado de la distribución t de Student con $n-2$ grados de libertad y nivel de significancia α , para una prueba de dos colas; si lo excede ($t > t_c$) existe tendencia.

Test de Mann-Kendall (TM)

Es una prueba no paramétrica que busca tendencia en la serie sin importar si es lineal o no lineal; pero el registro no debe mostrar persistencia. Su estadístico operati-

vo S_s es la suma de los signos de las diferencias (z) de todas las parejas factibles de formar, por ello su expresión es (Manly, 2001):

$$S_s = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{signo}(x_i - x_j) \quad (5)$$

en la cual, el signo(z) es -1 para $z < 0$, 0 para $z = 0$ y $+1$ para $z > 0$. Para una serie con valores aleatorios se espera que $S_s = 0$, cuya varianza es (Hirsch *et al.*, 1993; Machiwal y Jha, 2012):

$$\text{Var}(S_s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

El estadístico de la prueba es

$$Z_s = \frac{S_s + m_c}{\sqrt{\text{Var}(S_s)}} \quad (7)$$

En la expresión anterior, $m_c = 1$ cuando $S_s < 0$ y $m_c = -1$ para $S_s > 0$. Si el valor absoluto de Z_s es mayor que el valor crítico de la distribución normal estándar, la serie presenta tendencia creciente o decreciente con un nivel de significancia α . Para $\alpha = 5\%$ el valor crítico es 1.960. La varianza (ecuación 6) se debe corregir cuando existen datos iguales o la muestra es censurada (Hirsch *et al.*, 1993).

Apéndice 3

Recta de regresión para una tendencia lineal

Se considera que la variable dependiente (y) representa las precipitaciones anuales P_i en milímetros y los tiempos o años T_i son las abscisas (x), en este caso iguales al i -ésimo valor i . Para probar si la pendiente (m) de la recta de regresión ajustada por mínimos cuadrados de los residuos, es estadísticamente diferente de cero, se usa una prueba basada en la t de Student definida por las ecuaciones siguientes (Ostele y Mensing, 1975):

$$P = b + m \cdot T \quad (8)$$

$$b = \bar{P} - m \cdot \bar{T} \quad (9)$$

$$m = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \cdot i - \bar{P} \cdot \bar{T}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i^2 - \bar{T}^2} \quad (10)$$

$$t = \frac{m}{\sqrt{S_m^2}} \quad (11)$$

$$S_m^2 = \frac{S_E^2}{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (12)$$

$$S_E^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2}{(n-2)} \quad (13)$$

\bar{P} y \bar{T} son las medias; en la ecuación anterior, \hat{P}_i es el valor estimado con la recta de regresión (ecuación 8). S_E^2 y S_m^2 son las varianzas de los errores y de la pendiente. Si el valor calculado t es mayor que el crítico (t_c), obtenido para la distribución t de Student con $n - 2$ grados de libertad y $\alpha = 5\%$, en una prueba de dos colas, la pendiente m es significativa, es decir, existe tendencia lineal. El problema de esta prueba es que no distingue entre persistencia y tendencia (Adeloye y Montaseri, 2002).

Referencias

- Adeloye A.J. y Montaseri M. Preliminary streamflow data analyses prior to water resources study. *Hydrological Sciences Journal*, volumen 47 (número 5), 2002: 679-692.
- Buishand T.A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, volumen 58, 1982: 11-27.
- Campos-Aranda D.F. *Procesos del ciclo hidrológico*, capítulo 4: precipitación, pp. 4.1-4.100 y capítulo 8: escurrimiento, pp. 8.1-8.76, 3ª reimpresión, San Luis Potosí, editorial Universitaria Potosina, 1998.
- Campos-Aranda D.F. Cuatro pruebas de homogeneidad para registros de lluvia anual basadas en la curva masa residual. XX Congreso Nacional de Hidráulica, tema: Hidrología superficial y subterránea, ponencia 6, octubre de 2008, Toluca, Estado de México.
- Hirsch R.M., Helsel D.R., Cohn T.A., Gilroy E.J. Statistical Analysis of Hydrologic Data, capítulo 17, pp. 17.1-17.55, en: *Handbook of Hydrology*, editor in chief David R. Maidment, Nueva York, McGraw-Hill, Inc., 1993.
- Gutiérrez-López A., Arellano-Lara F., Aparicio-Mijares F.J. Determinación de periodos de cambio climático, empleando pruebas de ruptura de series. *Tlaloc*, (número 38), septiembre-enero de 2007: 4-11.
- Hu Ch. y Liu Ch. *Climate changes and changes of runoff and sediment loads from Chinese rivers. Climate change and adaptation for water resources in Yellow river basin*, IHP, VII Technical Document in Hydrology, UNESCO office in Beijing, China, 2010, pp. 40-50.

- Kottegoda N.T. *Stochastic water resources technology*, capítulo 2: analysis of hydrologic time series, pp. 20-66, Londres, Inglaterra, MacMillan Press, Ltd, 1980, 384 p.
- Kundzewicz Z.W. y Robson A.J. Change detection in hydrological records-A review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, volumen 49 (número 1), febrero 2004: 7-18.
- Linsley R.K., Kohler M.A., Paulhus J.L. *Hydrology for Engineers*, capítulo 14: Stochastic hydrology, pp. 374-397, Londres, Inglaterra, McGraw-Hill Book Co., SI metric edition, 1988, 492 p.
- Machiwal D. y Jha M.K. Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: application 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*, capítulo 4: Methods for time series analysis, pp. 51-84, Dordrecht, The Netherlands, Springer, 2012, 303 p.
- Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T.R. *A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment*. European Cooperation in Science and Technology and Centre for Ecology and Hydrology, England, Wallingford, 2013, 180 p.
- Manly B.F.J. *Statistics for environmental science and management*, capítulo 8: Time series analysis, pp. 192-222, Florida, Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2001, 326 p.
- Martínez-Austria P.F. y Aguilar-Chávez A. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen II*, México, SEMARNAT-IMTA, 2008, 118 p.
- Martínez-Austria P.F. y Patiño-Gómez C. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de Vulnerabilidad Hídrica en México ante el Cambio Climático*, México, SEMARNAT-IMTA, 2010, 164 p.
- Mather J.R. *Workbook in Applied Climatology*, Exercise II: Skewness, homogeneity and correlation, pp. 9-14, Publications in Climatology, volumen XXX (número 1). Laboratory of Climatology, Nueva Jersey, 1977, 107 p.
- Ostle B. y Mensing R.W. *Statistics in research*, capítulo 7: Regression analysis, pp. 165-236, 3ª ed., Iowa, USA, Iowa State University Press, 1975, 596 p.
- Raynal-Villaseñor J.A. Cambio climático global: una realidad inequívoca. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, volumen XII (número 4), 2011: 421-427.
- Ruiz-Maya L. *Métodos estadísticos de investigación*, capítulo 9: condiciones paramétricas del análisis de varianza, pp. 233-249, España, Instituto Nacional de Estadística, 1977, 367 p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico Núm. 2*. Región Hidrológica Núm. 12B (Río Santiago, Poncitlán-Desembocadura). Subsecretaría de Planeación, México, Tomo I, 1977.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico Núm. 3*. Región Hidrológica Núm. 37 (El Salado), Subsecretaría de Planeación, México, 1980a.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Boletín Climatológico Núm. 4*. Región Hidrológica Núm. 36 (Nazas-Aguanaval), Subsecretaría de Planeación, México, 1980b.
- Shapiro S.S. y Wilk M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, volumen 52, 1965: 591-611.
- Shapiro S.S. Selection, fitting and testing statistical models, capítulo 6, pp. 6.1-6.35, en: *Handbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists*, editor Wadsworth H.M., 2a ed., Nueva York, McGraw-Hill Inc, 1998.
- Thom H.C.S. *Some methods of climatological analysis*, technical note Núm. 81, World Meteorological Organization, Genova, Suiza, 1971, 53 p.
- World Meteorological Organization (WMO). *Climatic change*, anexo III: Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations, pp. 58-71, nota técnica Núm. 79, WMO-Núm. 195, Secretaría de WMO, Genova, Suiza, 1971, 79 p.

Este artículo se cita:

Citación estilo Chicago

Campos-Aranda, Daniel Francisco. Búsqueda de tendencias en la precipitación anual del estado de Zacatecas, México; en 30 registros con más de 50 años. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVI, 03 (2015): 355-368.

Citación estilo ISO 690

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), julio-septiembre 2015: 355-368.

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 artículos principalmente en revistas mexicanas de excelencia: 46 en *Tecnología y Ciencias del Agua* (antes *Ingeniería Hidráulica en México*), 18 en *Agrociencia* y 16 en *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. Es profesor jubilado de la UASLP, desde el 1° de febrero de 2003. En noviembre de 1989 obtuvo la medalla Gabino Barreda de la UNAM y en 2008 le fue otorgado el Premio Nacional "Francisco Torres H." de la AMH. A partir de septiembre de 2013 vuelve a ser investigador nacional nivel I.