



Quinto
Congreso Nacional
de Riego y Drenaje
COMEII-AURPAES 2019

Septiembre 2019 | Mazatlán, Sinaloa



AURPAES, S.C.

Artículo: COMEII-19011

Mazatlán, Sin., del 18 al 20

de septiembre de 2019

ANÁLISIS REGIONAL DE FRECUENCIA DE SEQUÍA METEOROLÓGICA EN LA ZONA ÁRIDA DE MÉXICO

Jesús de la Cruz Bartolón^{1*}, David Ortega-Gaucin²

¹Coordinación de Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

jdelaacruz@tlaloc.imta.mx - 777-3293600-ext. 611 (*Autor de correspondencia)

²Coordinación de Hidrología Superficial. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Resumen

Dentro de la variabilidad climática, uno de los eventos más complejos y poco comprendido a nivel mundial es el fenómeno de la sequía, que en su estado meteorológico se relaciona con la presencia de la precipitación pluvial en una cantidad inferior a un umbral que afecta a los ecosistemas, la economía y la sociedad. El Organismo de Cuenca Noroeste, localizado en la zona árida de México, es impactado con la recurrencia y aumento cada vez más de la intensidad de sequías meteorológicas, caracterizadas por una condición natural y temporal del clima, con manifestación silenciosa, avance gradual en el espacio y tiempo, haciendo que los sectores antes mencionados se vean perjudicados.

En el presente trabajo, para definir a la sequía meteorológica fue necesario establecer el umbral de la lámina precipitada, una probabilidad de ocurrencia del 50 por ciento; usando el método de análisis regional de frecuencia con L-Momentos, que ofrece mayores ventajas al aplicarse en zonas áridas y semiáridas, donde las series históricas de precipitación son de corta longitud y al ser eventos extremos se tornan difíciles de modelar por ser poco frecuentes.

Entre los resultados relevantes fue la regionalización, donde el Organismos de Cuenca Noroeste quedó completamente definido por sus condiciones de precipitación media anual; los datos de precipitación tuvieron un mejor ajuste a la función de distribución de probabilidad General de Valores Extremos y Kappa de 4 parámetros. A través de mapas en escala cromática, quedaron definidos aquellos municipios que presentan mayor riesgo de sequías.

Palabras claves: precipitación pluvial, probabilidad, L-momentos, sequía meteorológica, zonas áridas.

Introducción

Uno de los eventos más complejos y poco comprendido a nivel mundial como parte de la variabilidad climática es el fenómeno de la sequía, que en su estado meteorológico, se relaciona con la disminución de la precipitación pluvial que afecta a los ecosistemas y la economía. Éste fenómeno se caracteriza por tener tres rasgos principales: la intensidad, asociada al déficit de precipitación; la duración, que varía desde unos cuantos meses hasta varios años; y la extensión, que puede abarcar grandes áreas geográficas (estados o regiones completas). Es evidente que las sequías tengan una respuesta más grave en un espacio territorial árido y cuencas deficitarias de agua donde el crecimiento de la población, la expansión de las áreas agrícolas, el aumento de la demanda energética y el incremento de las industrias demandarán más recursos hídricos.

México es vulnerable a la sequía por su ubicación geográfica, 66 por ciento del territorio es desértico o semidesértico; se encuentra ubicado en la franja cuya latitud corresponde a los grandes desiertos del mundo; y presenta todo un contraste en la distribución espacio-temporal del agua y por ende, efecto en la población y la economía: por citar algún aspecto de contraste, las regiones del norte cuentan con una tercera parte del agua renovable en el país a diferencia de las regiones del sur, que presentan dos terceras partes del total del agua renovable (Conagua, 2015).

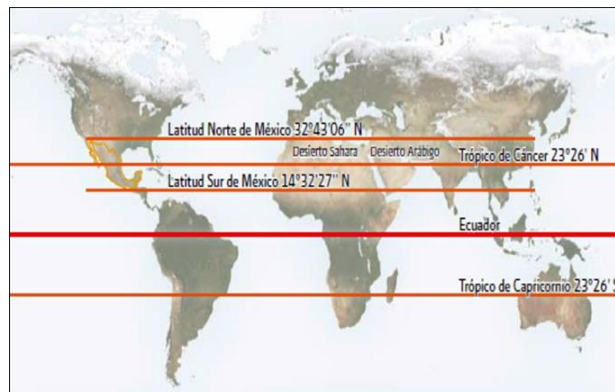


Figura 1. Franja desértica del mundo (Adaptado de FAO, Global Ecological Zones).

El análisis de los eventos de sequía puede realizarse bajo un enfoque probabilístico o usando un análisis regional de frecuencia; gran parte de los trabajos de la literatura están aterrizados en la construcción de índices cuantitativos que miden el grado de desviación de los registros, de manera individual o acumulados, respecto a un umbral, obteniendo la duración, la frecuencia y la distribución espacio-temporal de los eventos secos, tales índices, por mencionar los más aceptados son el Índice de Precipitación Estandarizado o SPI (McKee, Doesken, & Kleist, 1993) y el Índice de Precipitación-Evapotranspiración Estandarizado o SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010), cuya bondad es la sencillez en su construcción, pero que demandan series históricas de larga duración, principalmente. Una alternativa a lo anterior, y cuya aplicación de este trabajo, es el análisis regional de frecuencia (ARF) basado en L-Momentos, técnica desarrollada por Hosking y Wallis (1997) para caracterizar bajo un enfoque probabilístico eventos extremos. El método es

muy robusto y estima el periodo de recurrencia de eventos extremos a partir de una función de distribución de probabilidad, ajustando los registros de la precipitación.

Toda la aplicación de la metodología ARF se sustenta en la guía metodológica para la aplicación del Análisis Regional de Frecuencia del Programa Hidrológico Internacional de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la UNESCO (Núñez, 2010), auxiliándonos del software comercial L-RAP elaborado por MGS Software, herramienta que sirvió para obtener la probabilidad de ocurrencia de la sequía con diferentes grados de duración e intensidad, a escala municipal en el OC Noroeste.

Materiales y Métodos

El área de estudio cubrió al OC Noroeste, localizada en una zona netamente árida y semiárida, abarca 95 municipios del estado de Sonora, el centro-occidental de Chihuahua y de Baja California Sur, una extensión total de 197,586.19 km², y con 2.84 millones de habitantes (<http://www.inegi.org.mx>).

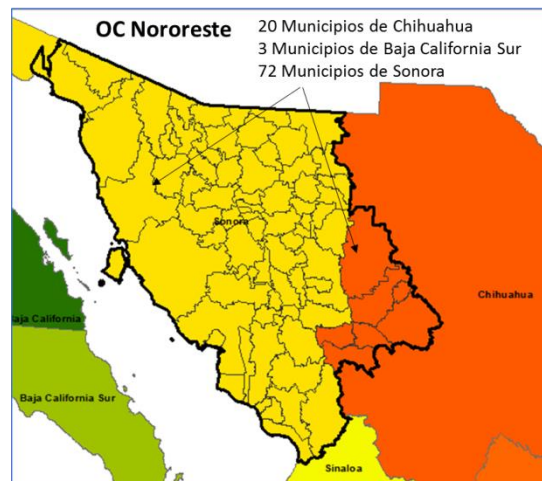


Figura 2. Frontera del Organismo de Cuenca Noroeste.

Los registros pluviométricos de las estaciones utilizadas fueron extraídos de la base de datos del Extractor Rápido de Información Climatológica ERIC III Versión 3.2 (IMTA, 2013) y complementada con el CLICOM, del portal web: <http://clicom-mex.cicese.mx/>.

A grandes rasgos el proceso de investigación en el estudio consistió primeramente en que la información de precipitación de las estaciones climatológicas, enmarcadas en el sitio de estudio, se procesó en cantidad y calidad; se revisó su distribución espacial en todo el Organismo de Cuenca; se ponderó su magnitud promedio anual a través de los resultados de la interpolación (isoyetas) con tal de construir series de tiempo a escala municipal; se estableció el umbral o nivel de truncamiento para definir los periodos secos a través de la curva de crecimiento regional de cuantiles, resultado de la aplicación de un análisis regional de frecuencia (ARF) aplicando la metodología L-Momentos, se escogió el cuantil con una probabilidad de ocurrencia del 50%. Con este último valor se definieron los periodos secos, cuantificándolos y determinando la frecuencia relativa; tales

resultados de probabilidad se normalizaron y se representaron a través de mapas a escala cromática.

Etapas del proceso de investigación:

Etapa 1. Consistió en la construcción de series de datos históricos de lluvia acumulada anual, guardando consistencia y representación en longitud y calidad. Se ubicaron 37 estaciones climatológicas en el Organismo de Cuenca Noroeste.; a cada una de las estaciones se le calcularon los estadísticos muestrales de la serie; además, se realizó el análisis de estacionariedad para identificar tendencia y el análisis de homogeneidad. El periodo escogido fue de 30 años comprendidos de 1980 al 2009.

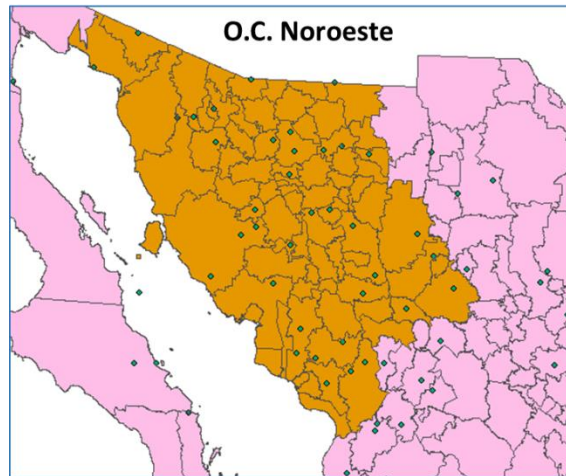


Figura 3. Distribución espacial de las estaciones climatológicas del OC Noroeste.

Etapa 2. Se generaron series históricas de precipitación media anual a escala municipal. Se usó el método de las isoyetas para realizar la extrapolación de las precipitaciones y con la ecuación 1 se obtuvo la lámina de lluvia media anual, obteniendo series históricas de precipitación, 1980-2009.

$$p = \frac{\sum_{i=1}^n p_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

Donde: p_i es la precipitación media anual observada en mm para un año i , A_i es el área delimitada entre isoyetas en km^2 , y n es el número de franjas o subáreas que delimitan al municipio.

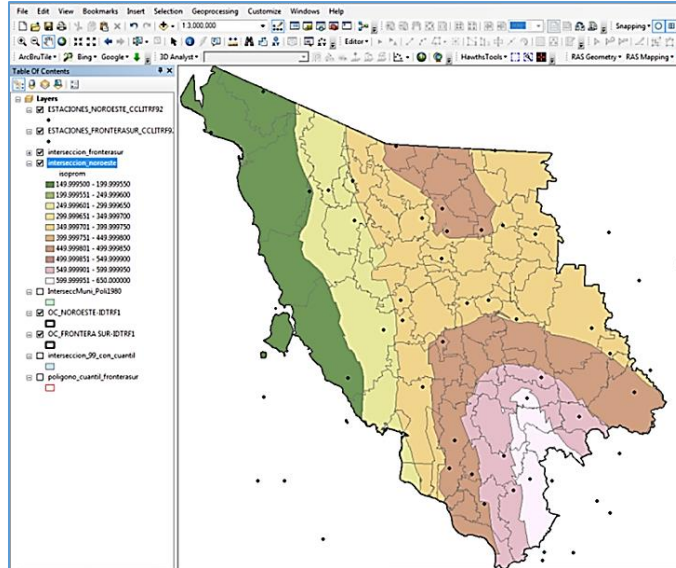


Figura 4. Trazo de isoyetas para el cálculo de la precipitación media anual a escala municipal, por año, 1980, OC Noroeste.

Etapa 3. Se determinó el umbral o nivel de truncamiento para definir de la serie histórica los periodos de sequía. Para esto se escogió el cuantil del 50 por ciento de probabilidad de ocurrencia, valor muy conservador, y que resultó del análisis regional de frecuencia a través del método de L-Momentos.

El umbral o nivel de truncamiento, que es representado por X_0 , se usa para separar los eventos potenciales de sequía y excedencias (periodos secos y húmedos). En los métodos convencionales es común usar los estadísticos como la media y mediana de las series de tiempo, donde la media aritmética es el menos recomendable como umbral para definir la condición de sequía en las zonas áridas por el carácter errático en las magnitudes de las láminas de lluvia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
2	id_mpio	8006	8009	8012	8013	8017	8018	8020	8025	8030	8031	8034	8035	8040	8041	8043
3	1980	350.00	532.55	538.19	350.00	398.83	450.00	650.00	350.00	649.85	449.21	350.00	350.00	368.17	550.00	410.28
4	1981	550.00	678.74	650.00	374.64	650.00	637.83	758.94	456.53	750.00	631.03	450.00	350.00	558.21	750.00	550.62
5	1982	450.00	846.58	737.51	450.00	502.22	617.61	827.86	450.00	850.00	638.21	450.00	350.00	460.21	850.00	437.14
6	1983	650.00	934.55	823.88	550.00	650.00	740.86	963.73	634.95	1050.00	792.29	550.00	550.00	664.98	985.56	687.02
7	1984	650.00	950.00	863.53	550.00	652.19	760.89	1007.26	587.58	1150.00	812.23	550.00	550.00	648.54	1043.67	667.50
8	1985	550.00	847.98	750.00	550.00	550.76	650.55	847.13	950.00	950.00	676.39	550.00	550.00	563.03	915.39	556.85
9	1986	650.00	849.91	750.00	458.08	673.98	750.00	770.55	575.68	850.00	750.77	550.00	450.00	629.21	850.00	673.41
10	1987	450.00	450.00	450.00	550.00	447.64	450.00	550.00	462.03	550.00	449.67	550.00	450.00	431.56	502.91	450.00
11	1988	391.00	467.00	450.00	450.00	385.06	450.00	650.00	450.00	649.70	449.07	450.00	450.00	450.00	548.29	450.00
12	1989	550.00	650.00	635.25	450.00	469.54	550.00	700.73	450.00	750.00	561.74	450.00	350.00	480.32	690.19	550.00
13	1990	650.00	918.36	803.80	550.00	650.19	750.00	950.00	625.54	950.00	795.33	550.00	450.00	663.19	950.00	714.19
14	1991	750.00	950.00	871.50	563.75	750.00	841.17	866.27	684.78	950.00	840.68	650.00	550.00	688.69	950.00	750.50
15	1992	550.00	746.57	650.00	450.00	550.00	632.60	750.00	546.86	750.00	632.91	450.00	450.00	556.73	750.00	551.67
16	1993	750.00	882.98	824.68	650.00	680.26	750.34	854.84	709.11	950.00	811.30	650.00	550.00	734.16	950.00	750.37
17	1994	550.15	850.00	754.21	550.00	550.12	650.87	911.01	550.00	950.00	715.02	550.00	550.00	583.32	941.07	630.16
18	1995	350.00	645.39	539.49	350.00	350.00	440.11	750.00	350.00	750.00	456.22	350.00	350.00	403.80	746.85	354.62
19	1996	450.00	737.33	701.26	450.00	498.84	613.37	750.00	451.31	750.00	601.05	450.00	446.76	561.30	750.00	547.41
20	1997	650.00	848.76	843.63	550.00	660.58	746.50	850.00	550.00	850.00	715.74	550.00	450.00	627.09	850.00	650.02
21	1998	350.00	549.96	450.00	439.13	353.14	450.00	550.00	350.00	550.00	444.74	350.00	450.00	449.98	550.00	401.76
22	1999	550.00	750.00	655.13	450.71	550.07	638.97	667.20	550.00	706.89	648.36	475.58	450.00	561.34	750.00	574.50
23	2000	650.00	1036.22	923.98	550.00	676.03	784.35	932.54	551.73	1050.00	821.34	550.00	550.00	603.54	1050.00	672.85
24	2001	558.365	1090.457	894.7945	486.9228	650.125	767.8181	936.7704	550	1050	818.9112	480.9509	450	571.7222	1120.647	637.7585
25	2002	450.00	883.03	731.12	450.00	452.03	569.02	756.37	413.48	850.00	600.79	450.00	450.00	464.47	924.39	454.57
26	2003	450.58	813.01	715.81	350.00	550.00	618.19	738.87	414.37	772.19	644.69	350.00	250.00	480.28	850.00	523.18
27	2004	752.83	1141.09	1020.56	550.00	650.00	905.93	1101.75	677.45	1150.00	969.24	573.57	450.00	725.77	1160.41	829.45
28	2005	558.03	1129.39	932.03	450.00	651.17	785.18	937.23	453.24	1050.51	849.40	450.00	350.00	550.31	1150.00	641.55
29	2006	650.00	1042.43	914.31	450.00	667.95	794.12	888.98	550.00	951.44	836.83	457.14	450.00	580.16	1050.00	673.69
30	2007	650.00	1042.39	863.35	618.81	650.19	753.88	1000.49	552.68	1050.00	815.34	550.00	550.00	682.06	102.54	685.70
31	2008	650.00	907.12	846.25	450.00	608.57	739.70	949.96	476.74	1040.95	737.48	450.00	350.00	519.32	949.76	571.03
32	2009	650.00	1208.85	1045.37	550.00	676.98	846.86	1083.81	552.13	1238.98	910.95	550.00	450.00	604.48	1250.00	692.40
33																

Figura 5. Muestra de la serie histórica de precipitación media anual a escala municipal en el OC Noroeste, obtenida por Isoyetas.



A continuación se describirán los pasos seguidos para el análisis regional de frecuencia, auxiliándonos del software comercial L-RAP, distribuido por MGS Software, LLC.

Preparación de los datos. En este paso se realizó la revisión y control de la calidad de los datos de precipitación de las estaciones climatológicas del OC Noroeste, usando como criterio escoger aquellas estaciones con longitud de registro mayor de 15 años. El software L-RAP detecta en su proceso de "Control" aquellos registros falsos y errores de transcripción. Es importante aclarar que se trata de un método regional cuya calidad consiste en cuantificar los eventos meteorológicos en regiones con poca o nula información con base en la información disponible en toda la región meteorológicamente homogénea, por lo que no importan los años cuyos meses presenten datos incompletos o la necesidad de generar esos datos faltantes.

Identificación de regiones homogéneas. Se consideró como supuesto básico, que la distribución subyacente para un conjunto de sitios es la misma dentro de una región homogénea. Debido a que las estaciones comprendidas en el OC Noroeste reflejan una alta estacionalidad de las láminas de lluvia, se optó por delimitar regiones homogéneas *a priori*, considerando como criterio, realizar un agrupamiento en función del *índice de estacionalidad* (IE), que tiene su fundamento en la estadística circular que considera el día medio de ocurrencia similar a la media aritmética, y el IE, similar a una media estandarizada de variación.

El IE oscila entre 0 y 1, valores cercano a 0 indican gran variación en los días de ocurrencia, en tanto que los valores cercanos a 1, muestran una baja variación en los días de ocurrencia y por ende alta concentración de los datos. En los resultados obtenidos, los valores de IE variaron de 0.07 a 0.95.

Hosking y Wallis (1997) recomiendan que en caso de que las estaciones analizadas se encuentren dentro de un mismo rango de IE, éstas pueden ser agrupadas en subregiones homogéneas tomando en cuenta solo la magnitud de la precipitación media anual, considerando un número mínimo de 7 estaciones por subregión; además, el mismo autor puntualiza que las regiones homogéneas no necesitan ser geográficamente continuas, es decir, forzarlas a pertenecer a una determinada región en función de su ubicación geográfica.

La medida de discordancia (D_i), permite evaluar el grado en que los L-momentos de una estación, se apartan significativamente del patrón medio de los L-momentos regionales, construyendo una elipse concéntrica cuyas coordenadas corresponden a un par de puntos (por ejemplo, sobre una gráfica L-CV vs L-Skewness) con valores correspondientes a los L-Cv y L-Skewness regionales. La elipse presenta eje mayor y menor, escogidos para dar el mejor ajuste a los datos, determinados por la matriz muestral de covarianza de los L-momento-ratios de los sitios. Donde, ese grado de alejamiento del centro de la elipse, se mide en términos de una prueba de *discordancia* D_i , que sirve para identificar estaciones cuyos valores muestrales de los L-momentos difieran significativamente de las otras estaciones de la supuesta región homogénea. Esta medida de discordancia se usó en el proceso de control de calidad de los datos al



indicar los sitios dentro de la región donde los datos deben ser sometidos a un análisis de calidad más profundo.

Número de sitios	Valor crítico	Número de sitios	Valor crítico
5	1,333	10	2,491
6	1,648	11	2,632
7	1,917	12	2,757
8	2,140	13	2,869
9	2,329	14	2,971
		15	3

Figura 6. Valores críticos para la estadística de Discordancia (Di) en relación al número de estaciones del sitio de estudio, tomado de Hosking y Wallis (1997 y 2007).

```

=====
CRITERIOS DE SELECCION ESTACIONES
=====
ARF-NOROESTE_FRONTERASUR Jan/12 Months

Climatico Regiones = 2
No Coaccion en Media Anno Precipitacion
No Coaccion en Selecion de Latitud
No Coaccion en Selecion de Longitud
Minima Cantidad Datos = 5
Todas Tipos de Gages
Duplicado Gages Quitado
Utilizacion Completo Datos Para Estaciones

Ningunos apremios en los meta datos 1 del usuario
Ningunos apremios en los meta datos 2 del usuario
Ningunos apremios en los meta datos 3 del usuario
Ningunos apremios en los meta datos 4 del usuario
1

=====
ESTACIONES EN SELECCIONADO REGIONES
L-MOMENT PROPORCIONES Y DISCORDANCY MEDIDA
=====
# Regional Datos = 811 Datos Percentil Umbral = 0.00

-----
## ID Estacion Nombre Gobierno No-Cero Todos TODOS-DATOS ** NO-CERO DATOS ESTADISTICA ***
Discordancy Estacion Nombre Unidad Gage #Datos #Datos MAP Estado Region MEDIA ThetaZ MEDIA L-CV L-SKEW L-KURT L-CINCO
-----
1 26001 AGUA PRIETA SO DY 24 24 362.1 0 2 357.4 0.000 357.4 0.1690 0.1121 0.1449 0.0254 0.00
2 26206 ALTAR SO DY 23 23 290.8 0 2 299.1 0.000 299.1 0.2194 0.2497 0.2726 0.1686 0.92
3 26005 ARIZPE SO DY 13 13 486.7 0 2 519.2 0.000 519.2 0.1456 0.2297 0.2845 0.0061 1.29
4 26006 BACADEHUACHI SO DY 14 14 479.6 0 2 479.8 0.000 479.8 0.1455 0.1128 0.0904 0.1384 0.26
5 26007 BACANUCHI SO DY 25 25 497.4 0 2 502.7 0.000 502.7 0.1476 0.2146 0.1158 0.0729 1.24
6 26205 BACERAC SO DY 21 21 460.2 0 2 456.6 0.000 456.6 0.1367 -0.0639 0.1357 -0.0263 1.85
7 26008 BANAMICHI SO DY 26 26 460.7 0 2 458.7 0.000 458.7 0.1565 0.0756 0.0088 -0.0595 0.78
8 8352 BASASEACHIC CH DY 15 15 1172.2 0 2 1050.0 0.000 1050.0 0.1956 0.0708 0.2834 0.2971 1.54
9 26018 CIUDAD OBREGON SO DY 28 28 383.9 0 2 387.1 0.000 387.1 0.1970 0.0303 0.0992 0.0505 0.67
10 26021 COCORAQUE SO DY 15 15 470.7 0 2 478.9 0.000 478.9 0.1406 0.0084 0.0921 -0.0924 0.44
11 26180 EL CAJON SO DY 30 30 436.9 0 2 436.9 0.000 436.9 0.1780 0.2737 0.2060 0.0325 1.30
12 26029 EL CUBIL SO DY 10 10 722.2 0 2 709.9 0.000 709.9 0.1710 0.1169 0.2772 0.0634 0.85
13 26032 EL OREGANO SO DY 19 19 429.5 0 2 417.3 0.000 417.3 0.1665 0.1716 0.2554 -0.0084 0.45
14 26139 HERMOSILLO SO DY 30 30 386.4 0 2 386.4 0.000 386.4 0.1782 0.0837 0.0248 -0.0609 0.78
15 26045 IMURIS SO DY 27 27 457.9 0 2 469.5 0.000 469.5 0.1483 0.1964 0.1693 0.0141 0.62
16 26052 MAZATAN SO DY 13 13 489.7 0 2 467.9 0.000 467.9 0.1686 0.2147 0.3137 -0.0981 1.07
17 26059 NACOCZARI SO DY 10 10 579.5 0 2 571.5 0.000 571.5 0.1345 -0.0707 -0.2034 0.1244 4.164
18 26061 NAVOJOA SO DY 27 27 441.9 0 2 446.3 0.000 446.3 0.1798 0.1047 0.1651 0.1102 0.05
19 26062 NOGALES SO DY 16 16 461.4 0 2 439.3 0.000 439.3 0.1807 -0.0260 0.0406 -0.1104 1.09
20 8219 PENITAS CH DY 10 10 642.4 0 2 619.7 0.000 619.7 0.1261 -0.0482 0.0023 -0.0934 1.08
21 26093 PITIQUITO SO DY 28 28 249.1 0 2 256.5 0.000 256.5 0.1770 0.1936 0.1897 0.0180 0.30
22 8326 PRESA ABRAHAM G CH DY 16 16 461.5 0 2 475.0 0.000 475.0 0.1422 0.0652 0.1661 0.1764 0.32
23 26024 PRESA ADOLFO RUIZ C SO DY 29 29 722.2 0 2 553.1 0.000 553.1 0.1469 0.1424 0.1749 0.0764 0.22
24 26068 PRESA ALVARO OBREG SO DY 28 28 416.4 0 2 428.8 0.000 428.8 0.1440 0.1693 0.1846 0.0764 0.42
25 26069 PRESA ANGOSTURA SO DY 23 23 421.3 0 2 424.8 0.000 424.8 0.1557 0.1186 0.0640 0.0410 0.46
26 26092 PRESA CUAHTEMOC SO DY 19 19 416.6 0 2 407.9 0.000 407.9 0.1782 0.2294 0.1846 -0.0378 0.71
27 26072 PUERTO PENASCO SO DY 18 18 61.2 0 2 67.3 0.000 67.3 0.3284 0.2377 0.3050 0.2787 4.664
28 26073 PUNTA DE AGUA SO DY 29 29 441.9 0 2 437.9 0.000 437.9 0.1219 0.0425 0.1835 -0.0290 0.94
29 26077 SAHUARIPA SO DY 28 28 701.4 0 2 709.6 0.000 709.6 0.1577 0.0295 0.1869 0.0661 0.74
30 26249 SANTA ROSA SO DY 25 25 311.8 0 2 316.9 0.000 316.9 0.1485 0.1991 0.1515 0.0345 0.72
31 26080 SAN BERNARDO SO DY 19 19 743.2 0 2 757.6 0.000 757.6 0.1148 0.0374 0.1896 0.1658 1.20
32 26082 SAN ISIDRO SO DY 22 22 162.2 0 2 157.1 0.000 157.1 0.2897 0.1840 0.1948 0.0635 2.86
33 26096 SONOITA SO DY 30 30 210.9 0 2 210.9 0.000 210.9 0.2493 0.1078 0.2269 0.1031 1.55
34 8142 TEMOSACHI CH DY 15 15 464.3 0 2 469.7 0.000 469.7 0.1372 0.0536 0.0709 -0.0866 0.27
35 26202 TEPACHE SO DY 23 23 516.5 0 2 526.3 0.000 526.3 0.1616 0.1007 0.0494 -0.0835 0.48
36 26099 TESOCOMA SO DY 30 30 764.4 0 2 764.4 0.000 764.4 0.1411 0.1034 0.1216 0.0206 0.16
37 26123 YECORA SO DY 29 29 945.1 0 2 940.8 0.000 940.8 0.1469 -0.0048 0.0954 -0.0963 0.56

-----
PONDERADA MEDIA VALORES ThetaZero L-CV L-SKEW L-KURT L-CINCO
0.000 0.169 0.115 0.150 0.034

```

Figura 7. Cálculo de la discordancia para las estaciones climatológicas del OC Noroeste.

El grado de homogeneidad en este trabajo coincidió con el área geográfica del OC Noroeste, y se basó en la media estadística H1 que Hosking y Wallis (1997) la definen como el estadístico que mide la variabilidad relativa, coeficiente de L-Variación (L-CV, en inglés), observado a partir de la muestra, y es utilizada para analizar la heterogeneidad en cada una de las regiones y subregiones homogéneas propuestas:



Heterogeneidad	Hosking y Wallis (1997)	Wallis et al (2007)
Homogénea	$H < 1$	$H < 2$
Posiblemente heterogénea	$1 < H < 2$	$2 < H < 3$
Heterogénea	$H > 2$	$H > 3$

Figura 8. Criterio de homogeneidad, Hosking y Wallis (1997 y 2007).

Selección de la función de distribución de probabilidad de mejor ajuste (FDP). Una vez corroborado que la región de estudio cumplía con la condición de homogeneidad, se determinó la distribución de probabilidad regional, esto basado en los ratios de los L-momentos regionales, de acuerdo con el estadístico Z^{DISTR} , también denominada medida de bondad de ajuste. Las funciones de distribución de probabilidad probadas de mejor ajuste fueron: Pareto Generalizada, Generalizada de Valor Extremo (GEV), Generalizada Normal (GNO), Pearson Tipo III (PE3), Generalizada Logística (GLO), Kappa y Gaucho. En el caso de distribución Gaucho, corresponde a la distribución Kappa de 4 parámetros, donde el segundo parámetro de forma (h) es tasado a un valor de 0.5.

```

***** 500 Simulaciones ****
GEN. NORMAL          L-KURTOSIS = 0.135   Z VALOR = -1.16  Aceptar
GEN. EXTREME VALUE   L-KURTOSIS = 0.134   Z VALOR = -1.23  Aceptar
PEARSON TYPE III     L-KURTOSIS = 0.127   Z VALOR = -1.66  Reject
GEN. LOGISTIC        L-KURTOSIS = 0.180   Z VALOR =  1.76  Reject
GAUCHO               L-KURTOSIS = 0.088   Z VALOR = -4.24  Reject
GEN. PARETO          L-KURTOSIS = 0.040   Z VALOR = -7.37  Reject

*****
**          PARAMETRO ESTIMACIONES          **
**  POR DISTRIBUCIONES ACEPTADO DE 90% NIVEL  **
***** 500 Simulaciones ****

          POSICION      ESCALA      FORMAL      FORMA2
GEN. NORMAL      0.9621      0.2919      -0.2557
GEN. EXTREME VALUE 0.8674      0.2598      0.7200E-01
KAPPA            0.8961      0.2275      0.9400E-02 -0.2133

```

Figura 9. Medidas de bondad de ajuste Z^{DIST} para las estaciones del OC Noroeste.

La función que mejor se ajustó fue la General de Valores Extremos, la General Normal y la función Kappa.

Determinación de cuantiles y la generación de la curva de crecimiento regional. La estimación de los cuantiles de la distribución regional o curva de crecimiento fue determinada a partir de los L-momentos y la distribución de mejor ajuste, donde, la distribución regional presenta una medida igual a 1, en tanto que la distribución de cuantiles en cada sitio puede ser estimada mediante la multiplicación de la curva regional por la precipitación media anual del sitio.



```

*****
**          PARAMETRO ESTIMACIONES          **
** POR DISTRIBUCIONES ACEPTADO DE 90% NIVEL **
***** 500 Simulaciones *****

      POSICION      ESCALA      FORMA1      FORMA2
GEN. NORMAL        0.9621      0.2919      -0.2557
GEN. EXTREME VALUE 0.8674      0.2598      0.7200E-01
KAPPA              0.8961      0.2275      0.9400E-02 -0.2133

QUANTILE ESTIMACIONES - REGIONAL CURVA DE CRECIMIENTO
=====
F(x) .002 .005 .010 .020 .050 .100 .200 .300 .400 .500 .600 .700 .800 .900 .950 .960 .980 .990 .995 .998 .999
=====

GEN. NORMAL
  0.37 0.41 0.45 0.50 0.57 0.64 0.74 0.82 0.89 0.96 1.04 1.13 1.24 1.40 1.56 1.61 1.75 1.89 2.03 2.20 2.34

GEN. EXTREME VALUE
  0.36 0.41 0.45 0.49 0.57 0.64 0.74 0.82 0.89 0.96 1.04 1.13 1.24 1.41 1.56 1.61 1.75 1.88 2.01 2.17 2.28

KAPPA
  0.31 0.37 0.42 0.48 0.57 0.65 0.75 0.82 0.89 0.96 1.04 1.12 1.23 1.40 1.56 1.61 1.77 1.92 2.07 2.27 2.42
  
```

Figura 10. Parámetros de las funciones de distribución y cálculo de cuantiles para el OC Noroeste.

Se precisa que la función de cuantiles de la variable aleatoria X , asociada a un evento específico en análisis (en nuestro ejemplo, el cuantil de interés corresponde a una precipitación anual del 50% de la precipitación media anual), es función de la curva de crecimiento regional y de un factor de escala.

En el cuadro 1 se presentan los principales parámetros estadísticos que reproducen el comportamiento de la distribución regional y que aplicado a la función probabilística se puede obtener el cuantil correspondiente.

Cuadro 1. Parámetros estadísticos de las funciones de distribución regional aplicada al OC. Noroeste.

Región	Distribución	Localización (ξ)	Escala (α)	Forma (κ)	Forma (κ)
Noroeste	Normal				
	Generalizado	0.9621	0.2919	-0.2557	
	GVE	0.8674	0.2598	0.072	
	Kappa	0.8961	0.2275	0.094	-0.2133

Ponderación a escala municipal del cuantil del 50 por ciento de probabilidad de ocurrencia de los valores de precipitación media anual de las estaciones. Las series históricas de datos de precipitación media anual de las estaciones del OC Noroeste fueron afectadas por el cuantil del 50% de probabilidad de ocurrencia, y cuyos valores sirvieron para trazar isoyetas en un plano a escala municipal de cuantiles, obteniendo un solo valor de precipitación por municipio y que representó el umbral o nivel de truncamiento.

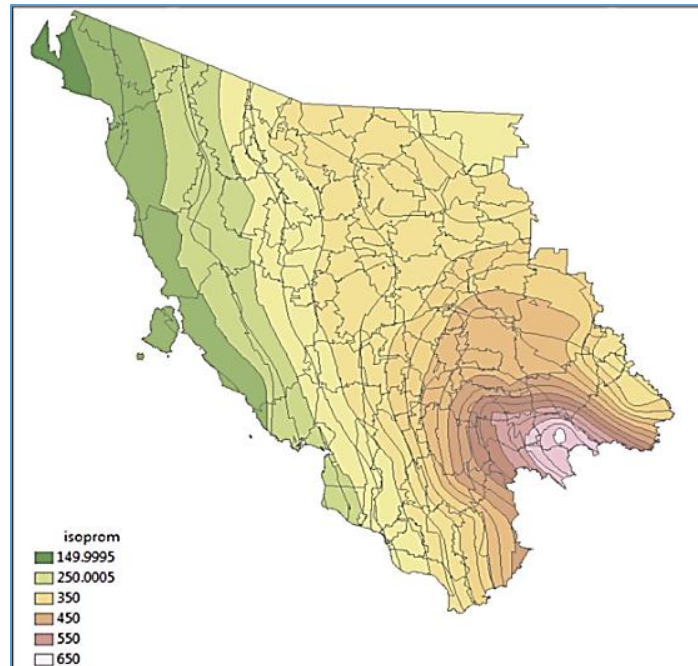


Figura 11. Ponderación a través de isoyetas del cuantil del 50 por ciento de probabilidad de la precipitación media anual a escala municipal.

Etapa 4. Estimación de los periodos secos a escala municipal usando como umbral o nivel de truncamiento el cuantil del 50 por ciento de probabilidad de ocurrencia.

Para ello, se calculó la serie de diferencias (D_t) de los datos históricos de precipitación a escala municipal (p) respecto al cuantil (50% probabilidad) regional (\bar{p}):

$$D_t = p - \bar{p} \quad (2)$$

Cuadro 2. Hoja de cálculo de la identificación de los periodos secos

Año	Hp(mm)	Umbral (mm)	Dt=Hp-Umbral	Identificar D o S	Año	Hp(mm)	Umbral (mm)	Dt=Hp-Umbral	Identificar D o S
1980	350.00	470.22	-120.22	D	1995	350.00	470.22	-120.22	D
1981	550.00	470.22	79.78	S	1996	450.00	470.22	-20.22	D
1982	450.00	470.22	-20.22	D	1997	650.00	470.22	179.78	S
1983	650.00	470.22	179.78	S	1998	350.00	470.22	-120.22	D
1984	650.00	470.22	179.78	S	1999	550.00	470.22	79.78	S
1985	550.00	470.22	79.78	S	2000	650.00	470.22	179.78	S
1986	650.00	470.22	179.78	S	2001	558.36	470.22	88.15	S
1987	450.00	470.22	-20.22	D	2002	450.00	470.22	-20.22	D
1988	391.00	470.22	-79.21	D	2003	450.58	470.22	-19.63	D
1989	550.00	470.22	79.78	S	2004	752.83	470.22	282.61	S
1990	650.00	470.22	179.78	S	2005	558.03	470.22	87.81	S
1991	750.00	470.22	279.78	S	2006	650.00	470.22	179.78	S
1992	550.00	470.22	79.78	S	2007	650.00	470.22	179.78	S
1993	750.00	470.22	279.78	S	2008	550.00	470.22	79.78	S
1994	550.15	470.22	79.93	S	2009	650.00	470.22	179.78	S

Etapa 5. Determinación de las características intrínsecas de la sequía. A través de una hoja de cálculo, Excel, se determinó el número de periodos secos, la duración, la periodicidad, el déficit acumulado anual y la intensidad (valor promedio del déficit). En el

cuadro 3 se presenta un ejemplo de cálculo, para un municipio cualquiera, de las características de la sequía para una estación climatológica.

Cuadro 3. Cálculo de las características de los períodos secos.

No Sequía	Duración (años)	Periodicidad (años)	Déficit acum (mm)	Intensidad (mm/año)
1	1	2	120.216	120.216
2	1	5	20.216	20.216
3	2	8	99.427	49.713
4	2	3	140.432	70.216
5	1	4	120.216	120.216
6	2		39.850	19.925
Media	1.500	4.400	90.060	66.750
Desv. Stan	0.548	2.302	48.668	45.558
CV	0.365	0.523	0.540	0.683

Tal práctica se realizó para los 95 municipios del OC Noroeste.

Etapas 6. Cálculo de las probabilidades de ocurrencia de los periodos de sequía (secos), con cierta duración de años. Se determinaron las magnitudes de las frecuencias absolutas observadas de las duraciones, y se hizo la práctica escogiendo el valor medio, mediana, moda y valor máximo. También se obtuvo un resumen del evento de sequía.

Cuadro 4. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia y detalles de la sequía.

Estadísticos de la serie anual		Probabilidad de ocurrencia		
MÁXIMOS	752.827	Duracion	Frecuencia	Probabilidad
MÍNIMOS	350.000	0	8	
MEDIA	558.699	1	3	50
MEDIANA	550.075	2	3	50
DESV. ESTÁNDAR	118.054			
COEF. ASIMETRÍA	-0.237			
COEF. KURSIS	-0.738			
COEF. VARIACIÓN	0.211			
UMBRAL=MEDIA	558.699			
RESUMEN				
SI CV =>0.3 SE ESPERAN VARIOS PERIODOS DE SEQUIA				
NÚMERO DE PERIODOS SECOS	6			
PERIODO CON DÉFICIT PROM (años)	4.4			
DURACIÓN PROMEDIO ESPERADA (años)	1.5			
DÉFICIT MÁXIMO REGISTRADO (mm)	140.43			
INTENSIDAD CORRESPONDIENTE AL DÉFICIT MÁXIMO (mm/año)	70.22			
DESV. RESPECTO A LA LLUVIA MEDIA ANUAL (%)	12.57			
LÁMINA DISPONIBLE PROMEDIO ANUAL ANTE EL DÈFICIT (mm)	488.48			
INTENSIDAD MÁXIMA REGISTRADA (mm/año)	120.22			
LÁMINA DISPONIBLE PROMEDIO ANUAL (mm)	438.48			
DESV. RESPECTO A LA LLUVIA MEDIA ANUAL	78.48			
DÉFICIT ACUMULADO PROMEDIO (mm)	84.03			
INTENSIDAD PARA LA DURACIÓN PROMEDIO (mm/año)	66.75			
LÁMINA DISPONIBLE PROMEDIO ANUAL (mm)	491.95			
% LÁMINA DISPONIBLE PROM POR ABAJO DE LA MEDIA ANUAL	11.95			

Etapa 7. Mapeo de la probabilidad de ocurrencia de sequía meteorológica en el OC Noroeste. Finalmente, para observar la representación espacial de los resultados obtenidos en los procesos anteriores, se elaboraron los mapas de probabilidad de ocurrencia de sequía meteorológica a escala municipal, mediante el uso del programa ArcMap del paquete ArcGis Desktop versión 10.4 de Esri®.

Resultados y Discusión

Del cálculo de la probabilidad de ocurrencia de la sequía en el OC Noroeste de México, a partir de series históricas de 30 años, 1980-2009, en una escala municipal y usando un método regional de frecuencia con un cuantil del 50% de probabilidad con tal de establecer la lámina de lluvia que sirviera de umbral para definir los periodos secos (déficit) o húmedos (superávit), se obtuvo el valor medio, la mediana, la moda y el máximo de esas probabilidades de ocurrencia; siendo la mediana y la moda lass que mejor representan la variabilidad climática.

Tomando los valores de la mediana de las probabilidad de ocurrencia, del cuadro 5, el 6.32 por ciento de los municipios presentan sequía muy alta, 26.32 por ciento es con sequía alta, el 13.68 por ciento es con sequía media, y el 38.95 por ciento presentan sequía baja, y solo el 14.74 por ciento es con sequía muy baja.

Cuadro 5. Áreas afectadas según la condición de la probabilidad de ocurrencia de los periodos secos a escala municipal del OC Noroeste.

Media			Mediana		
Clasificación	No Municipios	Área (km ²)	Clasificación	No Municipios	Área (km ²)
Muy baja	5	14,135.45	Muy baja	14	45,471.99
Baja	60	110,508.25	Baja	37	49,290.17
Media	0	0.00	Media	13	25,396.05
Alta	24	37,100.75	Alta	25	41,586.24
Muy alta	6	37,037.96	Muy alta	6	37,037.96
Moda			Máxima		
Clasificación	No Municipios	Área (km ²)	Clasificación	No Municipios	Área (km ²)
Muy baja	20	55,915.79	Muy baja	18	24,156.94
Baja	25	31,019.39	Baja	30	57,898.58
Media	19	33,223.02	Media	15	21,268.60
Alta	25	41,586.24	Alta	12	21,267.84
Muy alta	6	37,037.96	Muy alta	20	74,190.43

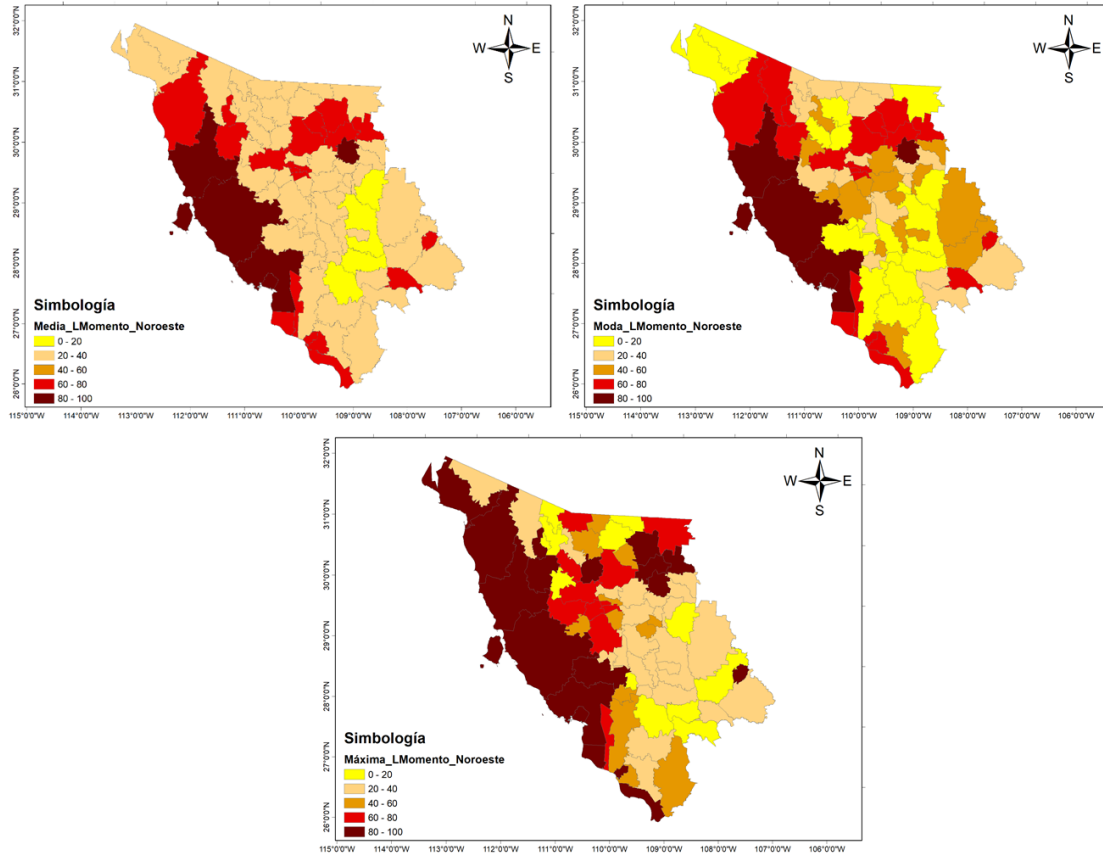


Figura 12. Mapa de amenaza o probabilidad de ocurrencia de sequía meteorológica a escala municipal en el OC Noroeste.

Por mencionar, los principales municipios con el mayor riesgo de sequía son Guaymas, Hermosillo, Pitiquito, Caborca, principalmente toda la franja que colinda con el Golfo de California.

El mapa de la figura 12 es importante ya que representa la amenaza o probabilidad de ocurrencia de una sequía meteorológica a escala municipal y forma parte de los componentes para construir mapas de riesgo; donde Ortega-Gaucin *et al.*, (2018a) define el riesgo como el producto de la probabilidad de ocurrencia por la vulnerabilidad ante la sequía.

Conclusiones

Es importante contar con metodologías robustas para calcular índices de peligro así como de vulnerabilidad de sequía a escala municipal como herramientas adecuadas y probadas de gestión integrada del riesgo de sequía en México, abonando con ello en la disposición de información pertinente para la formulación de políticas públicas que lleven a una gestión apropiada del riesgo en cada uno de los Organismos de Cuenca del país.



La metodología presentada, análisis regional de frecuencia (ARF) usando L-Momentos, es una herramienta alternativa, con mayor precisión y robustez para definir el umbral o nivel de truncamiento al analizar el peligro o amenaza por sequía meteorológica.

Por ser un método regional, se adapta a sitios con un número limitado de estaciones climatológicas, así como aquellas que cuentan con escaso registro de información.

Permite definir a la unidad de estudio en regiones homogéneas en cuanto a la distribución de la precipitación, con tal de evitar sesgo en los resultados por efectos orográficos o de otra índole, que alteren los resultados.

En este trabajo se pudo delimitar los municipios que mayor riesgo tienen de presentar sequía, tal como se puede ver a través del mapa de amenaza, donde en el caso del Noroeste queda bien definida la zona con mayor probabilidad de sequía, la franja paralela al océano Pacífico.

Agradecimientos

Agradecemos al Fondo de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, el apoyo brindado a través del proyecto TH1705.F para la realización de este trabajo.

Referencias Bibliográficas

Báez P. R., Prieto. V. D, y Aroche R. R. (2016). Estudio de Aplicación del Análisis Regional de Frecuencias Basado en L-Momentos al Caso de las Precipitaciones Anuales en la Provincia de Camagüey, Cuba. *Revista Brasileira de Meteorología*, 31(4): 539-545.

Comisión Nacional del Agua. (2015). *Estadísticas del Agua en México 2015*. México, Distrito Federal.

Franklin Paredes, Freddy La Cruz y Edilberto Guevara. (2014). Análisis regional de frecuencia de las sequías meteorológicas en la principal región cerealera de Venezuela. *Bioagro*, 26 (1): 21-28.

Fuchs, B. A., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Hayes, M. J. (2014). Drought indices for drought risk assessment in a changing climate. Chapter 12 (pp. 217-231) In: Eslamian, S. (ed.). *Handbook of Engineering Hydrology. Modeling, Climate Change and Variability*. Boca Raton, USA: CRC Press.

Hosking, J.R.M.; Wallis, J.R. (1997). *Regional Frequency Analysis: an approach based on L-moments*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2013). *Extractor Rápido de Información climatológica v. 3.2 (ERIC III)*. Base de datos y software. Jiutepec, México.



McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to times scales. 8th. Conference on Applied Climatology (pp. 179 - 184), Anaheim, California, United States of America.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2): 202-216.

Núñez, J. C. (2010). Guía Metodológica para la Aplicación del Análisis Regional de Frecuencia de Sequías basado en L-momentos y Resultados de Aplicación en América Latina. Documento Técnico PHI-LAC, N° 27.

Ortega-Gaucin, D., J. De la Cruz B. y H.V. Castellano B. (2018a). Drought vulnerability indices in Mexico. *Water*, 10 (1671):1-32.

Ortega-Gaucin, D., J. De la Cruz B. y H.V. Castellano B. (2018b). Peligro, vulnerabilidad y riesgo por sequía en el contexto de cambio climático en México. En: R. Lobato y A. Pérez (Eds.). *Agua y cambio climático*: 80-105. Jiutepec, Mor.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7): 1696-1718.

Vogel, R. and M. Fennessey. (1993). L-moments diagrams should replace moment product diagrams. *612 Water Resources Research*.

Wallys, J., M. Schaefer, B. Barrer and G. Taylor. (2007). Regional precipitation-frequency 615 analysis and spatial mapping for 24-hour and 2-hour durations for Washington States. *Hydrol. Earth Syst. 616 Sci.*, 11(1): 415-442.