

Estimación Estadística Actualizada de la *PMP* en el estado de San Luis Potosí, México
Updating Statistical Estimate of the *PMP* in the state of San Luis Potosi, Mexico

Daniel Francisco Campos Aranda¹

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, campos_aranda@hotmail.com

Autor para correspondencia: Daniel Francisco Campos Aranda, campos_aranda@hotmail.com

Resumen

Cuando la falla de una obra hidráulica implica un alto riesgo de pérdida de vidas humanas y/o daños materiales catastróficos, su dimensionamiento hidrológico se realiza con la creciente máxima probable (CMP). La CMP se estima con base en la precipitación máxima probable (PMP), que implica el límite superior físicamente posible de ocurrir de una cierta duración, en una cuenca de una determinada región geográfica. Los métodos estadísticos de Hershfield y el probabilístico de Koutsoyiannis son los procedimientos más simples de estimación de la PMP, pero al estar basados en los datos máximos observados de precipitación, son aproximados y recomendados sólo para estudios preliminares. En este trabajo se aplican ambos métodos citados, a las 100 series de precipitación máxima diaria (PMD) anual, de más de 40 valores, disponibles en el estado de San Luis Potosí, México. Al probar la calidad estadística de estos 100 registros se encontró que nueve presentan persistencia y tres tienen tendencia lineal significativa; por ello, fueron corregidos. Con base en las distribuciones Log-Pearson tipo III y General de Valores Extremos se obtuvo la predicción de PMD de periodo de retorno 10000 años, designada P_{Tr} . Se evaluaron dos cocientes: PMP/P_o y PMP/P_{Tr} , siendo P_o el valor máximo observado de la PMD en el registro; sus valores representativos son 3.50 y 1.45, los cuales

permiten hacer estimaciones rápidas de la *PMP* en 24 horas. Con base en las 100 localidades del estado de San Luis Potosí que ahora cuentan con la estimación de *PMP*, en 24 horas se podrán realizar estimaciones en sitios de interés, por transporte ponderado de valores cercanos y en cuencas bajo estudio, con la técnica de las isoyetas o de los polígonos de Thiessen. Por último, se recomienda realizar este tipo de estudios y/o sus actualizaciones en otros estados o regiones de México.

Palabras clave: precipitación máxima diaria anual, precipitación máxima probable, pruebas estadísticas, persistencia, tendencia, distribución Log-Pearson tipo III, distribución GVE, error estándar de ajuste, ajuste por momentos L de orden mayor.

Abstract

When the failure of a hydraulic work involves a high risk of human losses and/or catastrophic material damages, its hydrological sizing is done with the probable maximum flood (PMF). The PMF is estimated based on the probable maximum precipitation (PMP), which takes into account the upper physically possible limit than can occur with certain duration within a basin of a particular geographic region. Hershfield statistical method and Koutsoyiannis probabilistic method are the simplest procedures to estimate the PMP; however, being based on the maximum observed precipitation data, their results are approximate and recommended exclusively for preliminary studies. In this study the above mentioned methods were applied to the 100 series of annual maximum daily precipitation (MDP) of over 40 values, available in the state of San Luis Potosi, Mexico. Statistical quality tests of these 100 records showed that nine records have persistence and three have a significant linear trend; therefore, they were corrected. Based on the Log-Pearson Type III and General Extreme Values distributions, a *MDP* prediction of the 10000 years return period was obtained, designated P_{Tr} . Two ratios were evaluated: PMP/P_o and PMP/P_{Tr} , being P_o the maximum observed value of *MDP* in the record. Their representative values are 3.50 and 1.45, respectively, which allow making quick estimations of *PMP* in 24 hours. The availability of estimated *PMP* in 24 hours of 100 locations in the state of San Luis Potosi allow further estimations such as weighted transport of nearby values; whereas in basins under study, the techniques of isohyets or Thiessen polygons can be used. As a conclusion, it is recommended to carry out this study and/or its updates in other states or regions of Mexico.

Keywords: Annual maximum daily precipitation, probable maximum precipitation, statistical tests, persistence, trend, log-Pearson Type III distribution, GEV distribution, standard error of fit, fit by higher order L moments.

Recibido: 12/09/2016

Aceptado: 26/04/2018

Introducción

Definiciones

Cuando la falla de una obra hidráulica, por su tamaño y/o ubicación, implica un altísimo riesgo de pérdida de vidas humanas y daños materiales catastróficos, se debe dimensionar de manera hidrológica para dar paso seguro a la creciente máxima probable (CMP), la cual se origina por la combinación más severa de condiciones críticas meteorológicas e hidrológicas que son razonablemente posibles de ocurrir en una cierta región y cuenca específica. Con la CMP se dimensionan los vertedores de los grandes embalses, pero algunas veces, en ciertas obras hidráulicas se recomienda brindar un alto grado de seguridad, como en los diques de protección de las centrales nucleares y en la ubicación de servicios públicos y/o plantas de tratamiento de aguas, por arriba del nivel que define la CMP. La adopción de la CMP en el diseño está orientada a eliminar la posibilidad de la falla repentina de la obra hidráulica en una zona con problemas críticos de inundación (Linsley, Kohler & Paulhus, 1988; Chow, Maidment & Mays, 1988; Gupta, 2008).

La estimación de la CMP se realiza con base en la precipitación máxima probable (PMP), la cual se definió como (WMO, 1973): *la mayor cantidad de precipitación meteorológicamente posible, que corresponde a una determinada duración en una cuenca dada y en una época del*

año, sin tener en cuenta las tendencias climáticas de largo plazo. La exactitud en la evaluación de la *PMP* depende, de manera fundamental, de la cantidad y calidad de los datos meteorológicos disponibles, para su aplicación en los diversos métodos de estimación. En la versión más reciente del manual de estimación de la *PMP* de la World Meteorological Organization de 2009, se corrigió la parte final de la definición anterior para indicar que en tal estimación se deben tomar en cuenta las condiciones meteorológicas modernas (Jakob, 2013).

Los métodos de estimación de la *PMP* son de dos tipos diferentes: los meteorológicos y los estadísticos. Los primeros utilizan las tormentas severas ocurridas, las cuales se maximizan y los segundos son de tipo empírico, basados en procedimientos desarrollados a partir de los datos máximos observados. Por ejemplo, la precipitación máxima diaria (*PMD*) anual. La ventaja fundamental de los métodos estadísticos es su simplicidad y el no requerir datos de humedad relativa y/o velocidad del viento; pero son recomendados sólo para cuencas pequeñas y medianas y para estudios de factibilidad o estimaciones preliminares (Jakob, 2013; Salas, Gavilan, Salas, Julien & Abdullah, 2014).

Objetivo

El objetivo de este estudio consistió, como se indica en su título, en **actualizar** el trabajo realizado con datos de *PMD* anual hasta el año de 1994, sobre la estimación de la *PMP* en el estado de San Luis Potosí, México (Campos-Aranda, 1998). Esta actualización contiene cuatro aspectos fundamentales: 1) comprende más de 20 años de registro en algunas estaciones pluviométricas y se procesan únicamente series con 40 o más valores; 2) además del método estadístico de Hershfield, se aplica el criterio probabilístico de Koutsoyiannis para estimar la *PMP*, adoptando el valor mayor de ambos resultados; 3) se aplican las distribuciones Log-Pearson tipo III y General de Valores Extremos (*GVE*) para estimar la predicción de periodo de retorno 10 000 años, esta última también ajustada con la técnica de los momentos *L* de orden mayor; y 4) no se eliminan series de *PMD* que no resultaron aleatorias y/o estacionarias, sino que se corrigen y procesan de manera probabilística registros con persistencia o con tendencia. Se presentan

de forma exhaustiva los resultados numéricos obtenidos en las 100 estaciones pluviométricas procesadas del estado de San Luis Potosí, México, dividido según sus tres zonas geográficas: Altiplano potosino, Zona media y Región huasteca.

Datos y Métodos aplicados

Registros pluviométricos procesados

Toda la información analizada procede de los archivos contenidos en el programa Excel, que tiene la Dirección Local San Luis Potosí, de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), de estaciones pluviométricas agrupadas en las tres zonas geográficas del estado: Altiplano Potosino (**AP**), Zona Media (**ZM**) y Región Huasteca (**RH**). Las series de datos procesados corresponden a la variable climática *precipitación máxima diaria (PMD) anual* en milímetros, con un *mínimo de 40 valores* en cada registro; lógicamente, sin contar años faltantes o incompletos. Bajo tal condición se encontraron, 25, 28 y 47 estaciones pluviométricas en cada región geográfica citada, cuyas características generales se exponen en el Cuadro 1; su localización geográfica se tiene en la Figura 1.

Verificación de valores extremos

En cada serie de PMD anual procesada se detectaron sus valores extremos máximos y mínimos, por lo general de 1 a 3 datos de cada tipo y se procedió al siguiente análisis. Por lo general, se encontró que los valores mínimos se asocian con los años incompletos, entonces, cuando los meses faltantes ocurrieron en el lapso de mayo a octubre (época de lluvias), tales magnitudes anuales se eliminaron. El criterio

anterior puede favorecer la eliminación de datos mínimos, pero ello se consideró aceptable en un estudio de estimación de predicciones extremas máximas.

Con respecto a los valores extremos máximos se solicitó a la CONAGUA su verificación; entonces tales magnitudes fueron ratificadas o corregidas, contra los datos de campo (*expediente de la estación*). Por ejemplo, en Santo Domingo (AP), el valor de mayo de 1993 de 185.0 mm fue ratificado y en Guadalupe (ZM) su máximo de 282.0 mm en junio de 2000, fue cambiado a un valor de 33.0 mm. Cuando la CONAGUA no contó con el expediente de tal estación pluviométrica, se siguió el siguiente procedimiento operativo, para los valores máximos no ratificados. Primero se verificó su posibilidad física de ocurrencia, la cual se aceptó para magnitudes menores a su precipitación mensual respectiva. Cada dato máximo que resultó mayor a su correspondiente lluvia mensual, es erróneo y se eliminó, seleccionando el siguiente máximo de tal año.

Cuando el dato máximo investigado fue posible, se obtuvo su porcentaje con respecto a la lluvia mensual, y tal magnitud se comparó con los cocientes máximos observados en las estaciones pluviométricas cercanas, si resultó semejante o menor se aceptó tal valor y si fue superior se eliminó y buscó el segundo evento del año. Por ejemplo, en Los Pilares (AP), el valor de 492 mm de junio de 1989 fue descartado, ya que su porcentaje del 87.7 de la lluvia mensual es muy superior a los máximos observados en las estaciones cercanas de Arista y Mexquitic. Por suerte, la CONAGUA verificó contra expediente la mayoría de los eventos máximos de las estaciones de la región huasteca.

En las columnas 5 y 6, de la Tabla 1 se indican los valores máximos de los registros simultáneos procesados en el estudio de PMP, de San Luis Potosí, realizado con datos considerando hasta el año de 1994 (Campos-Aranda, 1998) y el que se expone en este trabajo que incluye datos hasta el año 2015. Lógicamente, al ampliarse 20 años un registro de PMD anual, lo más probable que ocurra es que su valor máximo se eleve y por ello, en esta comparación se detectan ocho *anomalías* en las estaciones El Peaje, Vanegas, Venado y Villa de Ramos del Altiplano Potosino y en Ciudad del Maíz, Col. Álvaro Obregón, Lagunillas y Pedro Montoya de la Zona Media. Tales anomalías se deben al uso en el estudio de 1998, de información impresa, tomada de los Boletines Climatológicos publicados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, que no está incluida en el archivo de Excel de la CONAGUA.

En la mayoría de las estaciones de la Región Huasteca, sus valores máximos coinciden, o bien son mayores en los registros actualizados.

Tabla 1. Características generales, estadísticas y resultados de las pruebas de homogeneidad, en las series de PMD de las 100 estaciones pluviométricas indicadas del estado de San Luis Potosí, México.

No.	Estación:	Alt. ¹	n ²	máx ³	Máx ⁴	Med ⁵	(r ₁) ⁶	Pruebas estadísticas ⁷						
								VN	PA	PS	TK	TS	PC	PB
1 (AP)	Arista	1560	41	-	238.0	39.0	0.540	NH	NH	NH	H	H	H	NH
2 (AP)	Cedral	1709	66	158.2	315.8	38.2	0.060	H	H	H	H	H	H	NH
3 (AP)	Charcas	2126	54	-	117.0	45.0	-0.073	H	H	H	H	H	H	H
4 (AP)	El Grito	1850	45	86.0	101.0	44.5	-0.261	H	H	H	H	H	H	H
5 (AP)	El Mezquite	1631	48	-	90.0	41.0	0.080	H	H	NH	H	H	H	H
6 (AP)	El Peaje	2101	49	131.0	86.5	40.0	-0.061	H	H	H	H	H	H	H
7 (AP)	La Maroma	1900	50	80.0	140.1	40.5	-0.063	H	H	H	H	H	H	H
8 (AP)	La Presa	1660	40	77.6	85.0	49.5	0.036	H	H	H	H	H	H	H
9 (AP)	Los Filtros (SLP)	1904	66	66.5	111.0	41.7	-0.088	H	H	H	H	H	H	H
10 (AP)	Los Pilares	1675	47	81.5	81.5	44.5	0.206	H	H	NH	NH	NH	H	H
11 (AP)	Matehuala	1630	54	122.0	200.0	56.1	-0.195	H	H	H	H	H	H	NH
12 (AP)	Mexquitic	1749	72	74.0	107.0	47.5	0.137	H	H	H	H	H	H	H
13 (AP)	Moctezuma	1728	41	149.0	210.0	41.5	-0.105	H	H	H	H	H	H	NH
14 (AP)	Palo Blanco	1358	48	72.0	72.0	37.0	0.157	H	H	H	H	H	H	H
15 (AP)	Peñón Blanco	2099	57	-	235.0	39.0	-0.130	H	H	H	H	H	H	NH
16 (AP)	Presa de Gpe.	1173	42	70.0	121.4	41.6	-0.194	H	H	H	H	H	H	H
17 (AP)	Reforma	2043	48	-	97.5	44.1	-0.050	H	H	H	H	NH	H	H
18 (AP)	S.M. del Refugio	2068	49	63.1	63.1	27.0	0.010	H	H	NH	H	H	H	H
19 (AP)	Santiago	2128	46	-	100.1	40.0	-0.224	H	H	H	H	H	H	H
20 (AP)	Santo Domingo	1415	52	-	270.0	49.8	0.159	H	H	H	H	H	H	NH
21 (AP)	Soledad	1849	56	129.5	240.0	36.3	0.156	H	H	NH	H	H	H	NH
22 (AP)	Vanegas	1746	50	77.0	90.0	34.3	-0.083	H	H	H	H	H	H	H
23 (AP)	Venado	1742	51	230.0	200.0	41.5	0.158	NH	H	NH	H	H	H	NH
24 (AP)	Villa de Arriaga	2170	46	160.0	204.5	38.6	0.117	H	H	H	H	H	H	NH
25 (AP)	Villa de Ramos	2223	43	100.0	90.0	38.0	0.345	NH	NH	NH	H	H	H	H
26 (ZM)	A.de los Infante	1636	52	135.5	133.0	48.0	0.062	H	H	H	H	H	H	H
27 (ZM)	Cárdenas	1353	61	180.5	180.5	53.5	-0.086	H	H	H	H	H	H	H
28 (ZM)	Cerritos	1178	50	104.5	140.0	67.3	-0.305	H	NH	H	H	H	H	H
29 (ZM)	Cd. del Maíz	1248	45	350.0	232.3	40.0	-0.010	H	H	H	NH	NH	H	H
30 (ZM)	Col. Á. Obregón	1146	48	254.0	182.0	40.4	0.091	H	H	NH	H	H	H	H
31 (ZM)	Guadalcázar	1672	52	125.5	185.6	54.5	0.222	NH	NH	NH	NH	NH	H	NH
32 (ZM)	Lagunillas	908	53	240.5	210.0	75.0	0.004	H	H	H	H	H	H	H
33 (ZM)	La Salitrera	1890	43	90.5	200.0	45.0	0.085	H	H	H	H	H	H	NH
34 (ZM)	Nogal Oscuro	1045	47	128.5	128.5	61.2	-0.089	H	H	H	H	H	H	H

35 (ZM)	Ojo Caliente	1789	48	76.1	76.1	38.8	0.104	H	H	H	H	H	H	NH
36 (ZM)	Ojo de Agua	1148	52	300.2	300.2	80.0	0.011	H	H	H	H	H	H	NH
37 (ZM)	Ojo de A. Seco	1077	51	162.0	172.5	62.0	-0.122	H	H	H	H	H	H	H
38 (ZM)	Paredes	1079	50	160.0	195.0	61.0	-0.063	H	H	NH	H	H	H	NH
39 (ZM)	P. de S. Antonio	1246	52	190.0	200.0	64.6	-0.010	H	H	H	H	H	H	NH
40 (ZM)	Pastora	1022	51	95.0	160.0	48.5	0.118	H	H	NH	H	H	H	NH
41 (ZM)	Pedro Montoya	902	43	176.0	165.5	62.0	0.015	H	H	H	H	H	H	H
42 (ZM)	Presa A.Obregón	1030	47	269.7	269.7	43.0	0.144	H	H	NH	H	H	H	NH
43 (ZM)	Rayón	1258	51	157.0	330.0	66.5	-0.065	H	H	H	H	H	H	NH
44 (ZM)	Río Verde	987	52	117.5	126.3	52.3	0.007	H	H	H	H	H	H	H
45 (ZM)	San Francisco	1066	50	86.5	135.0	42.0	-0.093	H	H	H	H	H	H	H
46 (ZM)	S.J.Albuquerque	1863	50	126.5	126.5	50.0	-0.020	H	H	H	H	H	H	H
47 (ZM)	S. N. Tolentino	1470	52	130.0	130.0	59.0	0.286	NH	NH	NH	H	H	H	H
48 (ZM)	S. Ma. del Río	1749	44	110.0	115.0	42.0	-0.063	H	H	H	H	H	H	NH
49 (ZM)	Tierra Nueva	1778	51	70.0	93.0	36.1	0.149	H	H	NH	H	H	H	H
50 (ZM)	Vigas	1786	51	213.0	213.0	54.0	0.008	H	H	H	NH	NH	NH	H
51 (ZM)	Villa de Reyes	1828	44	150.0	200.0	46.3	-0.102	H	H	H	H	H	H	NH
52 (ZM)	Villa Juárez	1144	52	153.0	153.0	65.5	0.124	H	H	NH	H	NH	H	H
53 (ZM)	Zaragoza	1968	50	64.0	97.0	34.5	0.249	NH	NH	NH	H	H	H	H
54 (RH)	Abritas	807	54	280.0	280.0	113.2	0.336	NH	NH	NH	NH	NH	NH	H
55 (RH)	Agua Buena	372	42	300.0	313.0	133.2	-0.069	H	H	H	H	H	H	H
56 (RH)	Altamira	54	52	246.0	401.0	132.2	0.215	NH	NH	H	H	H	H	NH
57 (RH)	Aquismón	68	55	350.0	370.0	142.0	0.162	H	H	NH	H	H	H	H
58 (RH)	Ballesmi	43	54	238.2	340.0	119.5	-0.028	H	H	H	H	H	H	H
59 (RH)	Chapulhuacanito	157	42	420.5	420.5	145.6	0.028	H	H	H	H	H	H	H
60 (RH)	Ciudad Santos	225	49	362.0	362.0	161.3	0.168	H	H	NH	H	H	H	H
61 (RH)	Damián Carmona	342	54	266.0	318.0	117.0	-0.218	H	H	H	H	H	H	NH
62 (RH)	Ébano	40	55	174.0	307.0	79.0	0.291	NH	NH	H	H	H	H	NH
63 (RH)	El Coco	66	49	155.5	320.0	85.2	0.219	H	NH	NH	H	H	H	H
64 (RH)	El Fiscal	80	44	275.5	275.5	94.1	-0.104	H	H	H	H	H	H	NH
65 (RH)	El Naranjo	275	57	310.5	310.5	108.0	0.016	H	H	H	H	H	H	H
66 (RH)	El Peñón	99	41	275.0	312.0	120.0	0.007	H	H	H	H	H	H	H
67 (RH)	El Pujal	51	58	332.2	332.2	112.6	0.177	H	H	H	NH	NH	NH	H
68 (RH)	El Salto	312	46	334.0	334.0	116.5	-0.079	H	H	H	H	H	H	H
69 (RH)	El Tigre	183	54	340.0	340.0	90.7	0.041	H	H	H	H	H	H	NH
70 (RH)	El Tulillo	80	43	180.5	270.3	80.0	0.200	H	H	H	H	H	H	NH
71 (RH)	Gallinas	283	55	440.7	500.0	134.0	0.003	H	H	H	H	H	H	NH
72 (RH)	Las Adjuntas	25	54	237.5	303.8	85.5	0.017	H	H	H	NH	NH	H	NH
73 (RH)	Maitínez	264	50	207.0	280.0	108.7	0.201	H	H	NH	H	H	H	H
74 (RH)	Micos	210	55	230.4	328.6	123.0	0.002	H	H	H	H	H	H	H
75 (RH)	Moritas	71	50	391.2	391.2	128.0	-0.088	H	H	H	H	H	H	NH
76 (RH)	Papagayos	914	52	190.0	380.0	99.9	0.028	H	H	H	H	H	H	NH
77 (RH)	Requetemu	126	58	420.1	654.0	146.1	0.070	H	H	H	H	H	H	NH

78 (RH)	San Dieguito	341	53	271.5	340.0	131.8	0.076	H	H	NH	NH	NH	H	NH
79 (RH)	San Felipe	100	43	325.9	325.9	120.0	0.402	NH	NH	NH	H	H	H	NH
80 (RH)	S. Juan del Meco	1278	54	297.5	297.5	86.0	-0.120	H	H	H	H	H	H	H
81 (RH)	S.Chalchicuautila	241	51	316.0	316.0	120.9	0.106	H	H	H	H	H	H	H
82 (RH)	San Vicente	29	44	323.2	323.2	95.5	0.042	H	H	H	H	H	H	NH
83 (RH)	Santa Cruz	67	55	240.0	340.0	140.0	0.079	H	H	NH	H	H	H	H
84 (RH)	Santa Rosa	96	54	294.8	618.4	113.6	-0.006	H	H	NH	H	H	H	NH
85 (RH)	Santiagoillo	38	43	298.2	298.2	120.0	0.257	NH	NH	NH	H	H	H	H
86 (RH)	Tamapatz	885	50	330.0	334.0	182.5	-0.073	H	H	H	H	H	H	H
87 (RH)	Tamuín	23	42	271.5	271.5	99.2	0.347	NH	NH	NH	H	H	H	H
88 (RH)	Tancuilín	100	54	411.4	411.4	140.4	-0.078	H	H	H	H	H	H	NH
89 (RH)	Tanlacut	296	40	443.7	443.7	117.2	-0.002	H	H	H	H	H	H	H
90 (RH)	Tanlajás	132	40	325.0	325.0	135.7	-0.053	H	H	H	H	H	H	H
91 (RH)	Tanlú	150	41	320.2	320.2	88.0	0.106	H	H	H	H	H	H	H
92 (RH)	Tanquián	87	52	370.0	370.0	92.1	-0.112	H	H	H	H	H	H	NH
93 (RH)	Tantizohuiche	40	52	426.0	426.0	118.0	0.083	H	H	NH	H	H	H	H
94 (RH)	Tansabaca	212	43	452.0	452.0	151.5	0.185	H	H	NH	H	H	H	H
95 (RH)	Temamatla	120	55	374.9	374.9	133.6	-0.118	H	H	H	H	H	H	H
96 (RH)	Tierra Blanca	168	54	371.2	371.2	126.9	-0.040	H	H	H	H	H	H	H
97 (RH)	Tlamaya	637	42	313.5	423.0	154.0	0.240	NH	NH	NH	H	H	H	H
98 (RH)	Velazco	50	49	178.0	340.0	80.0	0.240	NH	NH	NH	H	H	H	NH
99 (RH)	Veinte de Nov.	288	43	328.0	328.0	144.0	-0.200	H	H	H	H	H	H	H
100(RH)	Xilitla	630	51	420.0	420.0	163.0	-0.063	H	H	H	H	H	H	H

Simbología:

- 1 altitud en metros sobre el nivel del mar.
- 2 número de datos procesados (algunas veces igual al periodo de registro).
- 3 valor máximo de los registros utilizados en 1998, milímetros.
- 4 valor máximo de los registros actualizados, milímetros.
- 5 mediana, en milímetros.
- 6 coeficiente de correlación serial de orden uno, adimensional.
- 7 VN prueba de Von Neumann (H = homogénea y NH = no homogénea).
- PA prueba de Anderson.
- PS prueba de Sneyers.
- TK test de Kendall.
- TS test de Spearman.

PC prueba de Cramer.
PB prueba de Bartlett.

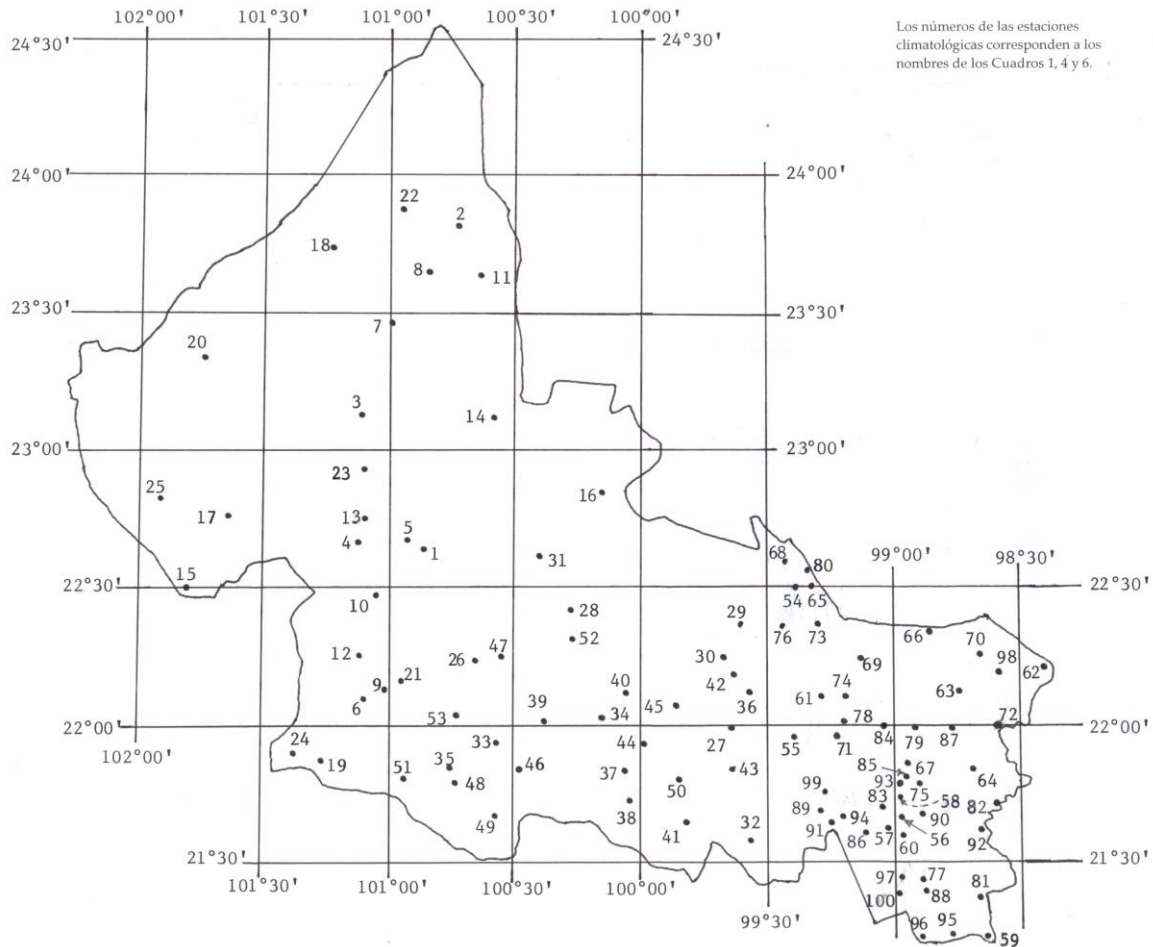


Figura 1. Localización geográfica de las 100 estaciones pluviométricas procesadas del estado de San Luis Potosí, México.

Pruebas de calidad estadística

Para que los resultados del análisis probabilístico de un registro de PMD anual conduzca a *predicciones confiables*, tales datos deben de proceder de un *proceso aleatorio estacionario*, lo cual implica, que no haya cambiado en el tiempo. Por lo anterior, la serie de *PMD* debe estar integrada por valores independientes, que estén libres de componentes determinísticas, para que tal registro sea homogéneo. Al utilizar sólo los valores anuales de *PMD*, se tiene la seguridad de que ellos serán independientes, pero pueden mostrar persistencia, tendencia, cambios en la media, o bien, variabilidad excesiva o escasa.

Para probar la *calidad estadística* de cada registro se aplicaron siete pruebas: 1) test de Von Neumann, es una prueba de no aleatoriedad contra componentes determinísticas no especificadas; 2) la prueba de Anderson detecta persistencia a través del coeficiente de correlación serial de orden 1; 3) la prueba de Sneyers, también de persistencia, es recomendada en registros que no son normales; 4) el test de Kendall detecta tendencia lineal; 5) el test de Spearman de tendencia, pero más general; 6) la prueba de Cramer permite comparar medias por subperiodos, y por último, 7) la prueba de Bartlett, que busca inconsistencia de la dispersión. La mayoría de las pruebas anteriores, se pueden consultar en WMO (1971); Kottegoda (1980); Linsley *et al.* (1988) y Machiwal y Jha (2008). En la Tabla 1 se concentraron los resultados de las siete pruebas citadas, todas aplicadas con un nivel de significancia (α) del 5% e indicando con *H* cuando la serie resultó homogénea y con *NH* cuando se detectó la componente determinística buscada por la prueba.

Test de Wald–Wolfowitz

Esta prueba no paramétrica ha sido utilizada por Bobée y Ashkar (1991), así como por Rao y Hamed (2000) para probar *independencia y estacionariedad* en registros de gastos máximos anuales (x_i) y por ello se presenta como complemento de las anteriores, ya que se probarán series de valores extremos (PMD). A. Wald y J. Wolfowitz basándose en el trabajo de R. L. Anderson sobre el coeficiente de correlación serial desarrollaron tal prueba, cuyo estadístico es (Meylan, Favre & Musy, 2012):

$$R = \sum_{i=1}^{n-1} x_i \cdot x_{i+1} + x_n \cdot x_1 \quad (1)$$

Cuando el tamaño (n) de la serie o muestra (x_i) no es pequeño y sus datos son independientes, R procede de una distribución Normal con media y varianza, dadas por las expresiones siguientes:

$$E[R] = \bar{R} = \frac{S_1^2 - S_2}{n-1} \quad (2)$$

$$Var[R] = \frac{S_2^2 - S_4}{n-1} + \frac{S_1^4 - 4 \cdot S_1^2 \cdot S_2 + 4 \cdot S_1 \cdot S_3 + S_2^2 - 2 \cdot S_4}{(n-1)(n-2)} - \bar{R}^2 \quad (3)$$

en las cuales:

$$S_k = \sum_{i=1}^n x_i^k \quad (4)$$

Finalmente, se calcula U , con la ecuación:

$$U = \frac{R - \bar{R}}{\sqrt{Var[R]}} \quad (5)$$

El valor de U sigue una distribución normal con media cero y varianza unitaria y se puede usar para probar la independencia de los datos de la serie con un nivel de significancia α , por lo general del 5%. En una prueba de dos colas la variable normal estandarizada es $Z_{\alpha/2} = 1.96$; entonces, cuando $|U| < 1.96$ la serie está integrada por valores independientes.

Método estadístico de David M. Hershfield

Es un procedimiento que permite estimar la precipitación máxima probable (PMP) de 24 horas de duración o menor, el cual se puede

consultar en: Hershfield (1961, 1965), WMO (1973) y Campos-Aranda (1998). Está basado en la fórmula general del análisis de frecuencia hidrológico, propuesta a inicios de los años sesenta por Chow (1964):

$$X_{Tr} = \bar{x}_n + K \cdot S_n \quad (6)$$

Donde, X_{Tr} es la *predicción* buscada correspondiente al periodo de retorno (Tr) en años, \bar{x}_n y S_n son la media y la desviación estándar de la serie de datos disponibles de tamaño n y K es el llamado *factor de frecuencia*, una variable que depende de la función de distribución de probabilidades (FDP), utilizada y de la probabilidad asociada al Tr .

Hershfield (1961, 1965) procesó 2 645 estaciones pluviométricas, 90% de ellas en U.S.A., las cuales abarcaron un total de 95 000 estaciones-años de registros de precipitación máxima anual en 24 horas y en otras duraciones menores, para establecer una *relación mundial* de valores máximos de K contra \bar{x}_n , al aplicar la ecuación (1) con X_{Tr} como el dato máximo observado. En el procedimiento de Hershfield, \bar{x}_n y S_n primero se corrigen por evento máximo observado (x_{max}) y por longitud de registro (n); calculándose para la primera corrección, la media (\bar{x}_{n-m}) y desviación estándar (S_{n-m}) sin el dato máximo del registro.

Para que la precipitación diaria, medida a las ocho de la mañana, corresponda a la de 24 horas de duración se debe multiplicar por 1.13 (Weiss, 1964). Esta corrección también se aplica a la PMP diaria para obtener la de duración 24 horas.

Método probabilístico de Demetris Koutsoyiannis

Koutsoyiannis (1999) demuestra que los datos procesados y publicados por Hershfield (1961, 1965) sobre PMD anual no soportan la hipótesis de que existe un límite superior físico para la PMP y entonces, el tratamiento probabilístico de los datos debe ser más consistente. Usando los mismos datos que D. M. Hershfield, encuentra que su estimación estadística de la PMP, se puede obtener aplicando la distribución GVE con un parámetro de forma (k) definido con una

función lineal del valor medio anual (\bar{x}_n) de la serie de *PMD* en milímetros y un periodo del retorno del orden de los 60 000 años. La función citada es (Koutsoyiannis, 1999):

$$k = -0.183 + 0.00049 \cdot \bar{x}_n \quad (7)$$

En este método probabilístico se obtienen los parámetros de escala (β) y ubicación (u) a través del método de momentos, con base en los valores de \bar{x}_n y S_n de la ecuación (6), según las expresiones siguientes (NERC, 1975, Raynal-Villaseñor, 1984):

$$y = \Gamma(1 + k) \quad (8)$$

$$\text{var}(y) = \Gamma(1 + 2 \cdot k) - [\Gamma(1 + k)]^2 \quad (9)$$

$$B = \sqrt{(S_n)^2 / \text{var}(y)} \quad (10)$$

$$A = \bar{x}_n - B \cdot (y) \quad (11)$$

$$\beta = B \cdot |k| \quad (12)$$

$$u = A + B \quad (13)$$

Para la estimación de la función gamma se utilizó la fórmula de Sterling, expuesta por Davis (1972):

$$\Gamma(\varepsilon) \cong e^{-\varepsilon} \cdot \varepsilon^{\varepsilon-1/2} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot \left(1 + \frac{1}{12 \cdot \varepsilon} + \frac{1}{288 \cdot \varepsilon^2} - \frac{139}{51840 \cdot \varepsilon^3} - \frac{571}{2488320 \cdot \varepsilon^4} + \Lambda \right) \quad (14)$$

Finalmente, el valor buscado de la PMP diaria se estima con la ecuación de la solución inversa [$x(F)$] de la función de distribución de probabilidades [$F(x)$] del modelo GVE, que es la siguiente (Hosking & Wallis, 1997):

$$x(F) = u + \frac{\beta}{k} \left[1 - (-\ln F)^k \right] \quad (15)$$

en la cual, F es la probabilidad de no excedencia de la predicción o evento buscado, en este caso $F = 0.9999834$ para obtener la PMP, según el método de Koutsoyiannis (1999). Por último, se aplica la corrección de Weiss (1964), para convertir la PMP diaria en 24 horas.

Estimación de la *PMP* en un área y varias duraciones

Se acepta que los valores puntuales de PMP obtenidos al aplicar el método de estadístico o el probabilístico a una serie de PMD anual son representativos de un área de 25 km². Lo anterior, debido a la representatividad espacial asignada por la WMO (1973), a una estación pluviométrica. Por lo tanto, para estimar la PMP en 24 horas, correspondiente a una cierta área o cuenca (*A*) mayor de 25 km², se debe aplicar un factor de reducción por área (FRA), ya que todas las tormentas son menores conforme abarcan más extensión. En cuencas grandes, donde es común tener dentro de ella varias estaciones pluviométricas, primero se debe obtener el valor ponderado de PMP puntual, por medio del método de las curvas isoyetas, los polígonos de Thiessen o alguna otra técnica más adecuada. La WMO (1973) presentó unas curvas promedio de reducción por área, obtenidas a partir del análisis precipitación-área-duración (P-A-D) de grandes tormentas de tipo general. La curva relativa a la duración de 24 horas, ha sido representada por el siguiente polinomio de 4^o grado:

$$FRA = 1.012021 - C_1 \cdot A + C_2 \cdot A^2 - C_3 \cdot A^3 + C_4 \cdot A^4 \quad (16)$$

siendo, el área *A* en km² y $C_1 = 5.985305 \cdot 10^{-4}$, $C_2 = 1.39148 \cdot 10^{-6}$, $C_3 = 1.548155 \cdot 10^{-9}$, $C_4 = 6.121556 \cdot 10^{-13}$. La expresión anterior se obtuvo con base en 11 puntos y tiene un coeficiente de determinación de 0.99874, así como un error estándar de la estimación de 0.00257 (Campos-Aranda, 1998). Para distribuir en otras duraciones, la PMP en 24 horas puntual o de un área, se puede utilizar el criterio propuesto por Schulz (1976), el cual consiste en trazar en un papel logarítmico una recta paralela a la curva envolvente de valores máximos mundiales, en la duración de 24 horas y el valor de la PMP. La curva envolvente es una recta en el papel logarítmico cuya ecuación es (WMO, 1973; Linsley et al., 1988):

$$P_{MM} = 421.64 \cdot D^{0.475} \quad (17)$$

donde, P_{MM} es la precipitación máxima mundial en milímetros, de duración D en horas. Por ejemplo, para obtener la PMP en seis horas, siendo la de 24 horas de 815.0 mm, el procedimiento es el siguiente:

$$\text{coef} = \frac{815.0}{(24)^{0.475}} = \frac{815.0}{4.52481} \cong 180.118$$

$$PMP_6 = 180.118 \cdot (6)^{0.475} \cong 421.9 \text{ mm}$$

Estimación de predicciones

Para obtener predicciones de determinados periodos de retornos (Tr), se representan los datos de la serie o *muestra* disponible con una función de distribución de probabilidades (FDP) poblacional, de la cual se supone que tal muestra procede y que permite realizar las inferencias buscadas. Stedinger, Vogel y Foufoula-Georgiou (1993) citan como modelos comunes en el análisis probabilístico de las series de lluvias máximas, las distribuciones Log-Pearson tipo III (LP3) y General de Valores Extremos (GVE), cuya aplicación ha sido establecida bajo precepto en U.S.A. y en Inglaterra. Ambas FDP se ajustaron con sus dos métodos más comunes y consistentes; para la distribución LP3 se usó el método de momentos en los dominios logarítmico (WRC, 1977) y real (Bobée, 1975) y para la función GVE se empleó el método de sextiles (Clarke, 1973; NERC, 1975) y el de momentos L (Stedinger *et al.*, 1993; Hosking & Wallis, 1997).

Error estándar de ajuste

Desde mediados de la década de 1970 se formuló al error estándar de ajuste (EEA) como una medida cuantitativa que estima la calidad estadística del modelo probabilístico ajustado y que además permite la comparación objetiva entre las diversas FDP que se prueban o ajustan a una serie o muestra de datos, ya que tiene las unidades de los datos. Su expresión es la siguiente (Kite, 1977):

$$EEA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{n - np}} \quad (18)$$

donde n , es el número de datos de la serie de *PMD*, np es el número de parámetros de ajuste de la FDP que se contrasta, x_i son los datos ordenados de menor a mayor y \hat{x}_i son los valores estimados con la FDP para la probabilidad de no excedencia $P(X < x)$ estimada con la fórmula de Weibull (Benson, 1962):

$$P(X < x) = \frac{m}{n + 1} \quad (19)$$

en la cual, m es el número de orden del dato, con 1 para el menor y n para el mayor.

Ajuste de la distribución GVE con momentos LH

Papalexiou y Koutsoyiannis (2013) indican que de acuerdo con la teoría de valores extremos, la FDP de las series de *PMD* anual debe asemejarse a alguna de las tres formas límite que define la FDP General de Valores Extremos. Aplicada por estos autores a 15 137 registros de *PMD* anual del mundo, cuya amplitud varió de 40 a 163 datos; encontraron que la FDP que más siguen tales registros es la tipo II o de Fréchet; cuyo valor de su parámetro de forma ($k < 0$) lo definen los datos extremos máximos.

Por otra parte, los momentos LH o de orden mayor (η) desarrollados por Wang (1997a,b), permiten caracterizar de una manera más eficiente la cola derecha de la FDP, al dar más importancia a los grandes valores de los datos. Usando los momentos LH se reduce la influencia indeseable que las magnitudes pequeñas de la serie o muestra pueden tener en la estimación de las predicciones extremas. Debido a ambos resultados citados, se aplicó la distribución GVE con la técnica de los momentos LH (Campos-Aranda, 2016), para intentar reducir el menor *EEA* alcanzado con los modelos LP3 o GVE.

Análisis probabilístico en registros con persistencia

Khaliq, Ouarda, Ondo, Gachon & Bobée (2006) indican que la validez de las predicciones obtenidas a través del análisis probabilístico será cuestionable si las observaciones de la serie de PMD por procesar son *dependientes*, es decir, que muestran autocorrelación, lo cual caracteriza la *persistencia*. Estos autores clasifican en tres tipos las técnicas disponibles para tomar en cuenta tal dependencia: 1) enfoque que elimina la autocorrelación; 2) enfoque de "corte" o reducción de la muestra, y 3) estimación de la densidad de probabilidad mediante ondeletas (wavelets) o funciones núcleo (kernels).

El primer enfoque es el más simple y es aplicable cuando el coeficiente de correlación serial de orden uno (r_1) resultó significativo, entonces la serie sigue un proceso autorregresivo de orden 1, cuyas observaciones x_i pueden perder la autocorrelación a través del siguiente proceso (Salas, 1993; Khaliq *et al.*, 2006):

$$x'_i = x_i - r_1 \cdot x_{i-1} \quad (20)$$

La transformación de la muestra x_1, x_2, \dots, x_n en la serie x'_1, x'_2, \dots, x'_n elimina parte o la totalidad de la autocorrelación, volviéndola susceptible de análisis probabilístico.

Análisis probabilístico en registros con tendencia

La técnica más simple para procesar registros de datos hidrológicos extremos (crecientes y/o *PMD*) que muestran tendencia fue propuesta por McCuen y Thomas (1990), consiste en buscar una ecuación de regresión que la represente, la cual será lineal o polinomial (curva) y se pueden utilizar los datos originales o sus logaritmos, pero la variable independiente será el tiempo (t) en años, con uno para el primer dato y n para el último año del tramo en análisis. Esta tendencia es restada a los datos y se realiza el análisis probabilístico con tales *residuos*. Después se corrigen las predicciones por la tendencia máxima, obtenida ésta al final del tramo en análisis y por último, se realiza la

transformación inversa, si se trabajó con logaritmos, caso común en registros de crecientes (Campos–Aranda, 2012).

Para evitar tener residuos negativos se hace la ordenada al origen (b) igual a cero y se resta a cada dato el producto de la pendiente (m) por t , en caso de tendencia ascendente; para tendencia descendente se suma a cada dato tal producto. Realizadas las *predicciones*, en el primer caso se les suma a estas el producto de m por n y en el segundo caso se les resta tal producto.

Análisis y discusión de resultados

Resultados de la pruebas estadísticas

Las series disponibles de las estaciones de amplio registro: Charcas (AP), Matehuala (AP) y Paso de San Antonio (ZM) mostraron tendencia ascendente, pues sus valores iniciales son muy bajos. Eliminando una porción inicial de tales registros, bajo la hipótesis de que pueden ser los menos confiables, tales series se vuelven homogéneas en todas las pruebas. Tal depuración o truncamiento de esas series se considera aceptable, debido al tipo de análisis probabilístico por aplicar, el cual busca predicciones máximas.

En la Tabla 2 se enlistan los 39 registros que fueron detectados como no homogéneos, ya que presentan las componentes determinísticas que se indican. Donde el test de Von Neumann mostró pérdida de aleatoriedad se indicó al registro como no aleatorio. Cuando la persistencia o la *tendencia* fueron detectadas únicamente con una de las dos pruebas específicas aplicadas, se designó como ligera. La prueba de Bartlett siempre mostró exceso de variabilidad, debido a la presencia de valores extremos máximos, es por ello que se enlistó en la Tabla 2.

Tabla 2. Estaciones pluviométricas con series de *PMD* anual detectadas como no homogéneas.

No.	Estación pluviométrica:	Componente determinística detectada:
1 (AP)	Arista	No aleatorio y persistencia
2 (AP)	El Mezquite	Persistencia ligera
3 (AP)	Los Pilares	Persistencia ligera y tend ascendente
4 (AP)	Reforma	Tendencia descendente ligera
5 (AP)	S. Ma. del Refugio	Persistencia ligera
6 (AP)	Soledad	Persistencia ligera
7 (AP)	Venado	No aleatorio y persistencia ligera
8 (AP)	Villa de Ramos	No aleatorio y persistencia
9 (ZM)	Cerritos	Persistencia ligera
10 (ZM)	Ciudad del Maíz	Tendencia descendente
11 (ZM)	Col Á. Obregón	Persistencia ligera
12 (ZM)	Guadalcázar	No aleatorio y tendencia descendente
13 (ZM)	Paredes	Persistencia ligera
14 (ZM)	Pastora	Persistencia ligera
15 (ZM)	Presa Á. Obregón	Persistencia ligera
16 (ZM)	San N. Tolentino	No aleatorio y persistencia
17 (ZM)	Tierra Nueva	Persistencia ligera
18 (ZM)	Vigas	Tend. ascendente y cambio en la media
19 (ZM)	Villa Juárez	Persistencia ligera y tend. ascendente
20 (ZM)	Zaragoza	No aleatorio y persistencia
21 (RH)	Abritas	No aleatorio y tendencia descendente
22 (RH)	Altamira	No aleatorio y persistencia ligera
23 (RH)	Aquismón	Persistencia ligera
24 (RH)	Ciudad Santos	Persistencia ligera
25 (RH)	Ébano	No aleatorio y persistencia ligera
26 (RH)	El Coco	Persistencia
27 (RH)	El Pujal	Tend. ascendente y cambio en la media
28 (RH)	Las Adjuntas	Tendencia ascendente
29 (RH)	Maitínez	Persistencia ligera
30 (RH)	San Dieguito	Persistencia ligera y tend. descendente
31 (RH)	San Felipe	No aleatorio y persistencia
32 (RH)	Santa Cruz	Persistencia ligera

33 (RH)	Santa Rosa	Persistencia ligera
34 (RH)	Santiaguillo	No aleatorio y persistencia
35 (RH)	Tamuín	No aleatorio y persistencia
36 (RH)	Tantizohuiche	Persistencia ligera
37 (RH)	Tansabaca	Persistencia ligera
38 (RH)	Tlamaya	No aleatorio y persistencia
39 (RH)	Velazco	No aleatorio y persistencia

A los 39 registros no homogéneos de la Tabla 2 se les aplicó el Test de Wald-Wolfowitz, encontrando que los nueve siguientes tienen datos dependientes, por ello se cita entre paréntesis su coeficiente de correlación serial de orden 1: Arista (0.540), Villa de Ramos (0.345), Cerritos (-0.305), San Nicolás Tolentino (0.286), Abritas (0.336), Ébano (0.291), San Felipe (0.402), Tamuín (0.347) y Velazco (0.240). Estas nueve series que mostraron autocorrelación, se les eliminó tal componente determinística a través de la ecuación 20 y sólo en los registros de las estaciones de Arista y San Felipe, se obtuvieron, respectivamente, dos y un valores transformados negativos, los cuales se adoptaron igual a 0.10 milímetros, para continuar con su análisis probabilístico. Previo a tal análisis se verificó la aleatoriedad de los nueve registros transformados, encontrándose que en el registro de Abritas se elimina la persistencia, pero se conserva la tendencia.

Según resultados de la Tabla 2, el registro de Abritas tiene tendencia descendente, así como los de Ciudad del Maíz y San Dieguito. Otros cuatro registros mostraron tendencia ascendente y son: Los Pilares, Vigas, El Pujal y Las Adjuntas.

En la Tabla 3 se indican los resultados cuantitativos de las pruebas asociadas con la verificación de la tendencia lineal, aplicadas a los datos originales y a sus logaritmos naturales, según criterio de Ostle y Mensing (1975), expuesto y aplicado por Campos-Aranda (2015). Se cita en la columna 2, de la Tabla 3, la magnitud del estadístico (EK) de la prueba de tendencia de Kendall, cuyo valor crítico es ± 1.96 .

En la columna final de la Tabla 3 se observa que se adoptaron, con base en los resultados numéricos, tres registros con tendencia lineal. En las Figuras 2 y 3 se muestran las series cronológicas de las estaciones Los Pilares y Abritas, con tendencia ascendente y descendente, así como sus rectas correspondientes.

Predicciones de altos periodos de retorno

En la Tabla 4 se han concentrado los resultados de la aplicación o ajuste de los dos modelos probabilísticos utilizados, las distribuciones Log-Pearson tipo III (LP3) y General de Valores Extremos (GVE), en las 100 series de PMD anual procesadas, que fueron 89 registros aleatorios, ocho transformados con la ecuación 20 y tres con tendencia. En la tercera columna de la Tabla 4 se expone el menor error estándar de ajuste (ecuación 18), obtenido con la función LP3 o la GVE y su método de ajuste. Por último, en las cinco columnas finales de la Tabla 4 se exponen las predicciones correspondientes al modelo LP3 o GVE. En 59 registros, la distribución LP3 condujo al menor *EEA*, en los 41 restantes lo hizo la función GVE, con 28 según los momentos *L* de orden mayor.

Tabla 3. Resultados de las pruebas de tendencia lineal aplicadas a los registros de PMD de las estaciones climatológicas indicadas del estado de San Luis Potosí, México.

Estación:	Prueba Kendall	Tendencia lineal (con datos originales)					Tendencia lineal (con logaritmos naturales)			¿?
	EK	<i>r</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	<i>t</i>	<i>tc</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	<i>t</i>	
Los Pilares	3.512	0.415	36.516	0.417	3.059	2.014	0.0098	3.562	3.386	si
Cd. del Maíz	-2.837	-0.242	82.522	-0.862	-1.638	2.017	-0.0187	4.343	-2.609	no
Vigas	2.201	0.239	49.881	0.588	1.725	2.010	0.0092	3.815	2.046	no
Abritas	-3.469	-0.462	167.632	-1.606	-3.756	2.007	-0.0144	5.106	-3.734	si
El Pujal	2.126	0.187	109.281	0.612	1.427	2.003	0.0060	4.593	2.010	no
Las Adjuntas	2.574	0.298	74.921	0.881	2.252	2.007	0.0084	4.282	2.543	si
San Dieguito	-2.271	-0.105	143.128	-0.418	-0.756	2.008	-0.0048	4.925	-1.318	no

Simbología:

- EK estadístico de la prueba de Kendall, adimensional.
- r coeficiente de correlación lineal, adimensional.
- b ordenada al origen, en milímetros.
- m pendiente de la recta de regresión lineal, adimensional.
- t estadístico de la prueba, adimensional.
- tc valor crítico de la prueba t de Student, adimensional.
- ¿? ¿se acepta la tendencia?

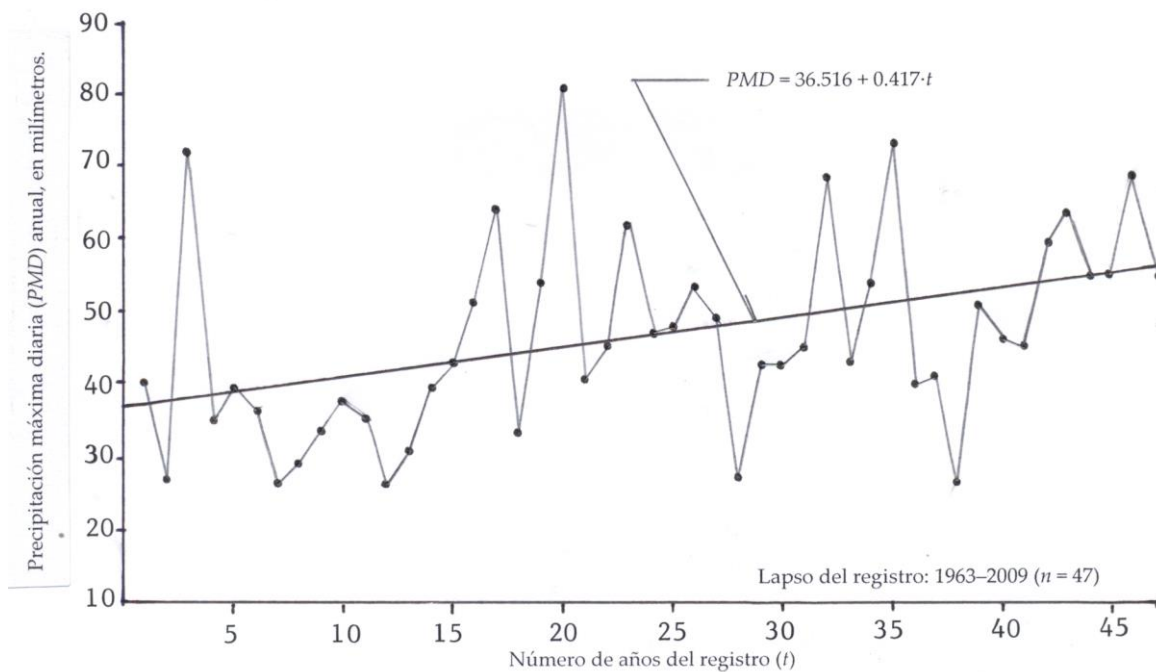


Figura 2. Serie cronológica de la PMD anual en la estación pluviométrica Los Pilares (AP) del estado de San Luis Potosí, México.

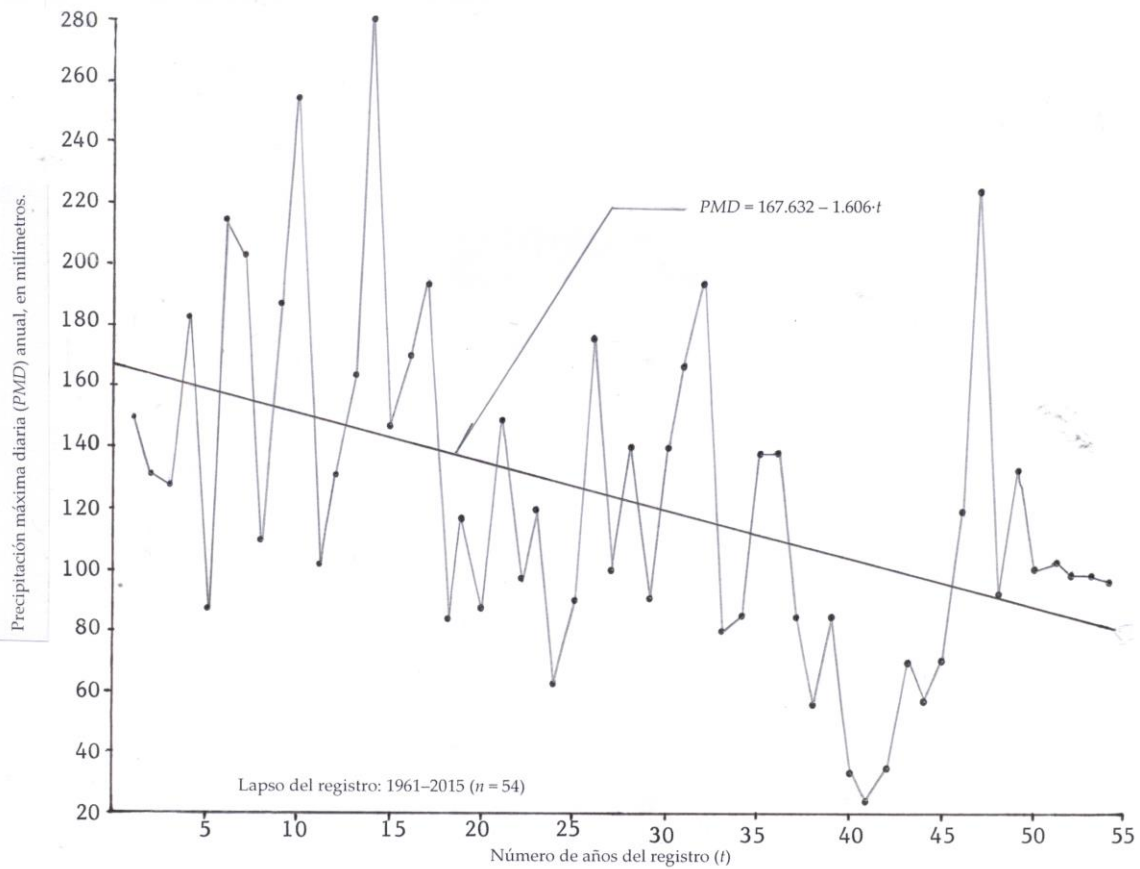


Figura 3. Serie cronológica de la PMD anual en la estación pluviométrica Abritas (RH) del estado de San Luis Potosí, México.

Tabla 4. Predicciones de PMD en milímetros en los periodos de retorno indicados obtenidas con el EEA mínimo de las dos FDP aplicadas, en las 100 estaciones pluviométricas procesadas del estado de San Luis Potosí, México.

No.	Nombre:	EEA ¹ en mm. (FDP ² . MA ³)	Periodos de retorno en años				
			100	500	1 000	5 000	10 000
1 (AP)	Arista	15.363 (LP3. dr)	192.7	298.0	350.2	487.8	554.2
2 (AP)	Cedral	18.303 (LP3. dl)	205.9	430.9	596.0	1284.0	1798.1
3 (AP)	Charcas	2.598 (GVE. L4)	122.2	154.4	168.7	203.0	218.3
4 (AP)	El Grito	2.362 (GVE. mL)	100.9	116.2	122.1	134.4	139.1
5 (AP)	El Mezquite	2.509 (LP3. dr)	89.0	106.1	113.5	130.6	138.0
6 (AP)	El Peaje	2.595 (LP3. dr)	79.2	94.1	100.7	116.3	123.2

7 (AP)	La Maroma	5.000 (GVE. L1)	127.1	180.6	208.8	289.1	331.3
8 (AP)	La Presa	1.888 (GVE. L1)	90.0	98.2	101.0	106.2	108.0
9 (AP)	Los Filtros (SLP)	3.430 (LP3. dr)	93.0	114.0	123.4	145.9	156.0
10 (AP)	Los Pilares	2.180 (GVE. L4)	99.5	120.5	130.1	154.1	165.2
11 (AP)	Matehuala	7.789 (LP3. dl)	170.4	245.2	284.5	396.7	455.8
12 (AP)	Mexquitic	2.611 (LP3. dr)	97.0	113.3	120.1	135.1	141.4
13 (AP)	Moctezuma	13.054 (LP3. dl)	203.4	378.3	493.8	917.3	1198.8
14 (AP)	Palo Blanco	1.444 (GVE. L1)	78.9	90.5	94.9	103.9	107.3
15 (AP)	Peñón Blanco	15.888 (LP3. dl)	233.2	490.1	675.7	1432.7	1985.7
16 (AP)	Presa de Gpe.	4.857 (GVE. L4)	129.5	193.1	228.6	336.8	397.2
17 (AP)	Reforma	2.218 (GVE. mL)	98.9	113.9	119.6	131.5	136.1
18 (AP)	S. Ma. del Refugio	1.721 (GVE. L2)	71.1	88.0	95.3	112.6	120.2
19 (AP)	Santiago	2.731 (LP3. dl)	104.3	128.6	139.2	164.3	175.3
20 (AP)	Santo Domingo	15.638 (LP3. dr)	201.0	292.8	339.6	468.3	533.5
21 (AP)	Soledad	11.792 (LP3. dl)	201.9	383.8	504.6	949.5	1245.9
22 (AP)	Vanegas	2.904 (GVE. L2)	101.1	129.3	141.8	172.2	185.7
23 (AP)	Venado	7.377 (LP3. dl)	183.5	263.3	303.4	412.1	466.5
24 (AP)	Villa de Arriaga	13.275 (LP3. dr)	156.9	232.8	271.9	380.4	435.8
25 (AP)	Villa de Ramos	2.976 (LP3. dl)	82.3	96.0	100.9	110.2	113.6
26 (ZM)	A. de los Infante	5.086 (GVE. sx)	164.5	230.5	264.1	356.9	404.1
27 (ZM)	Cárdenas	7.257 (LP3. dl)	230.8	345.3	406.2	581.3	674.1
28 (ZM)	Cerritos	5.716 (LP3. dr)	171.8	190.6	198.1	214.2	220.8
29 (ZM)	Ciudad del Maíz	6.680 (LP3. dl)	284.0	468.2	572.0	888.7	1065.2
30 (ZM)	Col. Á. Obregón	8.273 (LP3. dl)	175.8	258.9	301.4	418.7	478.4
31 (ZM)	Guadalcázar	6.317 (LP3. dl)	183.3	253.8	287.7	375.8	418.1
32 (ZM)	Lagunillas	6.736 (LP3. dl)	201.2	265.0	295.4	373.7	411.1
33 (ZM)	La Salitrera	9.734 (LP3. dl)	191.4	302.6	365.0	555.9	662.9
34 (ZM)	Nogal Oscuro	3.723 (GVE. L1)	149.0	184.4	200.0	237.3	253.7
35 (ZM)	Ojo Caliente	1.722 (GVE. mL)	80.5	94.1	99.6	111.8	116.8
36 (ZM)	Ojo de Agua	11.665 (LP3. dl)	292.4	474.3	582.6	936.9	1148.9
37 (ZM)	Ojo de Agua Seco	5.464 (GVE. L3)	179.2	248.1	283.3	381.0	431.1
38 (ZM)	Paredes	7.554 (LP3. dl)	210.1	300.1	346.3	475.3	541.6
39 (ZM)	Paso de S. Antonio	8.172 (GVE. L1)	167.9	231.3	264.2	357.0	405.2
40 (ZM)	Pastora	7.143 (LP3. dr)	133.4	174.3	193.4	241.4	263.9
41 (ZM)	Pedro Montoya	4.214 (GVE. L1)	185.3	254.3	288.8	382.4	429.3
42 (ZM)	Presa Á. Obregón	15.916 (LP3. dl)	398.2	844.9	1161.2	2409.9	3292.8
43 (ZM)	Rayón	17.256 (LP3. dl)	264.6	446.5	557.9	933.4	1164.5
44 (ZM)	Río Verde	2.992 (GVE. mL)	141.0	180.5	198.7	244.1	265.0
45 (ZM)	San Francisco	4.568 (GVE. L4)	138.2	191.8	218.4	290.0	325.5

46 (ZM)	S. J. Alburquerque	4.807 (LP3. dl)	127.1	166.7	185.6	234.2	257.4
47 (ZM)	San N. Tolentino	2.932 (LP3. dl)	111.5	135.7	145.9	169.2	179.1
48 (ZM)	Santa Ma. del Río	4.736 (LP3. dl)	131.7	196.2	231.9	339.8	399.8
49 (ZM)	Tierra Nueva	3.656 (LP3. dl)	97.8	115.0	121.7	136.1	141.8
50 (ZM)	Vigas	7.700 (LP3. dl)	211.4	311.2	363.8	513.8	592.7
51 (ZM)	Villa de Reyes	12.259 (LP3. dl)	158.5	246.7	296.9	453.3	542.6
52 (ZM)	Villa Juárez	2.433 (GVE. mL)	156.4	184.5	195.6	219.1	228.4
53 (ZM)	Zaragoza	2.491 (GVE. L2)	94.0	117.3	127.5	151.8	162.4
54 (RH)	Abritas	7.190 (LP3. dl)	228.7	284.5	308.7	365.4	390.3
55 (RH)	Agua Buena	9.806 (LP3. dl)	330.0	434.8	486.6	625.7	694.9
56 (RH)	Altamira	12.222 (LP3. dl)	371.0	524.9	606.9	844.5	971.6
57 (RH)	Aquismón	11.952 (LP3. dl)	446.0	614.9	700.3	934.5	1053.3
58 (RH)	Ballesmi	10.651 (GVE. L2)	352.2	488.0	557.7	751.4	850.9
59 (RH)	Chapulhuacanito	16.971 (GVE. L1)	406.3	584.2	680.9	966.3	1121.5
60 (RH)	Ciudad Santos	12.554 (LP3. dl)	401.2	508.9	558.3	681.4	738.3
61 (RH)	Damián Carmona	10.593 (GVE. sx)	362.6	549.4	655.8	986.4	1174.9
62 (RH)	Ébano	9.900 (GVE. mL)	273.9	406.6	476.6	676.6	782.1
63 (RH)	El Coco	15.683 (LP3. dr)	267.6	352.7	392.9	495.6	544.3
64 (RH)	El Fiscal	7.056 (GVE. L2)	286.7	396.3	451.7	603.7	680.7
65 (RH)	El Naranjo	7.754 (GVE. L1)	323.3	434.0	488.1	631.1	701.0
66 (RH)	El Peñón	8.319 (LP3. dl)	354.2	473.5	531.1	681.0	753.4
67 (RH)	El Pujal	8.364 (GVE. L2)	338.4	472.1	541.0	733.1	832.0
68 (RH)	El Salto	16.855 (LP3. dl)	360.3	548.5	655.2	985.8	1174.1
69 (RH)	El Tigre	11.391 (LP3. dl)	358.8	578.2	707.1	1120.9	1364.4
70 (RH)	El Tulillo	9.742 (LP3. dl)	279.7	443.2	538.7	844.5	1023.9
71 (RH)	Gallinas	15.290 (GVE. L1)	531.4	803.9	954.2	1405.7	1654.9
72 (RH)	Las Adjuntas	11.060 (GVE. L1)	297.7	438.3	518.4	767.2	908.9
73 (RH)	Maitínez	6.234 (GVE. L1)	292.1	388.6	435.8	560.8	622.0
74 (RH)	Micos	8.574 (GVE. mL)	331.8	436.0	485.5	612.3	672.5
75 (RH)	Moritas	9.716 (LP3. dl)	413.8	602.3	703.1	995.9	1152.8
76 (RH)	Papagayos	12.927 (LP3. dl)	354.8	542.6	647.5	966.3	1144.4
77 (RH)	Requetemu	33.137 (LP3. dl)	542.0	925.0	1164.7	1993.4	2516.0
78 (RH)	San Dieguito	12.525 (GVE. L3)	377.7	548.1	638.9	901.3	1041.1
79 (RH)	San Felipe	8.967 (GVE. L3)	270.4	357.2	397.4	498.1	544.8
80 (RH)	San Juan del Meco	10.962 (LP3. dl)	366.2	585.3	710.0	1096.2	1315.4
81 (RH)	S.M. Chalchicuatla	10.779 (LP3. dr)	300.1	372.5	404.5	481.5	516.0
82 (RH)	San Vicente	11.803 (LP3. dl)	318.1	465.8	545.1	776.1	900.1
83 (RH)	Santa Cruz	9.952 (GVE. L4)	351.3	469.1	527.8	686.0	764.8
84 (RH)	Santa Rosa	30.155 (LP3. dl)	494.3	849.5	1069.6	1821.3	2289.1

85 (RH)	Santiaguillo	10.880 (GVE. mL)	355.9	474.4	531.3	679.3	750.6
86 (RH)	Tamapatz	14.254 (LP3. dr)	403.6	470.0	496.8	556.1	580.6
87 (RH)	Tamuín	8.816 (GVE. sx)	287.1	406.4	466.1	627.6	708.3
88 (RH)	Tancuilín	12.491 (GVE. dl)	492.1	706.9	818.9	1135.5	1300.6
89 (RH)	Tanlacut	14.219 (LP3. dl)	501.4	762.1	903.9	1323.0	1550.6
90 (RH)	Tanlajás	7.580 (GVE. mL)	340.2	453.1	509.0	658.7	732.8
91 (RH)	Tanlú	11.753 (LP3. dl)	332.7	460.5	523.3	689.9	771.6
92 (RH)	Tanquián	15.183 (LP3. dl)	344.2	535.0	644.1	984.5	1179.6
93 (RH)	Tantizohuiche	16.731 (LP3. dl)	421.3	657.7	792.9	1215.6	1458.1
94 (RH)	Tansabaca	20.256 (GVE. L1)	577.6	793.0	897.1	1169.7	1301.6
95 (RH)	Temamatla	11.432 (LP3. dl)	422.8	585.8	668.6	896.4	1012.4
96 (RH)	Tierra Blanca	9.887 (LP3. dl)	418.0	592.9	683.6	938.8	1071.2
97 (RH)	Tlamaya	15.868 (LP3. dl)	518.0	739.2	854.3	1179.3	1348.5
98 (RH)	Velazco	16.348 (LP3. dl)	270.0	412.3	487.9	704.4	818.5
99 (RH)	Veinte de Nov.	9.192 (GVE. L4)	372.3	465.8	506.9	604.5	647.5
100(RH)	Xilitla	10.430 (GVE. L1)	409.7	529.4	586.5	733.8	804.2

Simbología:

- ¹ error estándar de ajuste mínimo, en milímetros.
- ² función de distribución de probabilidades:
 - LP3 distribución Log–Pearson tipo III.
 - GVE distribución General de Valores Extremos.
- ³ método de ajuste:
 - dl método de momentos (dominio logarítmico).
 - dr método de momentos (dominio real).
 - mL método de momentos L.
 - sx método de sextiles.
 - L1 a L4 método de momentos L de orden mayor.

Contraste con las predicciones del estudio de 1976

Se comenzó por encontrar estaciones pluviométricas comunes al estudio realizado a mediados de los años setenta (SRH, 1976), que abarcó todo México y del trabajo ahora expuesto; se encontraron 57: con 16 para el AP, 15 para la ZM y 26 para la RH. En una tabulación que no se expone por limitaciones de espacio, pero disponible con el autor, se concentraron las predicciones tomadas de los mapas de curvas de isovalores (SRH, 1976) en 24 horas elaborados sólo en los Tr de 100, 1 000 y 10 000 años; así como las predicciones adoptadas de la Tabla 4, corregidas por el factor de Weiss (1964). También se incluyen los cocientes de predicciones, entre la estimación probabilística y la obtenida en los mapas de isovalores.

Se observa mayor dispersión en los cocientes del Tr de 10 000 años, que en aquéllos asociados al de 100 años; lo anterior, a través del intervalo entre los valores mínimo y máximo. Los 57 cocientes del periodo de retorno de 100 años presentan 14 valores (24.6%) menores que la unidad, en los del Tr de 1 000 años, ocho son menores que uno (14%), y en el Tr de 10 000 años se tienen nueve cocientes menores de la unidad (15.8%). Estos porcentajes bajos de cocientes menores de uno, no inferiores a 0.70, orientan a establecer que las predicciones actuales son superiores a las del estudio de 1976.

Con base en las medidas de tendencia central de los cocientes descritos, se pueden aceptar valores medianos poblacionales de 1.25, 1.50 y 1.95 para los tres Tr analizados; estimados con base en la distribución Gamma Mixta (Campos-Aranda, 2005). En resumen, las predicciones recientes son superiores a las del estudio de 1976; esto originado por valores máximos mayores en los registros actualizados de este estudio (ver columnas 5 y 6 de la Tabla 1).

Estimación estadística de la PMP puntual

En la tabla 5 se han concentrado los resultados de la aplicación de los métodos estadístico de Hershfield y probabilístico de Koutsoyiannis a los 100 registros de PMD procesados. Se aclara que el valor adoptado de PMP puntual en 24 horas, corresponde al *máximo* de ambos. Se observa que las estimaciones de PMP en 24 horas muestran gran variabilidad, fluctuando en el AP de 284.7 mm en Santa María del Refugio a 861.0 mm en Arista. En la ZM varía de 304.2 mm en Ojo Caliente a 1 193.3 mm en Presa Álvaro Obregón y por último, en la RH fluctúa de 824.8 mm en Abritas a 1 681.9 mm en Tansabaca. Esta variabilidad está

asociada a los cambios en la precipitación anual media y a la presencia o ausencia de valores máximos dispersos (*outliers*) en la PMD anual.

Tabla 5. Resultados de la aplicación del método estadístico de Hershfield y del método probabilístico de Koutsoyiannis para estimar la PMP (mm) en 24 horas puntual, en las 100 estaciones pluviométricas indicadas del estado de San Luis Potosí, México.

No.	Estación pluviométrica	F.F. ¹ Km	PMP _H ² (mm)	Método de Koutsoyiannis ³				Cocientes ⁴	
				<i>k</i>	β	<i>u</i>	PMP _K	PMP/Po	PMP/P _{Tr}
1 (AP)	Arista	18.191	685.6	-0.166	23.761	17.127	861.0	3.618	1.554
2 (AP)	Cedral	17.627	455.8	-0.160	23.182	29.584	821.6	2.602	0.457
3 (AP)	Charcas	17.402	483.7	-0.159	13.260	38.743	492.1	4.206	2.254
4 (AP)	El Grito	17.353	411.9	-0.159	10.951	41.061	415.9	4.118	2.990
5 (AP)	El Mezquite	17.635	344.5	-0.162	9.048	36.477	352.9	3.921	2.557
6 (AP)	El Peaje	17.717	274.3	-0.163	7.288	36.101	293.3	3.391	2.381
7 (AP)	La Maroma	17.525	411.6	-0.160	12.799	36.963	477.6	3.409	1.442
8 (AP)	La Presa	17.186	357.3	-0.157	8.740	45.716	343.5	4.204	3.308
9 (AP)	Los Filtros (SLP)	17.678	333.6	-0.162	9.421	35.857	365.4	3.292	2.342
10 (AP)	Los Pilares	17.958	313.8	-0.165	7.466	30.820	317.7	3.898	1.923
11 (AP)	Matehuala	16.980	521.6	-0.154	17.749	45.987	630.7	3.154	1.384
12 (AP)	Mexquitic	17.449	382.8	-0.160	10.280	40.029	393.9	3.681	2.786
13 (AP)	Moctezuma	17.439	545.2	-0.159	20.384	34.722	725.2	3.453	0.605
14 (AP)	Palo Blanco	17.861	340.7	-0.164	8.483	31.969	333.3	4.732	3.175
15 (AP)	Peñón Blanco	17.547	728.2	-0.160	24.172	29.527	853.3	3.631	0.430
16 (AP)	Presa de Gpe.	17.494	428.1	-0.160	12.388	37.483	463.9	3.821	1.168
17 (AP)	Reforma	17.398	404.9	-0.159	10.652	40.337	406.1	4.165	2.984
18 (AP)	S. M. del Refugio	18.241	284.7	-0.168	7.064	25.398	282.8	4.512	2.369
19 (AP)	Santiago	17.618	412.3	-0.162	11.113	35.456	422.1	4.217	2.408
20 (AP)	Santo Domingo	17.119	548.7	-0.155	22.942	40.431	798.0	2.956	1.496
21 (AP)	Soledad	17.663	548.9	-0.161	21.029	29.596	752.3	3.135	0.604
22 (AP)	Vanegas	17.922	416.3	-0.165	10.938	29.269	417.4	4.638	2.248
23 (AP)	Venado	17.234	620.5	-0.157	20.264	38.637	716.8	3.584	1.537
24 (AP)	Villa de Arriaga	17.817	422.3	-0.162	17.834	28.563	649.2	3.175	1.490
25 (AP)	Villa de Ramos	18.290	446.8	-0.168	11.188	21.366	427.8	4.964	3.933
Valor mínimo		16.980	274.3	-0.154	7.064	17.127	282.8	2.602	0.430
Valor Máximo		18.290	728.2	-0.168	24.172	45.987	861.0	4.964	3.933
26 (ZM)	A. de los Infantes	17.006	596.9	-0.155	16.600	45.029	595.5	4.488	1.477
27 (ZM)	Cárdenas	16.586	810.2	-0.150	23.856	49.983	812.3	4.500	1.205
28 (ZM)	Cerritos	15.040	567.7	-0.132	16.159	93.365	557.1	4.055	2.571
29 (ZM)	Ciudad del Maíz	16.858	889.3	-0.152	28.487	41.469	964.9	4.154	0.906
30 (ZM)	Col. Á. Obregón	17.494	634.3	-0.159	19.978	33.033	714.2	3.924	1.493
31 (ZM)	Guadalcázar	17.132	638.8	-0.156	19.851	40.854	701.3	3.779	1.677
32 (ZM)	Lagunillas	16.168	682.5	-0.145	21.641	61.888	732.4	3.488	1.782
33 (ZM)	La Salitrera	17.290	592.3	-0.157	20.304	37.591	719.3	3.597	1.085
34 (ZM)	Nogal Oscuro	16.604	550.1	-0.151	15.157	54.837	544.8	4.281	2.168

35 (ZM)	Ojo Caliente	17.702	304.2	-0.163	7.595	35.931	303.7	3.997	2.604
36 (ZM)	Ojo de Agua	15.675	799.7	-0.138	29.103	70.234	930.5	3.100	0.810
37 (ZM)	Ojo de Agua Seco	16.506	587.9	-0.149	17.731	56.146	622.2	3.607	1.443
38 (ZM)	Paredes	16.514	719.9	-0.149	22.150	53.128	757.4	3.884	1.398
39 (ZM)	P. de S. Antonio	16.528	497.5	-0.149	16.937	56.769	597.8	2.989	1.475
40 (ZM)	Pastora	17.367	454.9	-0.158	14.614	39.282	535.8	3.349	2.030
41 (ZM)	Pedro Montoya	16.515	630.7	-0.149	18.721	54.936	652.9	3.945	1.521
42 (ZM)	Presas Á. Obregón	16.650	1130.4	-0.150	36.237	41.134	1193.3	4.425	0.362
43 (ZM)	Rayón	16.326	641.1	-0.145	28.112	55.740	927.6	2.811	0.797
44 (ZM)	Río Verde	16.955	515.3	-0.154	14.208	47.810	518.6	4.106	1.957
45 (ZM)	San Francisco	17.516	506.6	-0.160	14.670	35.634	539.7	3.998	1.658
46 (ZM)	S.J. Albuquerque	17.346	461.3	-0.159	13.109	40.195	486.6	3.847	1.890
47 (ZM)	San N. Tolentino	17.538	458.1	-0.161	12.493	36.343	467.7	3.598	2.611
48 (ZM)	Santa Ma. del Río	17.468	434.6	-0.160	12.206	37.640	457.9	3.982	1.145
49 (ZM)	Tierra Nueva	17.699	431.5	-0.162	11.293	33.579	428.5	4.640	3.043
50 (ZM)	Vigas	16.724	692.4	-0.151	22.340	48.556	768.7	3.609	1.297
51 (ZM)	Villa de Reyes	17.392	401.2	-0.158	16.875	37.983	609.6	3.048	1.123
52 (ZM)	Villa Juárez	16.530	641.6	-0.150	18.376	54.751	642.7	4.201	2.814
53 (ZM)	Zaragoza	17.879	364.3	-0.164	9.952	31.032	383.5	3.954	2.361
Valor mínimo		15.040	304.2	-0.132	7.595	31.032	303.7	2.811	0.362
Valor Máximo		17.879	1130.4	-0.164	36.237	93.365	1193.3	4.640	3.043
54 (RH)	Abritas	13.017	824.8	-0.101	32.263	145.727	813.2	2.946	2.113
55 (RH)	Agua Buena	13.729	911.7	-0.112	33.049	121.638	948.6	3.031	1.365
56 (RH)	Altamira	13.698	916.5	-0.111	37.312	121.866	1044.3	2.604	1.075
57 (RH)	Aquismón	13.069	1250.9	-0.101	47.465	134.956	1235.7	3.381	1.188
58 (RH)	Ballesmi	14.064	1026.3	-0.117	37.441	109.390	1069.8	2.544	1.257
59 (RH)	Chapulhuacanito	13.380	1033.7	-0.106	43.199	128.188	1160.9	2.761	1.035
60 (RH)	Ciudad Santos	12.994	1201.3	-0.100	45.527	138.396	1188.6	3.319	1.627
61 (RH)	Damián Carmona	14.176	992.3	-0.118	35.339	107.099	1024.9	3.223	0.872
62 (RH)	Ébano	16.320	913.5	-0.146	31.270	52.678	1023.6	3.334	1.309
63 (RH)	El Coco	15.328	795.8	-0.134	30.322	78.658	949.0	2.966	1.744
64 (RH)	El Fiscal	15.056	863.6	-0.131	29.933	85.104	928.3	3.370	1.364
65 (RH)	El Naranjo	14.409	971.5	-0.122	34.152	101.011	1007.2	3.244	1.437
66 (RH)	El Peñón	14.177	1095.7	-0.119	38.711	104.207	1109.5	3.556	1.473
67 (RH)	El Pujal	13.344	988.5	-0.121	35.586	102.289	1039.3	3.129	1.249
68 (RH)	El Salto	14.374	985.0	-0.121	36.436	100.667	1062.7	3.182	0.905
69 (RH)	El Tigre	15.036	1003.3	-0.130	36.384	82.385	1098.3	3.230	0.805
70 (RH)	El Tulillo	15.684	751.8	-0.139	27.051	70.958	873.3	3.231	0.853
71 (RH)	Gallinas	13.126	1427.2	-0.101	59.225	127.425	1493.7	2.987	0.903
72 (RH)	Las Adjuntas	16.331	863.4	-0.146	27.385	54.728	956.0	3.147	1.052
73 (RH)	Maitinez	14.593	874.1	-0.125	30.031	97.961	911.2	3.254	1.465
74 (RH)	Micos	14.252	1030.3	-0.119	36.937	103.937	1068.3	3.251	1.589
75 (RH)	Moritas	13.806	1118.8	-0.112	43.236	114.221	1191.4	3.046	1.033

76 (RH)	Papagayos	14.868	949.0	-0.127	37.257	87.141	1110.0	2.921	0.970
77 (RH)	Requetemu	13.347	1187.2	-0.103	59.618	122.396	1517.1	2.320	0.603
78 (RH)	San Dieguito	14.190	1097.1	-0.118	39.701	104.020	1133.0	3.332	1.088
79 (RH)	San Felipe	15.564	965.8	-0.137	31.574	70.241	997.3	3.060	1.831
80 (RH)	San Juan del Meco	15.310	1115.7	-0.134	37.572	73.432	1148.7	3.861	0.873
81 (RH)	SM.Chalchicuatla	14.287	967.5	-0.120	34.556	104.293	1011.2	3.200	1.960
82 (RH)	San Vicente	15.010	894.8	-0.130	33.503	84.861	1020.3	3.157	1.134
83 (RH)	Santa Cruz	13.625	989.2	-0.110	36.346	123.760	1019.6	2.999	1.333
84 (RH)	Santa Rosa	14.193	1072.9	-0.116	55.320	98.263	1503.0	2.430	0.657
85 (RH)	Santiagoullo	14.080	1142.5	-0.117	39.792	106.013	1131.0	3.831	1.522
86 (RH)	Tamapatz	12.195	1291.4	-0.087	49.469	163.835	1214.3	3.866	2.224
87 (RH)	Tamuín	15.925	1014.0	-0.142	33.146	60.373	1059.9	3.904	1.496
88 (RH)	Tancuilín	13.113	1375.6	-0.101	53.620	129.995	1373.6	3.344	1.058
89 (RH)	Tanlacut	13.695	1339.5	-0.110	53.897	111.492	1431.1	3.225	0.923
90 (RH)	Tanlajás	13.780	935.8	-0.113	34.467	119.314	984.4	3.029	1.343
91 (RH)	Tanlú	14.993	1019.5	-0.129	36.750	82.965	1106.3	3.455	1.434
92 (RH)	Tanquián	14.920	883.7	-0.128	34.985	87.128	1053.4	2.847	0.893
93 (RH)	Tantzohuiche	14.147	1113.0	-0.117	44.534	103.595	1245.5	2.924	0.854
94 (RH)	Tansabaca	12.640	1736.8	-0.093	70.371	135.651	1681.9	3.842	1.334
95 (RH)	Temamatla	13.400	1209.9	-0.106	45.680	125.218	1220.1	3.254	1.205
96 (RH)	Tierra Blanca	13.676	1195.6	-0.111	44.736	116.904	1218.5	3.283	1.138
97 (RH)	Tlamaya	12.706	1413.1	-0.095	56.550	141.846	1400.2	3.341	1.048
98 (RH)	Velazco	16.598	787.9	-0.149	31.016	47.245	1027.7	3.023	1.256
99 (RH)	Veinte de Nov.	13.455	1167.0	-0.108	42.469	124.119	1153.5	3.558	1.802
100(RH)	Xilitla	12.678	1076.3	-0.094	43.657	151.882	1124.8	2.678	1.399
	Valor mínimo	12.195	751.8	-0.087	27.051	47.245	813.2	2.320	0.603
	Valor Máximo	16.598	1736.8	-0.149	70.371	163.835	1681.9	3.904	2.224

Simbología:

- 1 factor de frecuencia calculado, adimensional.
- 2 PMP en 24 horas puntual según método de Hershfield, en milímetros.
- 3 parámetro de forma (k) de la distribución GVE.
parámetro de escala (β) de la distribución GVE.
parámetro de ubicación (u) de la distribución GVE.
 PMP en 24 horas puntual según método de Koutsoyiannis (PMP_k).
- 4 (P_o) valor máximo observado de PMD anual, en milímetros.
(P_{Tr}) predicción de PMD con periodo de retorno (Tr) de 10000 años, en milímetros.

Cocientes de la PMP puntual

En las dos últimas columnas de la Tabla 5 se presentan los cocientes de la PMP en 24 horas, al máximo valor observado de *PMD* anual (P_o , columna 6, de la Tabla 1) y a la predicción de *PMD* de 10 000 años (P_{Tr} , tomada de la columna final de la Tabla 4). La moda y la mediana poblacional de tales cocientes se obtuvieron con base en la distribución Gamma Mixta (Campos-Aranda, 2005). En la Tabla 6 se citan los estadísticos anteriores y la media aritmética de ambos cocientes, en cada una de las tres zonas geográficas analizadas y el global para el estado de San Luis Potosí; así como los valores adoptados para una estimación rápida de la *PMP* en 24 horas puntual.

Tabla 6. Estadísticos de tendencia central de los cocientes de la PMP en 24 horas, en las tres zonas geográficas del estado de San Luis Potosí, México.

Zona geográfica o estado:	Media	Moda	Mediana	Adoptado
Cocientes PMP/P_o (número)	–	–	–	–
Altiplano Potosino (25)	3.779	3.689	3.749	3.75
Zona Media (28)	3.834	3.775	3.814	3.85
Región Huasteca (47)	3.170	3.126	3.155	3.15
Global para San Luis Potosí (100)	3.508	3.420	3.479	3.50
Cocientes PMP/P_{Tr} (número)	–	–	–	–
Altiplano Potosino (25)	1.993	1.423	1.809	1.75
Zona Media (28)	1.668	1.374	1.572	1.55
Región Huasteca (47)	1.257	1.156	1.224	1.25
Global para San Luis Potosí (100)	1.556	1.252	1.457	1.45

Para estimaciones más precisas se pueden construir curvas de isovalores de *PMP* en 24 horas, o bien realizar un transporte ponderado al sitio de interés, empleando las magnitudes del Cuadro 5 que sean cercanas y pertenezcan a la misma zona geográfica del sitio de interés.

Conclusiones

Este estudio de actualización de la estimación estadística de la precipitación máxima probable (PMP) en el estado de San Luis Potosí, México, tuvo las siguientes cuatro innovaciones: 1) se procesaron 100 registros de precipitación máxima diaria (PMD) anuales con un mínimo de 40 datos; 2) se aplicó el método estadístico de Hershfield y el probabilístico de Koutsoyiannis para estimar la *PMP* en 24 horas, adoptando el resultado mayor; 3) la estimación de la predicción de PMD de periodo de retorno 10 000 años, se realizó con base en las distribuciones de probabilidad Log-Pearson tipo III y General de Valores Extremos, esta última también ajustada con el método de los momentos L de orden mayor. Se adopta la estimación de menor valor del error estándar de ajuste; y (4) se detectaron ocho series de PMD con datos dependientes y tres con tendencia, a estos registros primero se les eliminó su componente determinística y después se les ajustaron las dos distribuciones citadas.

Este nuevo estudio de la PMD del estado de San Luis Potosí, México, se contrastó en 57 estaciones comunes con el elaborado por la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos, con datos hasta 1974, en los periodos de retorno de 100, 1000 y 10 000 años disponibles en mapas de curvas isomáximas. Según el contraste realizado entre la predicción actual y la del Boletín de Tormentas (SRH, 1976), se tienen valores de sus cocientes medianos de 1.25, 1.50 y 1.95, para los tres periodos de retorno citados; por lo cual, las predicciones recientes son superiores a las del estudio de 1976.

De acuerdo con los resultados concentrados en la Tabla 5, se observa que las 100 estimaciones de *PMP* en 24 horas muestran gran variabilidad, fluctuando en el Altiplano Potosino de 284.7 mm en Santa María del Refugio a 861.0 mm en Arista. En la Zona Media varían de 304.2 mm, en Ojo Caliente, a 1 193.3 mm en Presa Álvaro Obregón, por último, en la Región Huasteca fluctúan de 824.8 mm en Abritas, a 1 681.9 mm en Tansabaca.

Con respecto a los cocientes, en cada una de las 100 localidades procesadas del estado de San Luis Potosí, entre la *PMP* en 24 horas y la precipitación máxima diaria observada (P_o) del registro y la asociada al periodo de retorno de 10 000 años (P_{Tr}), se puede indicar que son bastante uniformes o estables, ya que fluctúan poco y sus valores centrales son semejantes, como se observa en la Tabla 6; pudiéndose recomendar 3.50 para el primer cociente, y 1.45 para el segundo, en el estado de San Luis Potosí, México.

Por último, se recomienda llevar a cabo este tipo de estudios de la *PMP*, en otras regiones hidrológicas o estados del país, ahora que existen registros más amplios y que los análisis probabilísticos permiten procesar series con datos dependientes o con tendencia.

Agradecimientos

Se agradece al Ing. Armando Rocha Hernández de la Dirección Local San Luis Potosí de la CONAGUA, el haber proporcionado al autor los archivos en Excel de la información climatológica disponible en el estado, así como la excelente disposición para verificar y/o corregir los valores extremos de cada serie de PMD.

Se agradecen al árbitro anónimo 1 las correcciones ortográficas sugeridas y los cuestionamientos temáticos planteados, los cuales permitieron hacer este estudio más explícito.

Referencias

- Benson, M. A. (1962). Plotting positions and economics of engineering planning. *Journal of Hydraulics Division*, 88(6), 57–71.
- Bobée, B. (1975). The Log–Pearson type 3 distribution and its application to Hydrology. *Water Resources Research*, 11(5), 681–689.
- Bobée, B. & Ashkar, F. (1991). *The Gamma Family and derived distributions applied in Hydrology*. Littleton, Colo., U.S.A: Water Resources Publications.

- Campos–Aranda, D. F. (1998). Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí. *Ingeniería Hidráulica en México*, 13(3), 45-66.
- Campos–Aranda, D. F. (2005). *Agroclimatología Cuantitativa de Cultivos*. Ciudad de México, México: Editorial Trillas.
- Campos–Aranda, D. F. (2012). Técnicas asociadas al Análisis de Frecuencia de Crecientes en cuencas con desarrollo urbano. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 13(3), 385–392.
- Campos–Aranda, D. F. (2015). Búsqueda del Cambio Climático en la temperatura máxima de mayo en 16 estaciones climatológicas del estado de Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(3), 143–160.
- Campos–Aranda, D. F. (2016). Ajuste de las distribuciones GVE, LOG y PAG con momentos L de orden mayor. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(1), 131–142.
- Chow, V. T. (1964). Section 8–I: Statistical and Probability Analysis of Hydrologic Data. Frequency Analysis. In: Chow, V. T. (ed.). *Handbook of Applied Hydrology*, (pp. 8.1–8.42). New York, U.S.A.: McGraw–Hill Book Co.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). Estimated Limiting Storms. In: Autor (eds.) *Applied Hydrology* (pp. 470–475). New York, U.S.A.: McGraw–Hill Book Co.
- Clarke, R. T. (1973). The estimation of floods with given return period. En: Autor (eds.) *Mathematical Models in Hydrology* (pp. 130–146). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Davis, P. J. (1972). Gamma Function and related functions. In: Abramowitz, M. & Stegun, I. A. (eds.). *Handbook of Mathematical Functions* (pp. 253–296). New York, U.S.A.: Dover Publications. Ninth printing.
- Gupta, R. S. (2008). Computation of Peak Flow from. In: Autor (eds.) *Precipitation Hydrology and Hydraulic Systems* (3th ed). (pp. 458–468). Long Grove, Illinois, U.S.A.: Waveland Press, Inc.
- Hershfield, D. M. (1961). Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of Hydraulics Division*, 87(HY5), 99–106.
- Hershfield, D. M. (1965). Method for estimating probable maximum rainfall. *Journal of American Water Works Association*, 57(8), 965–972.
- Hosking, J. R. & J. R. Wallis. (1997). Appendix: L–moments for some specific distributions. In: Autor (eds.). *Regional Frequency Analysis. An*

- approach based on L-moments.* (pp. 191–209). England: Cambridge University Press.
- Jakob, D. (2013). Nonstationarity in Extremes and Engineering Design. In: AghaKouchak, A. Easterling, D., Hsu, K., Schubert, S. & Sorooshian, S., (Eds.). *Extremes in a Changing Climate.* (pp. 363–417). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Khalilq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J. C., Gachon, P. & Bobée, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, 329(3–4), 534–552.
- Kite, G. W. (1977).. Comparison of frequency distributions. In: Autor (eds.). *Frequency and Risk Analyses in Hydrology* (pp. 156–168). Fort Collins, Colorado, U.S.A.: Water Resources Publications.
- Kottegoda, N. T. (1980).. Analysis of hydrologic time series. In: Autor (eds.). *Stochastic Water Resources Technology* (pp. 20–66). London, England: The MacMillan Press.
- Koutsoyiannis, D. (1999). A probabilistic view of Hershfield's method for estimating probable maximum precipitation. *Water Resources Research*, 35(4), 1313–1322.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A. & Paulhus, J. L. H. (1988). *Hydrology for Engineers.* London, England: McGraw–Hill Book Co.
- Machiwal, D. & Jha, M. K. (2008). Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: Applications to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 353–366.
- McCuen, R. H. & Thomas, W. O. (1990). Flood frequency analysis techniques for urbanizing watersheds (pp. 35–46). In: *Symposium Proceedings on Urban Hydrology.* Bethesda, Maryland, U.S.A.: American Water Resources Association.
- Meylan, P., Favre, A. C. & Musy, A. (2012). Selecting and checking data series. In: Autor (eds.) *Predictive Hydrology. A Frequency Analysis Approach.* (pp. 29–70). Boca Raton, Florida, U.S.A.: CRC Press. NERC, Natural Environment Research Council. (1975). Volume I: Hydrological Studies (pp. 87–97). In: *Flood Studies Report.* London, England: Natural Environment Research Council.
- Ostle, B. & Mensing, R. W. (1975).. Regression analysis. In: Autor (eds.). *Statistics in Research* (3th ed.) (pp. 165–236). Ames, Iowa, U.S.A.: Iowa State University Press.

- Papalexiou, S. M. & Koutsoyiannis, D. (2013). Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research*, 49(1), 187–201.
- Rao, A. R. & Hamed, K. H. (2000).. Tests on hydrologic data. In: Autor (eds.) *Flood Frequency Analysis* (pp. 12–21). Boca Raton, Florida, U.S.A.: CRC Press.
- Raynal–Villaseñor, J. A. (1984). La distribución General de Valores Extremos en Hidrología. 2. Estado actual y aplicaciones. En: Raynal–Villaseñor, J. A. *8º Congreso Nacional de Hidráulica*, Tomo I, pp. B.9–B.19. Toluca, Estado de México: Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Salas, J. D. (1993). Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series. In: Maidment, D.R. (ed.). *Handbook of Hydrology* (pp. 19.1–19.72). New York, U.S.A.: McGraw–Hill, Inc.
- Salas, J. D., Gavilan, G., Salas, F. R., Julien, P. Y. & Abdullah, J. (2014). Uncertainty of the PMP and PMF.). In: Eslamian S. (ed.). *Handbook of Engineering Hydrology. Modeling, Climate Change and Variability* (pp. 575–603). Boca Raton, Florida, U.S.A.: CRC Press.
- Schulz, E. F. (1976). Section Ten: Applications to Engineering Problems. In: Autor (eds.) *Problems in Applied Hydrology*. (pp. 459–491). Fort Collins, Colorado, U. S. A.: Water Resources Publications.
- SRH, Secretaría de Recursos Hidráulicos. (1976). *Boletín de Tormentas Máximas Observadas y Probables en México en 24 horas (hasta 1974)*. México, D. F.: Subsecretaría de Planeación. Dirección general de Estudios. Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M. & Foufoula–Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. In: Maidment, D. R. (ed.). *Handbook of Hydrology* (pp. 18.1–18.66). New York, U.S.A.: McGraw–Hill, Inc.
- Wang, Q. J. (1997a). Using higher probability weighted moments for flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 194(1–4), 95–106.
- Wang, Q. J. (1997b). LH moments for statistical analysis of extreme events. *Water Resources Research*, 33(12), 2841–2848.
- Water Resources Council, WRC. (1977). *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency*. Bulletin # 17A of the Hydrology Committee. Washington, D. C., U.S.A.: Water Resources Council..
- Weiss, L. L. (1964). Ratio of true to fixed–interval maximum rainfall. *Journal of Hydraulics Division*, 90(HY1), 77–82.

- WMO, World Meteorological Organization (1971). Standard tests of significance to be recommended in routine analysis of climatic fluctuations In: *Climatic Change* (pp. 58–71). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- WMO, World Meteorological Organization (1973). Statistical estimates. In: *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. (pp. 95–107). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.