

Técnicas asociadas al análisis de frecuencia de crecientes en cuencas con desarrollo urbano

Related Techniques to Flood Frequency Analysis in Watersheds with Urban Development

Campos-Aranda D.F.

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

Correo: campos_aranda@hotmail.com

Información del artículo: recibido: mayo de 2011, aceptado: julio de 2011

Resumen

El análisis de frecuencia de crecientes (AFC) convencional considera que los gastos máximos anuales son eventos independientes, aleatorios y generados por un proceso estocástico estacionario con respecto al tiempo. Estas consideraciones generalmente no son válidas cuando se procesan registros de crecientes urbanas, debido a que cambios en el grado de urbanización de las cuencas afectan la magnitud de los gastos de las crecientes. El propósito de este trabajo es describir las técnicas asociadas al AFC, que son aplicables a registros o muestras con efectos importantes de la urbanización, es decir no homogéneos. Existen tres enfoques posibles: 1) determinación del periodo homogéneo del registro y su AFC, 2) identificación y remoción de la tendencia en la muestra y AFC subsecuente con los residuos y 3) ajuste del registro a una condición homogénea usando algún índice de urbanización. Estas técnicas se describen en detalle y se expone una aplicación. Las conclusiones destacan la importancia de estas técnicas en el futuro cercano, en muchas cuencas aledañas a las ciudades.

Abstract

Conventional flood frequency analysis (FFA) assumes that the annual maximum flows are independent, random events and that the stochastic process generating these events is stationary with respect to time. These assumptions are often invalid when analyzing urban flood data, because changes in the degree of urbanization in the watersheds affect the magnitude of flood flows. The purpose of this work is to describe techniques related to FFA that are applicable in records with important effects of urbanization, that is non-homogeneous. There are three possible approaches: (1) determination of the homogeneous period of the record and its FFA, (2) identification and removal of the trend in the record and subsequent FFA of the residuals and (3) adjustment of the record to a homogeneous condition by using a particular urbanization index. These techniques are described in detail and a numerical application is presented. The conclusions point out the importance of these techniques in the near future, applied to watersheds nearby the cities.

Descriptores:

- urbanización
- homogeneidad
- tendencia
- distribución GVE

Keywords:

- urbanization
- homogeneity
- trend
- GEV distribution

Introducción

De manera general, la *respuesta hidrológica* de una cuenca puede alterarse drásticamente debido a cambios ocurridos en ella, los cuales están asociados, por ejemplo, a las obras hidráulicas de aprovechamiento o de control. Recientemente, el crecimiento de las áreas urbanas dentro de las cuencas, ha originado también efectos significativos en su respuesta, los cuales están relacionados con las consecuencias de la *urbanización*: mayor escurrimiento y menor tiempo de respuesta, en resumen, crecientes o avenidas máximas más severas.

Por otra parte, el análisis probabilístico de los registros de gastos máximos anuales es la técnica básica para la obtención de las crecientes de diseño, las cuales permiten el dimensionamiento o la revisión hidrológica de las obras hidráulicas.

Este análisis requiere que los datos citados sean independientes, aleatorios y generados por un proceso estocástico estacionario con respecto al tiempo. Tales propiedades generalmente no están presentes en un registro procedente de una cuenca que ha sufrido cambios locales, o bien, desarrollo urbano.

El objetivo de este trabajo consiste en describir con detalle y ejemplificar numéricamente las técnicas que son aplicables en el *análisis de frecuencia de crecientes* (AFC) de registros, que han perdido su homogeneidad debido a una expansión del área urbana en la cuenca que aforan.

Procedimientos de análisis

Enfoques para el AFC y su aplicabilidad

McCuen & Thomas (1990) han establecido tres enfoques para procesar registros de crecientes o gastos máximos anuales procedentes de cuencas que han experimentado un crecimiento urbano dentro de ellas y que por ello son *no homogéneos*. El primero se basa en la determinación del periodo homogéneo del registro, si es que existe y su posterior AFC. El segundo consiste en la detección y remoción de la tendencia del registro, con el subsecuente AFC con los residuos. En el tercer enfoque se ajustan o corrigen los gastos máximos anuales para volverlos homogéneos con respecto a una cierta condición, lo anterior con base en algún índice de urbanización. El procedimiento de cada enfoque se detalla después del estudio de la homogeneidad del registro hidrométrico.

Las técnicas anteriores se pueden aplicar exclusivamente a registros de crecientes que han perdido la homogeneidad por desarrollo urbano en la cuenca, cuya

urbanización reduce la infiltración y el tiempo de concentración. Las rectificaciones y canalizaciones tienen efectos similares, cuyo impacto puede apreciarse a corto y mediano plazo y por ello deben ser tomadas en cuenta *conjuntamente* con la urbanización para estimar el grado de *desarrollo urbano* que tiene la cuenca. Los estanques de detención utilizados en las zonas urbanas para mitigar los efectos de la impermeabilización del suelo, así como las presas rompe-picos y las de control, tienen efectos contrarios a la urbanización, no modificando el volumen del escurrimiento pero redistribuyéndolo en el tiempo. Por lo anterior, las técnicas que se describen posteriormente no son aplicables a cuencas con efectos importantes de obras de almacenamiento y/o control.

Estudio de la homogeneidad

Antes de abordar alguno de los tres enfoques disponibles para el AFC, en registros que quizás son no homogéneos debido al impacto de la urbanización en su cuenca, resulta necesario el estudio de su homogeneidad bajo las tres fases siguientes: identificación, detección y corrección.

Fase de identificación

Al igual que en todo AFC, la primera tarea por realizar es la recopilación de la información hidrométrica disponible en el sitio de interés y en sus alrededores. Además de la información física relativa a la cuenca, la cual incluirá como mínimo:

- 1) tamaño de la cuenca, en km²,
- 2) información básica sobre el desarrollo urbano ocurrido, por ejemplo año de inicio y terminación, magnitud o porcentaje de la cuenca afectada y
- 3) cambios futuros factibles.

La técnica básica de la fase de identificación consiste en dibujar el registro hidrométrico como serie cronológica y observar su comportamiento. Estudiando la información sobre el desarrollo urbano ocurrido se podrá definir cuál es el registro posiblemente no homogéneo y cuál el homogéneo, si éste existe.

Lo más común es observar una tendencia ascendente en un cierto tramo del registro, originado por el impacto de la urbanización, si ésta tuvo un final. Definido el tramo no homogéneo del registro, la verificación objetiva de la tendencia se puede lograr a través del procedimiento de *promedios móviles* de orden 7 (McCuen & Thomas, 1990), dibujando éstos a la mitad del intervalo

de suavizado de la serie cronológica. Las expresiones de los promedios móviles son (Schulz, 1976):

$$\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_7}{7}, \frac{x_2 + x_3 + \dots + x_{7+1}}{7}, \frac{x_3 + x_4 + \dots + x_{7+2}}{7} \quad (1)$$

en las cuales, x_i son los gastos máximos anuales de la muestra o registro que se procesa.

Fase de detección

Esta fase implica dos etapas:

- 1) probar la no homogeneidad del tramo de registro bajo estudio y
- 2) verificar que estadísticamente la tendencia es significativa.

Para realizar la primera etapa se puede aplicar el *test de las secuencias*, cuyo procedimiento consiste en definir la mediana de la serie que se analiza, después se marca en la serie original con *A* si el dato es mayor y con *B* si es menor; las secuencias o sucesión (*u*) de valores de *A* o *B* se contabilizan y se concluye que la serie es homogénea si *u* está en el intervalo que indica la tabla 1 (Thom, 1971) de acuerdo con el tamaño de la muestra (*n*). Si se obtiene un valor alto de *u* la no homogeneidad se puede deber a un exceso de oscilación de la serie, en cambio, si *u* es reducido puede haber tendencia o cambio en la media.

Para verificar la presencia de la tendencia existen variadas pruebas estadísticas entre ellas la de Kendall y la del coeficiente de correlación serial de orden 1 (r_1). La *prueba de Kendall*, también llamada de la correlación de rangos, es muy efectiva si la tendencia es de tipo lineal o se aproxima a ésta, está basada en el número proporcional de observaciones subsecuentes, las cuales exceden a un valor particular. El procedimiento consiste en determinar el número *p*, en el registro de tamaño *n*, de todos los pares de observaciones (x_i, x_j ; con $i = 1$ a $n-1$ y $j = i+1$ a n) en que x_j es mayor que x_i , enseguida se evalúan las estadísticas siguientes (Kottegoda, 1980):

$$\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1 \quad (2)$$

<i>n</i>	<i>u</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	<i>n</i>	<i>u</i>	<i>n</i>	<i>u</i>
12	5 a 8	22	9 a 14	32	13 a 20	50	22 a 30
14	5 a 10	24	9 a 16	34	14 a 21	60	26 a 36
16	6 a 11	26	10 a 17	36	15 a 22	70	31 a 41
18	7 a 12	28	11 a 18	38	16 a 23	80	35 a 47
20	8 a 13	30	12 a 19	40	16 a 25	100	45 a 57

Tabla 1. Número de secuencias (*u*) permitidas según el tamaño (*n*) de la muestra (Thom, 1971)

$$\text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (3)$$

si el cociente entre τ y la raíz cuadrada de $\text{Var}(\tau)$, denominado PK está dentro de los límites que establece la variable normal estandarizada de ± 1.960 , la serie no presenta tendencia con un nivel de significancia de 5%, en una prueba de dos colas. En la *prueba del coeficiente de correlación serial*, éste se evalúa con la expresión (WMO, 1971):

$$r_1 = \frac{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} x_i \cdot x_{i+1} - \frac{1}{(n-1)^2} \sum_{i=1}^{n-1} x_i \cdot \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1}}{\left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} x_i^2 - \frac{1}{(n-1)^2} \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_i \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \left[\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1}^2 - \frac{1}{(n-1)^2} \left(\sum_{i=1}^{n-1} x_{i+1} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (4)$$

siendo x_i cada elemento del registro o gasto máximo anual cuyo número es *n*. Cuando r_1 no excede su valor crítico siguiente, la serie es aleatoria, es decir está libre de tendencia:

$$(r_1)_c = \frac{-1 \pm Z \sqrt{n-2}}{n-1} \quad (5)$$

En la expresión anterior, *Z* es la variable normal estandarizada. Cuando r_1 resultó positivo $Z = 1.645$ y se toma el signo positivo en la ecuación; cuando r_1 fue negativo, $Z = 1.964$ y se utiliza el signo negativo (WMO, 1971).

Fase de corrección

Identificada y detectada la tendencia, se debe buscar una ecuación de regresión que la represente, que puede ser lineal o polinomial, es decir, curva (McCuen & Thomas, 1990); se pueden utilizar los gastos de las crecientes anuales o sus logaritmos, pero la variable independiente será el tiempo en años, con uno para el primer dato y *n* para el último año del tramo en análisis. Esta tendencia se resta a los datos y se realiza un AFC con tales *residuos*. Después se corrigen las predicciones obtenidas por la tendencia máxima obtenida 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, 2011).

Método de corrección por factores de ajuste

Un registro no homogéneo de crecientes puede corregirse utilizando factores de ajuste, los cuales son función del grado de urbanización y de la probabilidad asociada a cada gasto, ya que los eventos frecuentes o de magnitud reducida son más afectados que las crecientes extremas, las cuales ocurren con la cuenca muy saturada y son originadas por tormentas severas pero esporádicas. Lo anterior se muestra en la figura 1 (McCuen, 1998) para porcentajes de urbanización de hasta 60%. El método consiste en los cuatro pasos siguientes (McCuen y Thomas, 1990; McCuen, 1998):

Paso 1. Se calculan los porcentajes de urbanización de cada gasto máximo anual del tramo de registro por corregir. Además se establece el porcentaje de urbanización para el cual se ajustará el registro.

Paso 2. Se ordenan de menor a mayor los n gastos del tramo de muestra por corregir y se les asigna un número de orden m (uno para el menor y n para el mayor), para estimar su probabilidad de no excedencia con la fórmula de Weibull (Benson, 1962):

$$P(X \leq x) = \frac{m}{n+1} \quad (6)$$

Paso 3. Para cada gasto del tramo de registro, con base en su probabilidad de no excedencia y su porcen-

taje de urbanización correspondiente se obtiene en la figura 1 su factor de ajuste (f_1). Al dividir el gasto entre f_1 se estima su valor correspondiente a cero urbanización (Q_{cu}).

Paso 4. Se asigna un número de orden a los gastos Q_{cu} calculados, para obtener su probabilidad de no excedencia (ecuación 6) y poder estimar el factor de ajuste (f_2) que corresponde al porcentaje de urbanización, para la cual se corrige el registro. Entonces cada gasto ajustado (Q_a) será igual a:

$$Q_a = f_2 \cdot Q_{cu} \quad (7)$$

Aplicación numérica

Descripción general y datos

Conviene aclarar que no fue posible conseguir un registro hidrométrico en la República Mexicana que dispusiera de los datos físicos que han impactado su cuenca debido a la urbanización y por ello se utilizó la estación hidrométrica Pond Creek cerca Louisville, Kentucky, USA, que fue procesada por McCuen & Thomas (1990), tiene un área de cuenca de 165.7 km² y un registro de gastos máximos anuales de 38 datos en el periodo de 1945-1988, el cual se expone en la tabla 2. De 1945 a 1968, su porcentaje de área impermeable pasó de 2.5 a 13.0% y el grado de canalización se incrementó de 21.3

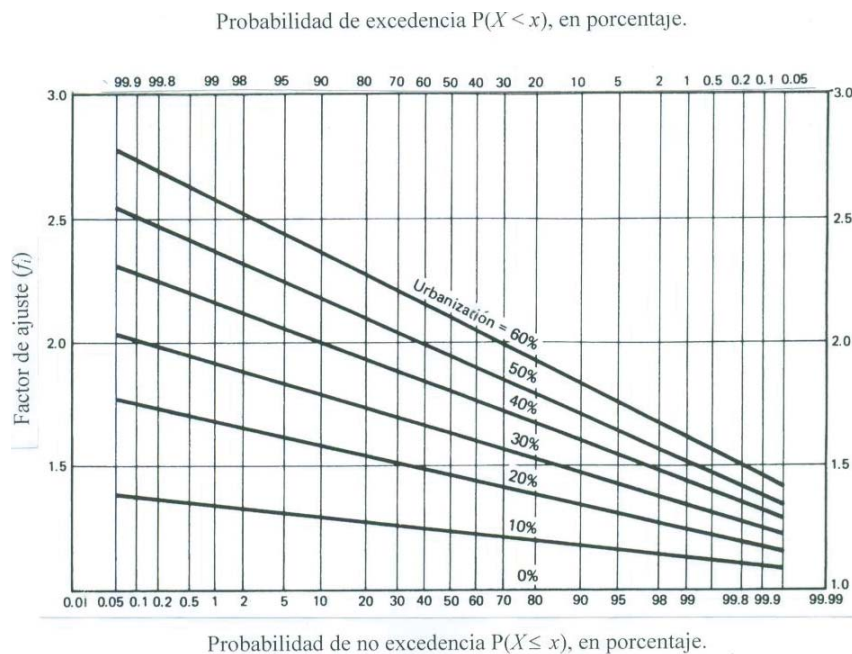


Figura 1. Factores de ajuste para corregir crecientes por urbanización en cuencas (McCuen, 1998)

a 55.2%. Estos índices se combinaron para estimar los porcentajes de desarrollo urbano en la cuenca, el cual varió de 11 a 35%. McCuen y Thomas (1990) estimaron que el grado de canalización aporta del orden de 40% al desarrollo urbano.

Análisis sobre la homogeneidad

Sabiendo que la urbanización en la cuenca finalizó en 1968, se deberá analizar el registro previo a tal año para identificar, detectar y corregir su impacto. En la tabla 2 también se muestran los promedios móviles de orden 7, calculados en el tramo de registro bajo análisis, en la figura 2 se dibujaron conjuntamente con el registro de 24 valores. Se observa que a partir de 1953 y hasta 1965 que termina la curva de suavizado, existe una tendencia ascendente en las crecientes. Esto termina la fase de identificación de la no homogeneidad.

Para aplicar el test de las secuencias se obtiene una mediana de 62.150 m³/s, la cual define únicamente dos secuencias, una de valores menores que ella al inicio del registro hasta 1956 y la otra con magnitudes mayores. Según la tabla 1 el número de secuencias u debe estar entre 9 y 16, por lo cual el registro es no homogéneo quizás debido a tendencia dado que u resultó muy bajo. Durante el desarrollo de la prueba de Kendall se obtuvieron los valores siguientes: $p = 213$, $\tau = 0.5434783$, $\text{Var}(\tau) = 0.0213655$, $\text{PK} = 3.72066 > 1.960$, por lo tanto existe tendencia. En cambio, en la aplicación de la ecuación 4 se obtuvieron los valores siguientes:

$$r_1 = \frac{\frac{1}{23}(149,960.4) - \frac{1}{(23)^2}(1,656.6)(1,722.5)}{\left[\frac{1}{23}(160,883.6) - \frac{1}{(23)^2}(1,656.6)^2 \right]^{1/2} \left[\frac{1}{23}(172,778.5) - \frac{1}{(23)^2}(1,722.5)^2 \right]^{1/2}} \quad (8)$$

Año	Gasto	PMO7*	Año	Gasto	PMO7*	Año	Gasto	Año	Gasto
1945	57.3	-	1956	47.9	53.8	1967	92.0	1978	89.0
1946	50.1	-	1957	65.4	58.4	1968	123.2	1979	83.0
1947	41.1	-	1958	73.9	68.4	1969	61.0	1980	108.0
1948	58.9	49.3	1959	93.4	73.1	1970	112.0	1981	87.0
1949	44.2	47.0	1960	71.1	79.9	1971	65.0	1982	105.0
1950	45.3	45.4	1961	87.8	102.9	1972	67.0	1983	101.0
1951	48.1	42.1	1962	71.9	110.1	1973	140.0	1984	81.0
1952	41.3	39.3	1963	95.7	114.5	1974	73.0	1985	98.0
1953	39.1	39.8	1964	226.5	117.5	1975	90.0	1986	95.0
1954	17.6	42.7	1965	124.0	122.6	1976	80.0	1987	165.0
1955	39.4	46.4	1966	124.6	-	1977	135.0	1988	71.0

Tabla 2. Crecientes máximas anuales (m³/s) en Pond Creek, Louisville, Kentucky, USA (McCuen y Thomas, 1990) y promedios móviles de orden 7 del periodo 1945-1968

* promedio móvil de orden 7

$$r_1 = \frac{1,125.890}{(42.511)(43.628)} = 0.607 \quad (9)$$

Como la ecuación 5 define un valor crítico de 0.292, el registro tiene persistencia y por lo tanto tendencia. La fase de detección concluye demostrando la existencia estadística de tendencia en el tramo de muestra analizado (1945 a 1968).

Para abordar la fase de corrección se trabajó con los logaritmos decimales de los gastos como variable dependiente y como variable independiente el número de año (x), variando de uno a 24. Se ajustó un modelo lineal y se obtuvo la expresión:

$$\log Q = 1.516728 + 0.02346515 \cdot x \quad (10)$$

cuyo coeficiente de correlación resultó de 0.717, el cual puede considerarse aceptable dado que se está trabajando con gastos máximos anuales, cuya dispersión propia es grande; además al inicio del registro no existe tendencia.

Primer enfoque del AFC (periodo homogéneo)

Establecida la fecha en que concluyó el desarrollo urbano dentro de la cuenca, el resto del registro se puede considerar homogéneo, en el caso analizado de 1969 a 1988. Para tomar en cuenta el evento máximo del registro total, que ocurrió en 1964, se consideró como registro homogéneo el lapso o periodo de 1964 a 1988, siendo entonces $n = 25$. El ajuste de la distribución *general de valores extremos* (GVE) por el método de momentos L (Hosking y Wallis, 1997; Campos, 2001), conduce a los parámetros de ubicación, escala y forma siguientes: $u = 86.36584$, $\alpha = 22.74655$ y $k = -0.16915$; con las predicciones mostradas en la tabla 3.

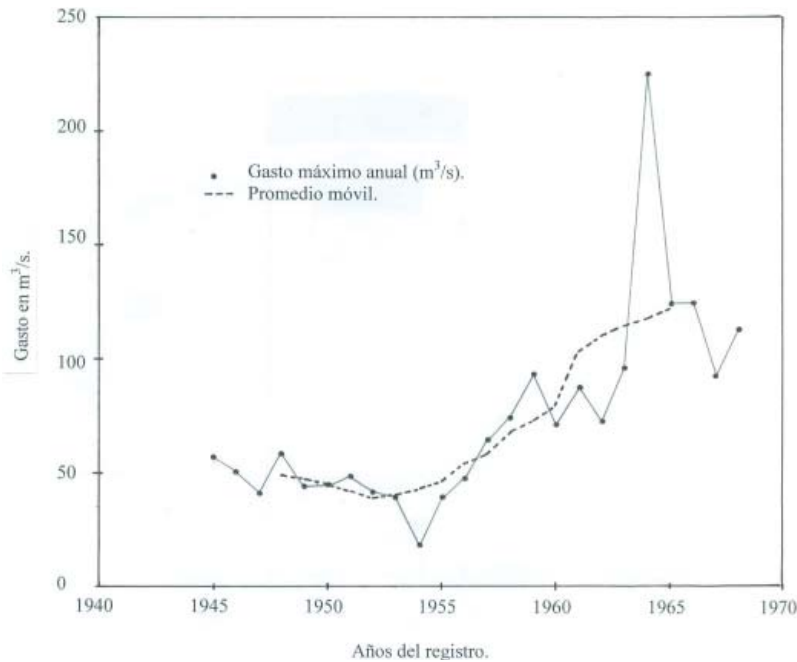


Figura 2. Crecientes en el periodo 1945-1968 y promedios móviles de orden 7, en la estación hidrométrica Pond Creek, Kentucky, USA

Método aplicado:	Periodos de retorno en años					
	2	5	10	25	50	100
1. AFC con periodo homogéneo (1964–1988)	95	125	149	183	212	245
2. AFC con residuos (1945–1968)	123	163	185	208	221	231
3. AFC con registro ajustado (1945–1968)	72	105	132	170	204	241
4. AFC con registro ajustado (1945–1988)	82	112	134	162	184	207

Tabla 3. Contraste de predicciones (m^3/s) en Pond Creek, Kentucky, USA, según los cuatro métodos del AFC empleados

Segundo enfoque del AFC (análisis de residuos)

Para cada uno de los 24 gastos del tramo de registro (1945–1968) que resultó no homogéneo, se obtiene su logaritmo decimal y se le resta su tendencia correspondiente, estimada con la ecuación 8. Esto conduce a los residuos buscados (res_i), por ejemplo para el primero y último valores se tiene:

$$Q_1 = 57.3 \text{ m}^3/\text{s}. \quad res_1 = 1.758155 - [1.516728 + 0.02346515 \cdot (1)] = 0.217962$$

$$Q_{24} = 123.2 \text{ m}^3/\text{s}. \quad res_{24} = 2.090611 - [1.516728 + 0.02346515 \cdot (24)] = 0.010721$$

El ajuste de la distribución GVE por momentos L a los 24 residuos ($u = -0.0440304$, $\alpha = 0.1556448$, $k = 0.3985666$) conduce a unas predicciones que habrá que corregir sumándoles la tendencia logarítmica final en los 24 años, es decir 2.079890 y por último, hacer la transformación inversa para llegar al gasto de la creciente de diseño se-

gún este enfoque. Las predicciones obtenidas se muestran en la tabla 3.

Tercer enfoque del AFC (corrección por factores de ajuste)

En la tabla 4 se presentan los cálculos realizados para corregir el tramo de registro que resultó no homogéneo, mediante los factores de ajuste (ecuación 7). El análisis probabilístico del registro corregido se realiza bajo dos planteamientos:

- 1) con los gastos ajustados, última columna de la tabla 4 y
- 2) conjuntando tales datos y el registro homogéneo (1969–1988, tabla 2), es decir 44 años. Las predicciones obtenidas a través del ajuste de la distribución GVE por momentos L en ambos casos, se muestra en la tabla 3, cuyos parámetros fueron: $u = 62.54473$, $\alpha = 24.83484$, $k = -0.18215$ y $u = 72.06246$, $\alpha = 25.56927$, $k = -0.05880$, respectivamente.

Análisis de resultados y discusión

Antes de analizar los resultados concentrados en la tabla 3, conviene aclarar que se tienen otros métodos para identificar y probar no homogeneidad, por ejemplo el Test de Helmer entre los primeros y el de Spearman y Spearman-Conley entre los segundos (McCuen, 1998). Por otra parte, la corrección del registro por factores de ajuste (f_1, f_2), se realizó según una versión simplificada (tabla 4), la cual difiere del método propuesto por McCuen y Thomas (1990) y McCuen (1998), basado en la aplicación simultánea de los factores de ajuste y en iteraciones. Se considera aceptable la simplificación propuesta, dada la precisión que impone el uso de la figura 2.

En el inciso sobre la *Fase de Identificación*, se mencionó que debería recopilarse información hidrométrica cercana, ello tiene por objeto verificar en cuencas sin desarrollo urbano, que no existen tendencias debido a cambios climáticos regionales o a influencias macrogeográficas, que también estén afectando a la cuenca bajo estudio.

Otro aspecto importante sobre los resultados es el hecho de provenir únicamente de la aplicación de la

distribución de probabilidades GVE, siendo interesante para verificar sus órdenes de magnitud y concluir las predicciones de diseño, la aplicación de otras distribuciones como son la log-Pearson tipo III y la logística generalizada.

Finalmente, con respecto a los resultados de la tabla 3, éstos se consideran confiables dada la similitud que presentan. Aunque no es posible recomendar unas predicciones, al considerar mejor una de las técnicas aplicadas, no resulta difícil concluir valores de diseño.

Conclusiones

Las técnicas descritas e ilustradas en este trabajo, constituyen las herramientas básicas del análisis probabilístico de crecientes (AFC) en registros o muestras que han perdido su homogeneidad debido a la urbanización ocurrida en la cuenca de captación.

Tales técnicas presentan tres enfoques posibles de análisis probabilístico:

- 1) determinación del periodo homogéneo del registro y su AFC respectivo,

Tabla 4. Corrección del registro con el método de los factores de ajuste

Datos históricos			Cero urbanización				Urbanización final			
Año	Q	%Urb.	m	$P(X \leq x)$	f_1	Q_{cu}	m_{cu}	$P(X \leq x)$	f_2	Q_a
1945	57.3	12	11	0.44	1.30	44.1	13	0.52	1.71	75.4
1946	50.1	13	10	0.40	1.32	38.0	10	0.40	1.75	66.5
1947	41.1	14	4	0.16	1.39	29.6	5	0.20	1.83	54.2
1948	58.9	15	12	0.48	1.36	43.3	12	0.48	1.72	74.5
1949	44.2	16	6	0.24	1.42	31.1	7	0.28	1.80	56.0
1950	45.3	17	7	0.28	1.44	31.5	8	0.32	1.78	56.1
1951	48.1	18	9	0.36	1.46	32.9	9	0.36	1.76	57.9
1952	41.3	19	5	0.20	1.51	27.4	4	0.16	1.86	51.0
1953	39.1	20	2	0.08	1.59	24.6	3	0.12	1.88	46.2
1954	17.6	21	1	0.04	1.65	10.7	1	0.04	1.97	21.1
1955	39.4	22	3	0.12	1.61	24.5	2	0.08	1.91	46.8
1956	47.9	23	8	0.32	1.56	30.7	6	0.24	1.81	55.6
1957	65.4	24	13	0.52	1.52	43.0	11	0.44	1.74	74.8
1958	73.9	25	16	0.64	1.50	49.3	16	0.64	1.67	82.3
1959	93.4	26	19	0.76	1.48	63.1	20	0.80	1.60	101.0
1960	71.1	27	14	0.56	1.56	45.6	15	0.60	1.68	76.6
1961	87.8	28	17	0.68	1.54	57.0	18	0.72	1.63	92.9
1962	71.9	29	15	0.60	1.58	45.5	14	0.56	1.69	76.9
1963	95.7	30	20	0.80	1.53	62.5	19	0.76	1.62	101.3
1964	226.5	31	24	0.96	1.43	158.4	24	0.96	1.47	232.8
1965	124.0	32	22	0.88	1.51	82.1	22	0.88	1.55	127.3
1966	124.6	33	23	0.92	1.49	83.6	23	0.92	1.51	126.2
1967	92.0	34	18	0.72	1.62	56.8	17	0.68	1.65	93.7
1968	123.2	35	21	0.84	1.57	78.5	21	0.84	1.57	123.2

- 2) identificación y remoción de la tendencia en la muestra y AFC subsecuente con los residuos y
- 3) ajuste del registro a una condición homogénea usando algún índice de urbanización.

En un futuro cercano, las cuencas con afectación por desarrollo urbano dentro de ellas, serán bastante comunes, sobre todo cuando se comiencen a aforar las corrientes y cauces importantes que drenan a las zonas urbanas, o que definen y dan origen a las planicies de inundación aledañas a las ciudades.

Agradecimientos

Se agradecen las observaciones y los comentarios de los árbitros anónimos A y B, respectivamente. Tales sugerencias al ser incorporadas, volvieron más explícito el trabajo y su alcance.

Referencias

- Benson M.A. Plotting Positions and Economics of Engineering Planning. *Journal of Hydraulics Division*, volumen 88 (número HY6), 1962: 57–71.
- Campos-Aranda D.F. Contraste de cinco métodos de ajuste de la distribución GVE en 31 registros históricos de eventos máximos anuales. *Ingeniería Hidráulica en México*, volumen XVI (número 2), abril–junio del 2001: 77–92.
- Campos-Aranda D.F. Transferencia de información de crecientes mediante regresión lineal múltiple. *Tecnología y ciencias del agua*, volumen II (número 3), julio–septiembre de 2011: 239–247.
- Hosking J.R., Wallis J.R. *Regional Frequency Analysis. An Approach Based on L-Moments* (capítulo 2: L-Moments, pp. 14–43 y Apéndice: L-Moments for some specific distributions, pp. 191–209), Cambridge, Inglaterra, Cambridge University Press, 1997, 224 p.
- Kottegoda N.T. *Stochastic Water Resources Technology* (capítulo 2: Analysis of hydrologic time series, pp. 20–66), Londres, The MacMillan Press, 1980, 384 p.
- McCuen R.H. *Hydrology Analysis and Design* (theme 5.4: Adjustments of the frequency curve, pp. 259–301), 2a ed., New Jersey, USA, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998, 814 p.
- McCuen R.H., Thomas W.O. Flood Frequency Analysis Techniques for Urbanizing Watersheds. *Symposium Proceedings on Urban Hydrology*, pp. 35–46, American Water Resources Association, Bethesda, Maryland, USA, 1990, 339 p.
- Schulz E.F. *Problems in Applied Hydrology* (sección 2: Elementary Statistical Properties, pp. 31–73), edición revisada, Colorado, USA, Water Resources Publications, Fort Collins, 1976, 501 p.
- Thom H.C.S. *Some Methods of Climatological Analysis* (capítulo 1: Climatological Series, pp. 1–11), Nota Técnica núm. 81. WMO–199. TP. 103, Secretariat of the World Meteorological Organization. Génova, Suiza, 1971, 53 p.
- World Meteorological Organization (WMO). *Climatic Change* (anexo III: Standard Tests of Significance to be Recommended in Routine Analysis of Climatic Fluctuations, pp. 58–71). Nota técnica núm. 79. WMO–195, Secretariat of the WMO, Génova, Suiza, 1971, 79 p.

Este artículo se cita:

Citación Chicago

Campos-Aranda, Daniel Francisco. Técnicas asociadas al análisis de frecuencia de crecientes en cuencas con desarrollo urbano. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIII, 03 (2012): 385-392.

Citación ISO 690

Campos-Aranda D.F. Técnicas asociadas al análisis de frecuencia de crecientes en cuencas con desarrollo urbano. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIII (número 3), julio-septiembre 2012: 385-392.

Semblanza del autor

Daniel Francisco Campos-Aranda. Obtuvo el título de ingeniero civil en diciembre de 1972 en la entonces Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Durante el primer semestre de 1977, realizó en Madrid, España un diplomado en hidrología general y aplicada. Posteriormente, durante 1980–1981, llevó a cabo estudios de maestría en ingeniería en la especialidad de hidráulica en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. En esta misma institución, inició (1984) y concluyó (1987) el doctorado en ingeniería con especialidad en aprovechamientos hidráulicos. Ha publicado artículos principalmente en revistas mexicanas de excelencia: 39 en *Ingeniería Hidráulica en México*, 13 en *Agrociencia* y 9 en *Ingeniería. Investigación y Tecnología*. En congresos internacionales y nacionales ha presentado 24 y 73 ponencias, respectivamente. Fue investigador nacional (nivel I: expediente 7273) desde el 1° de julio de 1991 hasta el 31 de diciembre del 2007. Actualmente es profesor jubilado de la UASLP, desde el 1° de febrero del 2003. En 2008 la AMH le otorgó el premio nacional “Francisco Torres H.” a la práctica profesional de la hidráulica.