

Estimación probabilística de crecientes estacionales con base en registros mensuales de gasto máximo

• Daniel Francisco Campos-Aranda* •

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

*Autor de correspondencia

Resumen

Campos-Aranda, D. F. (noviembre-diciembre, 2014). Estimación probabilística de crecientes estacionales con base en registros mensuales de gasto máximo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 5(6), 177-187.

Las crecientes estimadas por épocas o lapsos mensuales del año están siendo utilizadas para el dimensionamiento hidrológico del volumen de control en medianos y grandes embalses, así como para proteger actividades en cauces que tienen una duración breve o estacional. También se ha sugerido definir planicies de inundación y zonas de riesgo con base en las *crecientes estacionales*, en ríos que tienen un comportamiento marcadamente estacional. En este trabajo se describe con detalle el aspecto de la definición de las épocas, así como el método basado en las series anuales de gasto máximo mensual para estimar las respectivas *predicciones estacionales*. Se realiza la aplicación numérica de tal procedimiento a los datos de la estación hidrométrica Huites, en el río Fuerte de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa). Se analizan los resultados y se concluye que tanto las crecientes de épocas de cuatro meses, como aquellas de tres meses o por estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño) son todas menores que las anuales, en los periodos de retorno menores de 100 años. Por último, se formulan dos conclusiones que destacan la importancia de las crecientes estacionales y la simplicidad del método descrito para su estimación.

Palabras clave: predicciones estacionales, series anuales, pruebas estadísticas, distribuciones de probabilidad LP3, GVE, LOG y Wakeby, error estándar de ajuste.

Introducción

En el mundo, los recursos hidráulicos están bajo amenaza como nunca antes en la historia de la humanidad y por ello el abastecimiento de agua potable no es seguro para muchas ciudades o zonas económicas (industriales y/o agrícolas). En específico, las inundaciones, los déficits de

Abstract

Campos-Aranda, D. F. (November-December, 2014). *Probabilistic Estimation of Seasonal Floods Based on Maximum Flow Monthly Records*. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 5(6), 177-187.

Floods estimated by seasons or monthly periods of the year, are being used for hydrological dimensioning of control volume in medium and large reservoirs, as well as to protect activities in river-beds that are short in duration or seasonal. It has been suggested to define floodplains and areas of risk based on seasonal floods in rivers that behave very seasonally. This paper describes in detail the defining aspect of the seasons, and the method based on the annual series of maximum monthly flow to estimate the respective seasonal predictions. The numerical application of this procedure to data in Huites hydrometric station at Fuerte River of the Hydrologic Region No. 10 (Sinaloa) was carried out. The results are discussed concluding that both seasonal floods of four months, as well those of three months or seasons of year (winter, spring, summer and fall) are all minor than the annual ones, in the lower return periods of 100 years. Finally, two conclusions are formulated which point out the importance of seasonal floods and the simplicity of the method described for that estimation.

Keywords: Seasonal predictions, annual series, statistical tests, probability distributions LP3, GEV, LOG and Wakeby, standard error of fit.

Recibido: 28/10/13

Aceptado: 03/06/14

agua y los problemas asociados con las aguas residuales se han incrementado principalmente en los países más poblados. El reto para los hidrólogos e ingenieros ambientales es encontrar las soluciones más convenientes para tales amenazas. Por ello, las estimaciones hidrológicas confiables son actualmente extremadamente importantes, no sólo para la sociedad civil, sino

para los organismos encargados del manejo de los recursos hidráulicos.

El *análisis de frecuencia de crecientes* (AFC) es una de las tareas importantes de la hidrología superficial, ya que permite el dimensionamiento de puentes y alcantarillas, y otras obras de protección como diques y bordos, así como de los vertedores de los embalses de aprovechamiento. Además, la operación o manejo de las presas de control y la operación de los embalses de múltiples propósitos depende de la magnitud de sus crecientes de diseño.

Los embalses o presas son las obras hidráulicas más eficientes para integrar o conjuntar el aprovechamiento y el manejo de los recursos hidráulicos. Ellos alteran la distribución espacial y temporal del escurrimiento y por lo común sirven a varios propósitos, como el abastecimiento de una cierta demanda, el control de las crecientes, la generación de energía hidroeléctrica, los usos recreativos e incluso la navegación.

En la operación de los medianos y grandes embalses, el nivel máximo del almacenamiento debe quedar por debajo de aquel donde inicia el volumen de control de crecientes durante la época en que éstas ocurren. Lo anterior para asegurar tal función de control. Actualmente, el volumen destinado al control de crecientes se estima con base en el registro de gastos y volúmenes máximos anuales, de manera que se está ignorando la información relativa a la *ocurrencia estacional* de tales crecientes anuales. Lo anterior origina que siempre se mantenga libre el volumen de control de crecientes durante todo el año, cuando podría reducirse en épocas en que se esperan crecientes menores (Fang, Guo, Wang, Liu, & Xiao, 2007).

La *segmentación* de la temporada o época de crecientes en *subépocas* puede ser muy útil en la planeación y el manejo de los grandes embalses. Estas subépocas usualmente se designan como época previa de crecientes, época de crecientes y época posterior de crecientes; en la temporada central, el volumen de control debe mantenerse y puede variar en las adyacentes. Esta práctica

produce mayores beneficios en generación de energía hidroeléctrica y en abastecimiento, sin incrementar el riesgo de crecientes. Sin embargo, tal segmentación objetiva es difícil, ya que las crecientes son inciertas en magnitud y ocurrencia (Liu, Guo, Xiong, & Chen, 2010; Chen, Singh, Guo, Fang & Liu, 2013).

Cuando cada mes es una *subépoca* existen varios enfoques para segmentar y uno de ellos es en términos de los diferentes fenómenos meteorológicos o climáticos que generan las crecientes (Waylen & Woo, 1982), otro puede ser con base en el histograma de ocurrencias de la serie anual de crecientes. Las crecientes estacionales son necesarias para la evaluación de los riesgos y de los daños por inundación en los cultivos anuales y perennes (Metcalf, 1997).

Otro ejemplo del uso inapropiado de las crecientes de diseño anuales ocurre cuando la actividad por proteger dentro del cauce tiene duración corta o bien se desarrolla en una época específica del año. Tal es el caso de los dimensionamientos de las ataguías o represas que dejan seco un tramo de cauce para fines constructivos por unos cuantos meses y en una temporada específica. La necesidad de crecientes de diseño estacionales también ocurre cuando se dimensiona el gasto ecológico por épocas del año, según las especies de peces por proteger (McCuen & Beightley, 2003). Por último, en cuencas donde las crecientes son marcadamente estacionales, el establecimiento de las áreas potenciales de inundación debe ser definida con base en un AFC estacional (Durrans, Eiffe, Thomas, & Goranflo, 2003).

Para casos como los descritos, es más apropiado el AFC estacional; el uso de crecientes de diseño de base anual puede causar un sesgo en el diseño, el cual consiste en una menor exactitud y en un incremento innecesario en los costos del proyecto (McCuen & Beightley, 2003).

Los *objetivos* de este trabajo fueron los tres siguientes: (1) describir en cuáles diseños hidrológicos son más convenientes las crecientes estacionales que las anuales, lo anterior fue abordado en los párrafos anteriores;

(2) exponer de manera detallada la estimación de las predicciones estacionales mediante una técnica simple basada en las series anuales de gastos máximos estacionales; la aplicación numérica de tal procedimiento se desarrolló con base en las crecientes máximas mensuales de la estación hidrométrica Huites, en el río Fuerte de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa); 3) citar de manera breve otros enfoques recientes de estimación de las crecientes estacionales.

Métodos, datos y resultados

Enfoque de crecientes máximas estacionales

Como se indicó brevemente, un problema común en el AFC realizado con series anuales de máximos implica que sus eventos pueden proceder de procesos distintos, ya que la precipitación máxima pudo haber sido originada por diferentes tipos de tormentas, como son las convectivas de verano y las originadas por frentes fríos en invierno o frentes cálidos asociados con los huracanes. Además, las crecientes anuales originadas por lluvia o por deshielo siguen modelos probabilísticos o distribuciones diferentes (Stedinger, Vogel, & Foufoula-Georgiou, 1993). Matemáticamente, la serie anual de máximos A puede ser considerada como el máximo de los eventos máximos del verano V o del invierno I , es decir que:

$$A = \max(V, I) \quad (1)$$

donde V e I pueden estar definidos por un lapso rígido del calendario, o bien libremente, según un periodo climático o de características físicas de cada fenómeno. Siendo $F_V(v)$ y $F_I(i)$ las funciones de distribución de probabilidades (FDP) de las variables aleatorias V e I ; entonces, si las magnitudes de los eventos del verano y del invierno son estadísticamente independientes, lo que significa que el conocimiento de uno no afecta la distribución de probabilidades del otro, la FDP de A será (Stedinger *et al.*, 1993; Fang *et al.*, 2007; Chen, Guo, Yan, Liu, & Fang, 2010):

$$F_A(a) = P[A = \max(V, I) \leq a] = F_V(a) \cdot F_I(a) \quad (2)$$

Por lo tanto, $F_A(a)$ siempre será menor o igual al menor valor de $F_V(a)$ o $F_I(a)$, ya que ambos varían de 0 a 1. En otras palabras, la curva de frecuencias anual siempre se ubicará en o sobre la mayor de las curvas de frecuencia estacionales cuando son dibujadas de manera conjunta en un papel de probabilidad (Stedinger *et al.*, 1993; Chen *et al.*, 2010).

La estimación de las crecientes estacionales mediante procesamiento probabilístico de las series anuales de gasto máximo, obtenidas éstas en cada época establecida, es el más simple y conveniente de los enfoques que existen para obtener tales predicciones por épocas o lapsos estacionales (Metcalf, 1997). En México es factible su aplicación debido a la existencia en cada estación hidrométrica o de aforos de los llamados registros de gastos máximos mensuales de cada año (IMTA, 2003).

Datos por procesar

La estación hidrométrica Huites, con clave 10037, según el sistema BANDAS (IMTA, 2003), se ubica al norte de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa), sobre el río Fuerte y tiene un área de cuenca de 26 020 km². Inició su operación en septiembre de 1941 y cuenta con datos hasta diciembre de 1992, fecha en que comienza la construcción de la presa Huites, después llamada Luis Donaldo Colosio. Aldama, Ramírez, Aparicio, Mejía y Ortega (2006) indican que el río Fuerte presenta un primer periodo de crecientes de verano desde finales de junio hasta mediados de septiembre y otro de invierno que abarca de mediados de diciembre hasta principios de marzo. La serie anual de máximos de la estación Huites tiene 52 datos (se muestra en la segunda columna del cuadro 1) y fue integrada, al igual que las otras series estacionales que serán procesadas, a partir de las nueve hojas de registros de gastos máximos mensuales que se obtienen del sistema BANDAS, que incluyen además día, hora y lectura de escala correspondientes

Cuadro 1. Series anuales de gastos máximos instantáneos (m³/s) integradas por épocas, con base en el registro mensual de la estación hidrométrica Huites de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

Año	Serie anual	Épocas de cuatro meses			Épocas de tres meses			
		nov-feb	mar-jun	jul-oct	ene-mar	abr-jun	jul-sep	oct-dic
1941	2 085	-	-	-	-	-	-	2 085
1942	2 531	2 085	167	2 531	177	69	2 531	2 038
1943	14 376	428	414	3 283	34	414	1 397	14 376
1944	2 580	14 376	979	1 025	2 580	89	1 025	1 263
1945	1 499	1 263	13	1 499	197	8	1 499	1 250
1946	1 165	62	151	1 165	62	151	1 165	428
1947	1 127	186	205	1 127	186	205	1 127	634
1948	3 215	3 215	119	799	3 215	119	799	623
1949	10 000	10 000	141	2 298	10 000	141	2 298	895
1950	3 229	3 229	261	1 384	3 229	261	1 384	156
1951	677	38	33	588	38	33	588	677
1952	1 266	677	356	1 266	356	205	1 266	238
1953	1 025	238	57	1 025	68	57	1 025	26
1954	955	540	171	955	540	171	955	407
1955	4 780	4 780	23	1 070	4 780	23	1 070	562
1956	696	205	279	696	205	279	696	51
1957	593	156	83	593	156	27	489	593
1958	3 010	362	894	3 010	894	307	3 010	849
1959	1 908	652	109	1 908	652	109	1 346	1 908
1960	15 000	15 000	29	1 046	15 000	15	1 046	985
1961	1 396	1 396	209	906	1 396	209	906	832
1962	1 620	912	65	1 620	912	65	893	1 620
1963	2 702	59	33	1 054	59	33	1 054	2 702
1964	1 319	2 702	105	1 319	50	105	1 319	216
1965	1 944	360	53	1 788	360	32	1 788	1 944
1966	2 420	1 944	689	2 420	340	689	2 420	131
1967	2 506	34	273	1 311	19	273	1 311	2 506
1968	1 534	2 506	704	1 534	1 118	233	1 534	386
1969	1 508	386	42	1 508	300	42	1 508	736
1970	1 558	736	206	1 558	206	30	1 558	329
1971	2 200	56	490	2 200	26	490	1 176	2 200
1972	2 225	732	346	2 040	732	346	1 142	2 225
1973	7 960	7 960	373	1 546	7 960	77	1 546	64
1974	3 790	132	15	3 790	132	15	3 790	3 315
1975	1 095	3 315	21	1 095	533	21	1 095	59
1976	2 677	50	48	2 677	50	48	1 350	2 677
1977	1 135	289	154	1 135	120	153	1 135	267
1978	4 790	99	181	4 790	181	98	4 790	1 750
1979	6 860	6 860	480	1 001	6 860	480	1 001	30
1980	1 496	17	89	1 496	17	89	1 496	1 198
1981	4 828	2 052	2 448	4 828	2 448	138	2 280	4 828
1982	2 450	262	9	2 450	262	7	2 422	2 450
1983	8 275	1 572	8 275	1 007	8 275	195	893	1 400
1984	5 580	1 400	960	1 623	202	960	1 623	5 580
1985	3 585	5 580	308	1 250	3 585	308	1 250	820
1986	1 349	172	194	1 349	44	194	1 349	437
1987	1 429	434	34	1 429	63	34	1 429	679
1988	1 866	679	145	1 866	47	145	1 866	133
1989	1 869	1 869	48	1 414	1 869	37	1 414	1 230
1990	11 559	1 230	256	3 544	377	92	970	11 559
1991	2 563	11 559	588	1 722	2 370	83	1 722	2 563
1992	2 025	2 563	529	1 349	2 025	177	1 349	174

a cada dato. Cada hoja presenta seis años del registro.

Definición de épocas o lapsos estacionales

En la figura 1 se muestra el histograma de ocurrencias por meses de las crecientes anuales. Se observan claramente las dos épocas de crecientes citadas por Aldama *et al.* (2006), la primera abarca de julio a octubre y la segunda de noviembre a marzo, lo anterior, definido con base en los dos histogramas de frecuencias absolutas que se identifican en tal figura. Entonces, un primer análisis por épocas de cuatro meses queda establecido con base en la estación de crecientes de julio a octubre, después sigue la de noviembre a febrero y, por último, la de marzo a junio. Al tomar en cuenta la fecha de inicio de operación de la estación de aforos Huites, se comienza por integrar la época de noviembre a febrero. Las tres series anuales estacionales citadas se muestran en las columnas 3, 4 y 5 del cuadro 1.

Un segundo análisis por épocas de tres meses se estableció por medio de las estaciones del año, de manera que se inicia de enero a marzo (invierno), después sigue abril a junio

(primavera), se continúa de julio a septiembre (verano) y se termina de octubre a diciembre (otoño). Las series anuales respectivas se muestran en las cuatro últimas columnas del cuadro 1.

Verificación de la calidad estadística de las series estacionales

El objetivo del análisis de frecuencia de crecientes (AFC) consiste en interpretar un registro histórico de eventos hidrológicos en términos de sus futuras probabilidades de excedencia. Como los eventos que integran cada registro, muestra o serie son anuales, el recíproco de la probabilidad de excedencia es el llamado periodo de retorno o intervalo promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor. Asumiendo que no existen errores en los datos por procesar, el AFC involucra dos fuentes de incertidumbre: (1) la elección de la distribución de probabilidades teórica por utilizar, para modelar la población de la que proviene la muestra disponible y (2) la estimación de los parámetros de ajuste de tal modelo probabilístico seleccionado (Bobée & Ashkar, 1991).

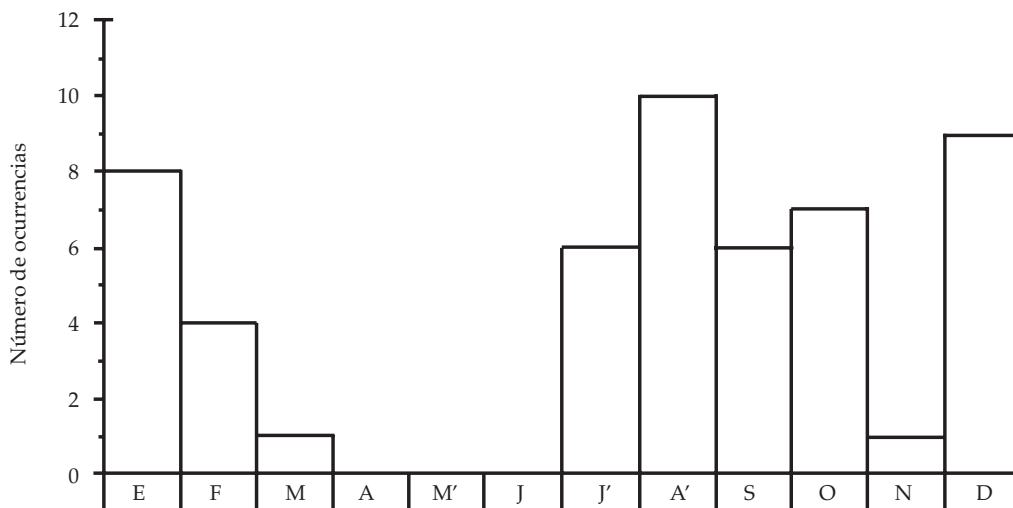


Figura 1. Histograma de ocurrencias mensuales de las crecientes anuales observadas en la estación hidrométrica Huites, en el río Fuerte de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

Por otra parte, para que los resultados del AFC sean teóricamente válidos, los datos de la serie por procesar deben cumplir ciertos criterios estadísticos, como aleatoriedad, independencia, homogeneidad y estacionalidad, los cuales implican, en resumen, que los datos proceden de una variable aleatoria que se origina por un único proceso natural que no ha cambiado en el tiempo y que por ello está libre de componentes determinísticas, como persistencia, tendencia, cambios en la media, y exceso o déficit de variabilidad. Para probar tales componentes se aplicaron las siguientes siete pruebas estadísticas: (1) la de Von Neumann, que detecta pérdida de aleatoriedad contra componentes determinísticas no especificadas (WMO, 1971; Buishand, 1982); (2) la de Anderson, que busca persistencia a través del coeficiente de correlación serial de orden 1 (Linsley, Kohler, & Paulhus, 1988); (3) la de Sneyers, también de persistencia, es más recomendada en registros que no son normales (WMO, 1971); (4) la de Kendall detecta tendencia, sobre todo si ésta es lineal (Kottegoda, 1980); (5) la de Spearman también de tendencia, pero más general (WMO, 1971); (6) la de Cramer permite comparar medias por subperiodos (WMO, 1971), y por último, (7) la de Bartlett, que busca inconsistencia en la dispersión (WMO, 1971; Ruiz-Maya, 1977).

Se aplicaron dos pruebas de Cramer, ambas considerando el subperiodo de la mitad del registro, una comenzado al inicio y otra en medio. Respecto a la prueba de Bartlett, se realizaron tres con tres, cuatro y cinco subperiodos. Exclusivamente resultaron no homogéneas por variabilidad la serie estacional de cuatro meses de marzo a junio y la de tres meses de octubre a diciembre. También resultó no homogénea en la primera prueba de Cramer la serie de cuatro meses de julio a octubre. Ante estos resultados, las ocho series establecidas (cuadro 1) fueron sometidas al AFC.

Obtención de predicciones estacionales

Se decidió analizar probabilísticamente con cinco distribuciones o modelos las ocho series

anuales de crecientes mostradas en el cuadro 1. Se utilizaron las cuatro distribuciones que han sido establecidas bajo precepto: la log-Pearson tipo III (LP3) en Estados Unidos, la General de Valores Extremos (GVE) y la Logística Generalizada (LOG) en Inglaterra y la Pearson tipo III (PE3) en China. Además, se aplicó la distribución Wakeby de cinco parámetros de ajuste. Al tomar en cuenta los diseños hidrológicos que se deben abordar con las *crecientes estacionales* de acuerdo con lo descrito en la Introducción, se consideró conveniente obtener las predicciones asociadas con los seis periodos de retorno (Tr) siguientes: 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

El modelo LP3 se ajustó con base en el método de momentos en el dominio logarítmico y real (Bobée & Ashkar, 1991). La distribución GVE se aplicó por medio de cuatro métodos: momentos, sextiles, máxima verosimilitud y momentos L (Stedinger *et al.*, 1993; Hosking & Wallis, 1997). El modelo LOG se ajustó únicamente con el método de momentos L (Hosking & Wallis, 1997; Campos-Aranda, 2013). La distribución PE3 de dos y tres parámetros de ajuste se aplicó con base en los métodos de momentos y de máxima verosimilitud (Stedinger *et al.*, 1993; Rao & Hamed, 2000). Por último, el modelo Wakeby se ajustó sólo con el método de optimización (Campos-Aranda, 2001). En la figura 2 se muestran gráficamente los ajustes de la distribución GVE a las series anual y estacional de cuatro meses de marzo a junio. Las posiciones gráficas de la distribución empírica se obtuvieron con la fórmula de Weibull (Bobée & Ashkar, 1991; Rao & Hamed, 2000).

En los cuadros 2 y 3 se han concentrado las predicciones obtenidas con las cinco distribuciones de probabilidad utilizadas para la serie anual y las estacionales de cuatro meses en el primero y para las muestras por estaciones del año en el segundo. Se observa, con respecto al error estándar de ajuste (Kite, 1977), que los cinco modelos probabilísticos utilizados conducen a valores similares, siendo las distribuciones LOG y Wakeby las que reportan los valores mayores y menores,

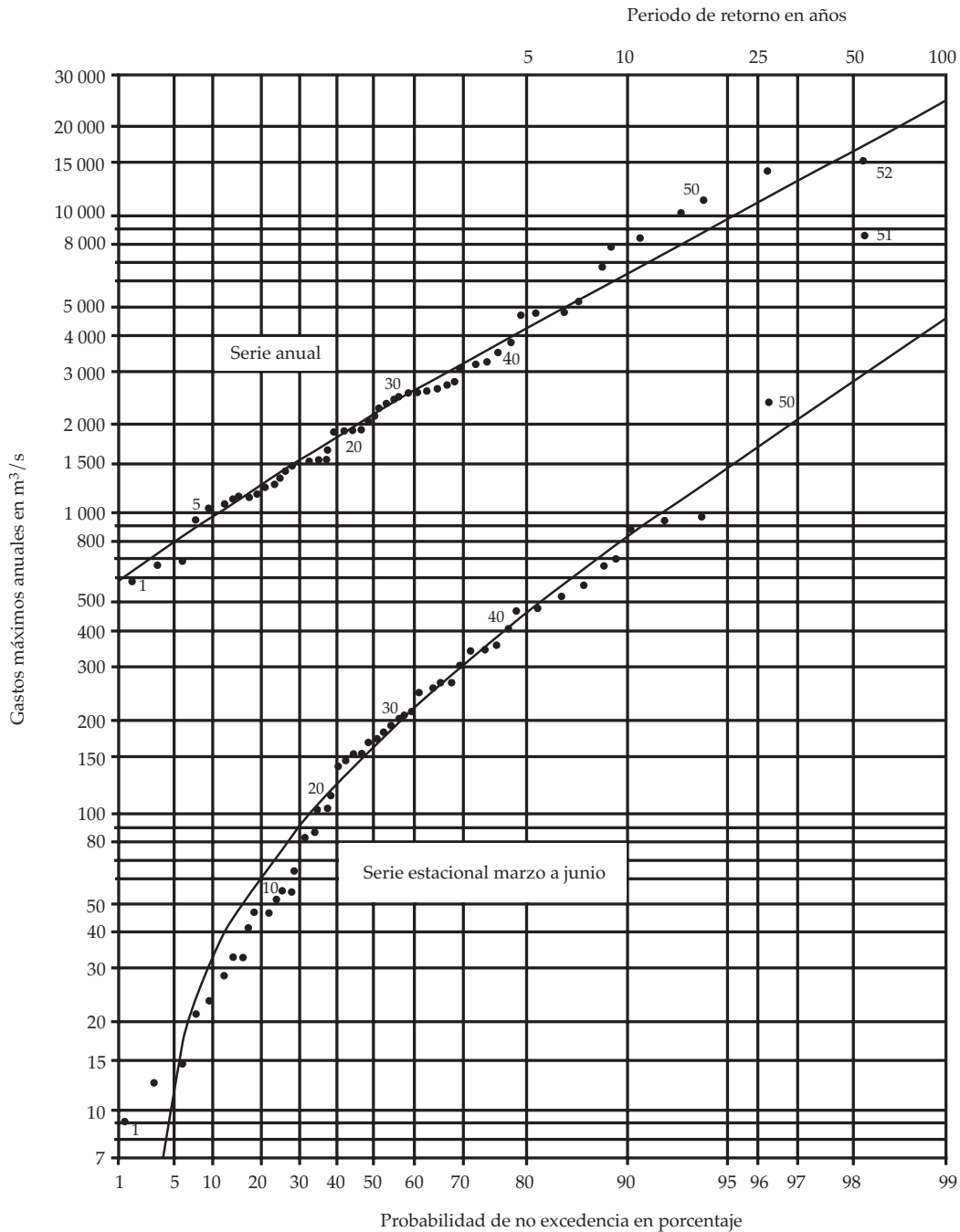


Figura 2. Distribución empírica y modelo GVE en las series de crecientes anuales y estacionales de marzo a junio de la estación hidrométrica Huites, dibujadas en papel de probabilidad log-normal.

respectivamente. Lógicamente, la diferencia entre los *EEA* de los modelos de tres parámetros de ajuste y la distribución Wakeby de cinco, es notable dada su flexibilidad. Debido a tal

similitud de valores de *EEA* encontrados, se aceptó obtener como *predicciones adoptadas* los valores medianos de cada periodo de retorno analizado.

Análisis de los resultados

En el cuadro 2, se observa, con respecto a las predicciones anuales, que la época de marzo a junio muestra las menores crecientes estacionales, sobre todo en los periodos de retorno (Tr) bajos; le sigue la época julio a octubre. Por el contrario, la estación de noviembre a febrero presenta crecientes estacionales elevadas en los Tr altos, ello se

debe a que en tal lapso ocurren los tres gastos máximos anuales más grandes de todo el registro, 10 000, 15 000 y 11 559 m^3/s en los años 1949, 1960 y 1991, respectivamente. En general, todas las crecientes estacionales son menores que las anuales en los Tr menores de 100 años.

Los resultados del cuadro 3 también muestran que todas las predicciones estacionales son inferiores a las anuales en los Tr menores de 100 años. Ahora, la época de

Cuadro 2. Predicciones anual y estacionales (m^3/s) en épocas de cuatro meses para los datos de la estación hidrométrica Huites, de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

Época y modelo probabilístico (método de ajuste)	EEA (m^3/s)	Periodos de retorno en años					
		5	10	25	50	100	500
AFC anual							
1. Distribución LP3 (MoDL)	791.7	4 325	6 599	10 856	15 385	21 449	44 457
2. Distribución GVE (MáxV)	823.2	4 214	6 510	11 182	16 639	24 634	60 727
3. Distribución LOG (MoL)	1 056.4	4 153	6 072	9 694	13 680	19 250	42 450
4. Distribución Pearson tipo III (Mo3p)	787.0	4 839	7 194	10 569	13 286	16 126	23 132
5. Distribución Wakeby (OPT)	627.3	4 976	7 571	11 982	16 380	22 071	43 227
Predicciones adoptadas	-	4 325	6 599	10 856	15 385	21 449	43 227
AFC estacional (noviembre-febrero)							
1. Distribución LP3 (MoDL)	995.3	3 093	6 224	12 808	20 143	29 999	65 491
2. Distribución GVE (MoL)	1 258.0	3 004	5 087	9 206	13 889	20 593	49 624
3. Distribución LOG (MoL)	1 345.1	2 932	4 915	8 873	13 453	20 136	50 185
4. Distribución Pearson tipo III (Mo2p)	914.2	3 663	6 260	10 139	13 344	16 749	25 317
5. Distribución Wakeby (OPT)	764.7	3 988	6 877	11 987	17 192	23 975	49 001
Predicciones adoptadas	-	3 093	6 224	10 139	13 889	20 593	49 624
AFC estacional (marzo-junio)							
1. Distribución LP3 (MoDR)	711.8	516	1 093	2 231	3 376	4 758	8 795
2. Distribución GVE (Sex)	794.5	470	837	1 672	2 751	4 478	13 621
3. Distribución LOG (MoL)	823.9	439	781	1 556	2 564	4 190	12 942
4. Distribución Pearson tipo III (Mo2p)	744.5	403	1 111	2 472	3 772	5 273	9 431
5. Distribución Wakeby (OPT)	134.1	291	635	2 470	7 658	24 414	369 666
Predicciones adoptadas	-	439	837	2 231	3 376	4 758	12 942
AFC estacional (julio-octubre)							
1. Distribución LP3 (MoDL)	174.0	2 245	2 889	3 859	4 707	5 673	8 476
2. Distribución GVE (MoL)	184.2	2 202	2 838	3 840	4 762	5 860	9 310
3. Distribución LOG (MoL)	208.8	2 166	2 767	3 762	4 732	5 956	10 215
4. Distribución Pearson tipo III (Mo3p)	179.2	2 290	2 947	3 833	4 517	5 214	6 880
5. Distribución Wakeby (OPT)	131.9	2 349	3 106	4 207	5 143	6 197	9 296
Predicciones adoptadas	-	2 245	2 889	3 840	4 732	5 860	9 296

Simbología:

EEA error estándar de ajuste.
 MoDL momentos en el dominio logarítmico.
 MoDR momentos en el dominio real.
 MáxV máxima verosimilitud.

MoL momentos L .
 Sex sextiles.
 Mo3p momentos con tres parámetros de ajuste.
 OPT optimización.

Cuadro 3. Predicciones estacionales (m^3/s) en épocas de tres meses para los datos de la estación hidrométrica Huites, de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

Época y modelo probabilístico (método de ajuste)	EEA (m^3/s)	Periodos de retorno en años					
		5	10	25	50	100	500
AFC estacional de invierno (ene-mar)							
1. Distribución LP3 (MoDR)	1 053.0	2 439	4 447	7 376	9 572	11 628	15 576
2. Distribución GVE (Sex)	1 090.3	1 947	3 562	7 066	11 411	18 116	51 343
3. Distribución LOG (MoL)	1 238.8	1 929	3 415	6 564	10 412	16 294	45 033
4. Distribución Pearson tipo III (Mo3p)	797.5	2 704	4 882	8 191	10 956	13 913	21 411
5. Distribución Wakeby (OPT)	478.0	2 742	5 144	9 935	15 380	23 155	56 645
Predicciones adoptadas	-	2 439	4 447	7 376	10 956	16 294	45 033
AFC estacional de primavera (abril-junio)							
1. Distribución LP3 (MoDL)	28.4	258	395	605	785	982	1 501
2. Distribución GVE (MoL)	38.5	245	362	555	741	972	1 748
3. Distribución LOG (MoL)	42.3	240	350	540	731	980	1 893
4. Distribución Pearson tipo III (Mo3p)	40.6	248	380	570	725	887	1 291
5. Distribución Wakeby (OPT)	31.0	287	430	635	803	985	1 478
Predicciones adoptadas	-	248	380	570	741	980	1 501
AFC estacional de verano (julio-sept.)							
1. Distribución LP3 (MoDL)	196.5	1 897	2 384	3 110	3 739	4 452	6 504
2. Distribución GVE (MoL)	190.5	1 849	2 330	3 092	3 797	4 639	7 308
3. Distribución LOG (MoL)	199.7	1 822	2 277	3 032	3 772	4 708	7 984
4. Distribución Pearson tipo III (Mo3p)	199.2	1 836	2 391	3 194	3 844	4 526	6 217
5. Distribución Wakeby (OPT)	115.4	1 863	2 489	3 595	4 726	6 208	11 758
Predicciones adoptadas	-	1 849	2 384	3 110	3 797	4 639	7 308
AFC estacional de otoño (oct-dic)							
1. Distribución LP3 (MoDR)	1 013.4	2 447	4 070	6 724	9 100	11 779	19 091
2. Distribución GVE (MáxV)	495.2	2 222	4 099	8 587	14 674	24 836	82 912
3. Distribución LOG (MoL)	1 096.4	2 178	3 474	5 981	8 803	12 822	30 136
4. Distribución Pearson tipo III (Mo2p)	957.3	2 670	4 543	7 334	9 637	12 080	18 222
5. Distribución Wakeby (OPT)	508.9	2 210	4 084	8 463	14 240	23 626	74 587
Predicciones adoptadas	-	2 222	4 084	7 334	9 637	12 822	30 136

Simbología:

EEA error estándar de ajuste.
 MoDR momentos en el dominio real.
 MoDL momentos en el dominio logarítmico.
 Sex sextiles.

MáxV máxima verosimilitud.
 MoL momentos L .
 Mo3p momentos con tres parámetros de ajuste.
 OPT optimización.

invierno presenta crecientes mayores que las anuales en altos Tr debido a la ocurrencia en tal lapso de dos de los tres más grandes gastos aforados (10 000 y 15 000 m^3/s). También destaca que las estaciones de invierno y otoño tienen predicciones bastante similares y, nuevamente, en la primavera se presentan las menores crecientes estacionales.

Otros enfoques de estimación de crecientes estacionales

Desde finales del siglo pasado se ha argumentado que el muestreo de gastos superiores a un valor umbral o análisis POT, del inglés "peak-over-threshold", aporta significativamente más información, sobre todo

en la estimación de crecientes estacionales. Por lo anterior, varios trabajos recientes procesan tal información, afirmando que tal muestreo puede reflejar de manera más completa y flexible la variación estacional de las crecientes (Cunderlik, Ouarda, & Bobée, 2004; Fang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2010).

McCuen y Beightley (2003) indican que con frecuencia no se pueden integrar muestras estacionales del tipo de series anuales de máximos debido a que se afora únicamente en la época de lluvias o crecientes, por ello proponen un método estadístico para estimar los gastos estacionales faltantes. Además, presentan el *análisis regional estacional de crecientes*, cuyos resultados permiten hacer estimaciones de gastos por épocas en sitios sin aforos, localizados dentro de tal región.

Durrans *et al.* (2003) presentan dos métodos aproximados para realizar el análisis conjunto o simultáneo de las crecientes estacionales y anuales, salvando las inconsistencias de ambos registros, pues no se puede definir arbitrariamente qué modelo probabilístico seguirán las distribuciones de probabilidad anual y por épocas. Ambos métodos emplean como modelo probabilístico básico la distribución LP3 y la ecuación (2) para encontrar por optimización las distribuciones estacionales. El método de Singh, Wang y Zhang (2005) es semejante y se basa en probabilidades condicionales entre las ocurrencias anuales y las estacionales.

Uno de los últimos enfoques que se han dado a la estimación de las crecientes estacionales es a través de las distribuciones conjuntas bivariadas, por ejemplo entre las fechas de ocurrencia de las crecientes y las excedencias de un muestreo POT (Chen *et al.*, 2010).

Otro enfoque que utiliza las fechas de ocurrencia, mediante los estadísticos direccionales y que permite establecer de manera objetiva las tres épocas de crecientes: previa, principal y posterior, ha sido propuesto de manera reciente por Chen *et al.* (2013).

Conclusiones

Se ha destacado que ciertos diseños hidrológicos de obras hidráulicas deben ser realizados con base en las *crecientes estacionales* para que no estén sobredimensionados, por usar las crecientes de diseño de base anual. Además, se ha puntualizado que cuando las actividades por proteger dentro de un cauce son marcadamente estacionales o de pocos meses, resulta necesario su estudio o análisis con apoyo de las *predicciones estacionales*.

Los resultados de la aplicación numérica, orientada a estimar las *crecientes estacionales* del río Fuerte, de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa), con base en los registros de gastos máximos mensuales de la estación de aforos Huites, han mostrado que para periodos de retorno menores a 100 años, tales *predicciones estacionales* son siempre menores que las anuales. Durante su desarrollo quedó expuesta la simplicidad de tal método.

Referencias

- Aldama, A. A., Ramírez, A. I., Aparicio, J., Mejía, R., & Ortega, G. E. (2006). Capítulo 3: Aplicación y Resultados. Presa Luis Donaldo Colosio, Huites, Sinaloa (pp. 134-143). En *Seguridad hidrológica de las presas en México*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Bobée, B., & Ashkar, F. (1991). *The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology* (203 pp.) Littleton, USA: Water Resources Publications.
- Buishand, T. A. (1982). Some Methods for Testing the Homogeneity of Rainfall Records. *Journal of Hydrology*, 58, 11-27.
- Campos-Aranda, D. F. (2001). Contraste de dos procedimientos de ajuste de la distribución Wakeby en modelación probabilística de crecientes. *Agrociencia*, 35(4), 429-439.
- Campos-Aranda, D. F. (2013). Contraste de la distribución logística generalizada en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 14(1), 113-123.
- Chen, L., Guo, S., Yan, B., Liu, P., & Fang, B. (2010). A New Seasonal Design Flood Method Based on Bivariate Joint Distribution of Flood Magnitude and Date of Occurrence. *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), 1264-1280.

- Chen, L., Singh, V. P., Guo, S., Fang, B., & Liu, P. (2013). A New Method for Identification of Flood Seasons Using Directional Statistics. *Hydrological Sciences Journal*, 58(1), 28-40.
- Cunderlik, J. M., Ouarda, T. B. M. J., & Bobée, B. (2004). Determination of Flood Seasonality from Hydrological Records. *Hydrological Sciences Journal*, 49(3), 511-526.
- Durrans, S. R., Eiffe, M. A., Thomas Jr., W. O., & Goranflo, H. M. (2003). Joint Seasonal/ Annual Flood Frequency Analysis. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(4), 181-189.
- Fang, B., Guo, S., Wang, S., Liu, P., & Xiao, Y. (2007). Non-Identical Models For Seasonal Flood Frequency Analysis. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 974-991.
- Hosking, J. R. M., & Wallis, J. R. (1997). Appendix: L-Moments for Some Specific Distributions (pp. 191-209). In *Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-moments*. Cambridge: Cambridge University Press.
- IMTA (2003). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. 8 CD's. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Kite, G. W. (1977). *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of Frequency Distributions (pp. 156-168). Fort Collins, USA: Water Resources Publications.
- Kottegoda, N. T. (1980). Chapter 2: Analysis of Hydrologic Time Series (pp. 20-66). In *Stochastic Water Resources Technology*. London: The MacMillan Press, Ltd.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1988). Chapter 14: Stochastic Hydrology (pp. 374-397). In *Hydrology for Engineers*. London: McGraw-Hill Book Co., SI Metric Edition.
- Liu, P., Guo, S., Xiong, L., & Chen, L. (2010). Flood Season Segmentation Based on the Probability Change-Point Analysis Technique. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4), 540-554.
- McCuen, R. H., & Beightley, R. E. (2003). Seasonal Flow Frequency Analysis. *Journal of Hydrology*, 279, 43-56.
- Metcalf, A. V. (1997). Theme 4.6: Seasonality, Trends and Other Explanatory Variables (pp. 99-102). In *Statistics in Civil Engineering*. London: Arnold Publishers.
- Rao, A. R., & Hamed, K. H. (2000). Chapter 6: The Gamma Family (pp. 127-206). In *Flood Frequency Analysis*. Boca Raton, USA: CRC Press LLC.
- Ruiz-Maya, L. (1977). Capítulo 9: Condiciones paramétricas del análisis de varianza (pp. 233-249). En *Métodos estadísticos de investigación*. Madrid: Instituto Nacional de Estadística.
- Singh, V. P., Wang, S. X., & Zhang, L. (2005). Frequency Analysis of Non-Identically Distributed Hydrologic Data. *Journal of Hydrology*, 307, 175-195.
- Stedinger, J. R., Vogel, R. M., & Foufoula-Georgiou, E. (1993). Frequency Analysis of Extreme Events. Chapter 18 (pp. 18.1-18.66). In D. R. Maidment (Ed.). *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Waylen, P., & Woo, M. K. (1982). Prediction of Annual Floods Generated by Mixed Processes. *Water Resources Research*, 18(4), 1283-1286.
- WMO (1971). Annexed III: Standard Tests (pp. 58-71). Technical Note No. 79, WMO-No. 195. In *Climatic Change*. Geneva: World Meteorological Organization, Secretariat of the WMO.

Dirección del autor

Dr. Daniel Francisco Campos-Aranda

Profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
 Genaro Codina 240
 Colonia Jardines del Estadio
 78280 San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO
 Teléfono: +52 (444) 8151 431
 campos_aranda@hotmail.com