

# ESTIMACIÓN DE ENVOLVENTES DE DISEÑO POR SUBREGIONES HIDROLÓGICAS

• Daniel Francisco Campos-Aranda •

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

## Resumen

La estimación de crecientes de diseño en cuencas sin aforos es la regla más que la excepción. Por otra parte, el uso de las curvas envolventes con periodo de retorno, estimadas éstas por subregiones hidrológicas, es quizás el método regional más simple para obtener las predicciones necesarias. En este trabajo se describen con detalle las seis etapas del procedimiento sugerido: (1) definición de la subregión, (2) inspección crítica de los datos, (3) verificación estadística de los datos, (4) verificación de la homogeneidad subregional, (5) estimación de predicciones y (6) cálculo de coeficientes de ajuste de las curvas envolventes de diseño. Se utilizaron las curvas envolventes de Creager, Lowry y Francou-Rodier. También se expone con cierto detalle la aplicación del procedimiento anterior en cinco subregiones de México. Se analizan los resultados y se formulan las conclusiones, las cuales destacan las ventajas de trabajar por subregiones, y la facilidad de verificar resultados confiables, cuando éstos tienen consistencia.

**Palabras clave:** curvas envolventes, discordancias, test de Langbein, distribuciones de probabilidad, regiones hidrológicas.

## Introducción

El dimensionamiento hidrológico de muchas obras hidráulicas de aprovechamiento, control y cruce, como son los embalses, los diques de protección, y las alcantarillas y puentes, respectivamente, se realiza con base en las crecientes o avenidas máximas de diseño. Tales gastos máximos están asociados con ciertos niveles de probabilidad de excedencia, cuyo recíproco es el llamado periodo de retorno, el cual se expresa en años y corresponde al intervalo promedio entre la ocurrencia de un evento igual o mayor. En la práctica hidrológica, la mayoría de las obras hidráulicas se diseñan para intervalos de recurrencia de 10, 25, 50, 100 y 500 años; valores que además permiten la delimitación de las planicies de inundación. Por otra parte, las estimaciones requeridas de crecientes de diseño, también en su mayoría, ocurren en cuencas que no tienen información

hidrométrica, es decir, que no están aforadas, y por ello la estimación citada no se puede realizar a través del análisis de frecuencia, consistente en aplicar modelos probabilísticos para hacer las predicciones buscadas.

Desde la mitad del siglo pasado se comenzó aplicar en México el enfoque empírico de las llamadas *Envolventes de Gastos Máximos Regionales*, elaboradas al dibujar en un papel logarítmico, en las abscisas las áreas de cuenca en km<sup>2</sup> de las diferentes estaciones hidrométricas de una determinada región hidrológica y en las ordenadas sus correspondientes gastos máximos específicos observados en m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Para la nube de puntos dibujada se trazaba una curva envolvente que se apoyaba en uno de ellos, de manera que todos los demás quedaban por debajo. Se empezó utilizando la curva envolvente de Creager, que este autor había definido con base en las crecientes máximas observadas en el mundo. Después también se

aplicó la envolvente de Lowry, desarrollada con base en las crecientes del estado de Texas, Estados Unidos.

Hacia comienzos de este siglo se actualizaron tales envolventes, incluyendo toda la información hidrométrica disponible hasta el año 2000, así como los nuevos modelos de curvas envolventes propuestas en el mundo (Ramírez-Orozco *et al.*, 2005). El método de las curvas envolventes es más confiable que las fórmulas empíricas, cuyos coeficientes se seleccionan a criterio con base en las características físicas de la cuenca. Su desventaja radica en estar basadas en registros pasados y por ello deben ser actualizadas periódicamente (Bhunya *et al.*, 2008).

En este trabajo se utilizan tres modelos de curvas envolventes, cuya característica común es requerir un solo parámetro de ajuste, éstas son: Creager, Lowry y Francou-Rodier. Las curvas se ajustan por subregiones, es decir, zonas geográficas relativamente homogéneas, lo cual se comprueba de manera estadística a través de la prueba de Discordancias y del nuevo test de Langbein. Además, las curvas envolventes buscadas ahora corresponden a los cinco periodos de retorno citados anteriormente, ya que cada registro hidrométrico de gastos máximos anuales disponible en la subregión se procesa mediante los tres modelos probabilísticos siguientes: Log-Pearson tipo III (LP3), General de Valores Extremos (GVE) y Logística Generalizada (LGE). Se describen con detalle los resultados que se obtuvieron en las cinco subregiones analizadas, ubicadas en cuatro regiones hidrológicas, con la idea de exponer la manera en que se obtienen ventajas de este análisis regional, para la selección de la información hidrométrica. También se comparan los resultados subregionales con los regionales obtenidos por Ramírez-Orozco *et al.* (2005).

### Etapas del procedimiento

Éste consiste de las seis etapas siguientes: (1) definición de la subregión, (2) inspección

crítica de los datos, (3) verificación estadística de los datos (prueba de Discordancias), (4) verificación de la homogeneidad subregional (nuevo test de Langbein), (5) estimación de predicciones y (6) cálculo de los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes.

### Definición de la subregión

La integración de la subregión está estrechamente relacionada con la selección de las estaciones hidrométricas que serán procesadas. Esta es la etapa crítica de los análisis y en la cual toda la información geográfica conocida debe ser tomada en cuenta para obtener la homogeneidad máxima de tipo climático, orográfico y de similitud de magnitudes físicas de las cuencas, como son su área o tamaño, y los valores del coeficiente de variación de los registros de gastos máximos anuales correspondientes. La idea fundamental consiste en seleccionar estaciones hidrométricas con escurrimiento casi virgen, por tratarse de un estudio de crecientes, que pertenezcan a una zona geográfica y cuyas características físicas sean semejantes. Lógicamente, la proximidad es fundamental, pero ésta queda sometida a la similitud de características geográficas, como son las coberturas vegetales y el comportamiento hidrológico general. Para las cuencas de los grandes ríos, el enfoque subregional ha sido propuesto dada la diversidad de climas, relieves y condiciones geológicas que ocurren en éstas (Biondic *et al.*, 2007).

### Inspección crítica de los datos

Seleccionada la subregión y por consecuencia las estaciones de aforos que la integran, se procede a una inspección detallada y rigurosa de cada registro de gastos máximos anuales por utilizar, con la idea de detectar valores anómalos o incongruentes, repetidos, faltantes o de magnitud muy diferente, por cambios ocurridos en la cuenca de la estación hidrométrica o en su localización. Desafortunadamente, lo común es que la historia de tales cambios no

esté registrada y por ello se debe trabajar con la intuición, descartando los registros o tramos de éstos que resultan inferiores en magnitud con el resto de las estaciones hidrométricas de la subregión. Para este propósito, las tablas de datos conjuntos mostrados conforme el tamaño de cuenca aumenta son muy útiles. Este tipo de anomalías se encontró en varios de los registros analizados de las cinco subregiones estudiadas.

#### *Verificación estadística de los datos*

Esta es la primera etapa de cualquier análisis probabilístico y consiste en verificar que los datos son adecuados. Lo anterior implica que los datos recolectados en cada sitio de la subregión son una representación verdadera de los gastos máximos anuales y por lo tanto deben proceder de la misma función de distribución de probabilidades.

Afortunadamente, los valores erróneos, los eventos dispersos (*outliers*), la tendencia, y los saltos o cambios en la media de los datos, son reflejados en los momentos  $L$  del registro. Por ello, una mezcla conveniente de los cocientes  $L$  en un solo estadístico ( $D_i$ ) que mida la *discordancia* entre los cocientes  $L$  del sitio y los promedio de grupo, se ha sugerido como prueba básica para detectar sitios que son discordantes con el grupo como un todo. La prueba de Discordancias fue propuesta por Hosking y Wallis (1997), y ha sido descrita y aplicada por Campos-Aranda (2008a, 2010b).

#### *Verificación de la homogeneidad subregional*

Se realizó a través de la versión corregida del test de Langbein propuesta por Fill y Stedinger (1995), la cual ha sido descrita y aplicada por Campos-Aranda (2010a). Cuando los resultados de esta prueba indican que la subregión es inhomogénea, porque el número de estaciones hidrométricas que quedaron fuera de las curvas de control excede el permitido, se eliminan una o dos de tales estaciones y se repite la prueba.

Esta selección para eliminar registros se basa en los valores de su coeficiente de variación, ya que la prueba es muy sensible a su dispersión. Por lo general, si la primera y segunda etapas del procedimiento fueron bien realizadas, la subregión resulta homogénea estadísticamente.

#### *Estimación de predicciones*

Como ya se indicó, los gastos máximos con periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años que tendrán las curvas envolventes fueron estimados con base en las predicciones obtenidas al ajustar a cada registro las distribuciones LP3, GVE y LGE. La primera y la última han sido establecidas bajo precepto en Estados Unidos e Inglaterra, y la segunda ha demostrado gran versatilidad. Para el ajuste del modelo LP3 se utilizó el método de momentos (Bobée y Ashkar, 1991) en los dominios logarítmico ( $dl$ ) y real ( $dr$ ), seleccionando el que condujo al menor error estándar de ajuste (Kite, 1977). La función GVE se ajustó (Campos-Aranda, 2006) con base en los métodos de momentos ( $mo$ ), sextiles ( $sx$ ), máxima verosimilitud ( $mv$ ) y momentos  $L$  ( $mL$ ), nuevamente adoptando los resultados del menor error estándar de ajuste. Por último, el ajuste de la distribución LGE (Mansell, 2003) se llevó a cabo a través del método de momentos  $L$  (Hosking y Wallis, 1997). Como las predicciones esperadas en los periodos de retorno citados serán bastante similares, se adoptó como criterio de selección los valores máximos de los tres obtenidos en cada uno.

#### *Cálculo de los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes*

En las siguientes cuatro ecuaciones están definidas las fórmulas de las curvas envolventes de Creager, Lowry y Francou-Rodier, respectivamente (Ramírez-Orozco *et al.*, 2005):

$$Q = 1.303 \cdot C_c \cdot (0.386 \cdot A)^{0.936 \cdot A^{-0.048}} \quad (1)$$

$$Q = \frac{C_L \cdot A}{(A + 259)^{0.85}} \quad (2)$$

$$Q = 10^6 \cdot \left( \frac{A}{10^8} \right)^{1-0.10 \cdot K} \quad (3)$$

siendo:

$$K = 10 \cdot \left( 1 - \frac{\log Q - 6}{\log A - 8} \right) \quad (4)$$

en las cuales  $Q$  es el gasto de un cierto periodo de retorno ( $Tr$ ) en  $m^3/s$ ,  $A$  es el área de cuenca en  $km^2$ , y  $C_v$ ,  $C_L$  y  $K$  son los coeficientes de ajuste que serán definidos en cada subregión, para los cinco periodos de retorno de diseño. En la fórmula de Francou-Rodier, debido a que el coeficiente  $K$  está relacionado con área de cuenca (ecuación 4), entonces la expresión del gasto específico ( $q$ , en  $m^3/s/km^2$ ) será (Sokolov *et al.*, 1976):

$$q = \frac{(10)^{0.8 \cdot K - 2}}{A^{0.1 \cdot K}} \quad (5)$$

Para el cálculo de los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes se siguió un procedimiento extremadamente simple, que consistió en despejar de las ecuaciones (1), (2) y (3) tales coeficientes, y entonces sustituir en sus expresiones el gasto de un determinado  $Tr$  de cada estación hidrométrica y su área de cuenca respectiva. Se obtienen tantos coeficientes de Creager, Lowry y Francou-Rodier para cada uno de los cinco  $Tr$  analizados, como estaciones de aforos tenga la subregión. Por último, se escoge el mayor de cada grupo, con lo cual se asegura ubicar la curva envolvente de cierto  $Tr$  encima de todos los puntos correspondientes. Lógicamente, debido a la curvatura propia de cada envolvente, no siempre los valores máximos de los coeficientes  $C_v$ ,  $C_L$  y  $K$  son definidos por una sola estación hidrométrica.

## Subregiones analizadas

### Subregión Sinaloa Norte

En un contexto global, la Región Hidrológica 10 (Sinaloa) queda ubicada en la transición de un clima desértico (Sonora) a uno húmedo (Nayarit), y por ello su zona norte es semiárida y su porción sur subhúmeda. Por supuesto que en su parte montañosa, la lluvia media anual excede de los mil milímetros. En la parte septentrional de esta región existen 12 estaciones hidrométricas con escurrimiento virgen, de ellas, Los Molinos, en un trabajo previo (Campos-Aranda, 2008b), fue encontrada no confiable. Las características generales de las 11 estaciones disponibles en la subregión Sinaloa Norte se presentan el cuadro 1. Toda la información hidrométrica que será procesada en esta subregión y en las otras cuatro procede del sistema BANDAS (IMTA, 2002).

La prueba de Discordancias con las 11 estaciones disponibles establece un valor crítico de 2.632, el cual no es rebasado; las estaciones más discordantes son La Tina con  $D_i = 1.84$  y Badiraguato con  $D_i = 1.70$ . Por otra parte, la aplicación de la versión corregida del test de Langbein indica que quedan fuera de sus curvas de control las tres estaciones siguientes: Pericos, Zopilote y Badiraguato, por lo cual la subregión es todavía homogénea, pero en el límite. Al observar los valores del coeficiente de variación ( $Cv$ ) de los registros en el cuadro 1, los de La Tina y Badiraguato son los mayores. Eliminando Badiraguato, la prueba de Langbein conduce a una sola estación fuera de las curvas de control: Pericos; por ello, ahora la subregión es plenamente homogénea.

Los resultados del análisis probabilístico de los diez registros disponibles, con base en las tres funciones de distribución citadas, se tienen en el cuadro 2, mostrando en negritas los valores máximos adoptados para las predicciones buscadas. Una última consideración respecto a las estaciones que integran esta subregión es la enorme disparidad en tamaño de cuenca entre Huites y el resto, cuya área drenada

Cuadro 1. Características generales de las estaciones hidrométricas de cada una de las cinco subregiones analizadas.

Subregión Estaciones hidrométricas	Clave BANDAS	Periodo de registro (núm. de años)		A* (km <sup>2</sup> )	Gastos máximos anuales (m <sup>3</sup> /s) utilizados		
		Disponible	Utilizado		Máximo	Medio	C <sub>v</sub> **
<b>Sinaloa Norte (Región Hidrológica 10: Sinaloa)</b>							
1. Bamícori	10057	1951-1983(33)	1951-1983(33)	223	650.0	189.1	0.9336
2. Pericos	10086	1960-1992(32)	1960-1992(32)	270	653.5	236.3	0.6861
3. La Tina	10078	1960-1984(25)	1960-1984(25)	275	777.6	108.6	1.4019
4. El Bledal	10027	1937-1995(59)	1937-1995(59)	371	1 576.0	282.0	0.9225
5. Chico Ruiz	10090	1976-2002(25)	1976-2002(25)	391	912.1	225.2	0.8867
6. Zopilote	10034	1939-2001(58)	1939-2001(58)	666	1 030.0	346.5	0.8118
7. Badiraguato	10079	1959-1999(41)	1959-1999(41)	1 018	9 245.0	1 016.9	1.6151
8. Choix	10066	1955-2002(47)	1955-2002(47)	1 403	1 700.0	315.7	0.9206
9. Guamúchil	10031	1939-1971(33)	1939-1971(33)	1 645	3 507.0	652.6	0.9808
10. Naranjo	10029	1939-1984(45)	1939-1984(45)	2 064	3 093.4	633.3	1.0532
11. Huites	10037	1941-1993(53)	1941-1993(53)	26 020	15 000.0	3 176.4	1.0186
<b>Presa Solís-Chapala (Región Hidrológica 12: Lerma-Santiago)</b>							
1. La Patiña	12499	1955-1988(34)	1955-1988(34)	91	172.3	34.9	1.0452
2. Los Castillo	12418	1947-2001(48)	1947-2001(48)	128	208.7	41.2	1.1165
3. Huascato	12589	1965-2002(37)	1965-1987(23)	312	444.2	162.3	0.6040
4. Silao	12512	1957-1991(26)	1957-1991(26)	372	210.0	57.8	0.8702
5. El Batán	12558	1962-2002(40)	1962-1992(31)	399	200.0	71.2	0.7236
6. Cinco Señores	12535	1960-2002(37)	1960-2002(37)	408	513.1	175.4	0.6088
7. Las Américas	12436	1958-1989(25)	1958-1977(20)	528	500.0	217.4	0.5921
<b>Cuenca del Río Verde (Región Hidrológica 12: Lerma-Santiago)</b>							
1. Agostadero	12355	1940-1978(39)	1940-1978(39)	354	216.0	67.3	0.6179
2. Valle de Guadalupe	12371	1941-1995(47)	1941-1987(47)	394	423.0	83.3	0.8842
3. Lagos	12454	1951-2002(52)	1951-2002(31)	2 397	500.0	178.9	0.8919
4. San Gaspar	12370	1941-2002(61)	1941-2002(61)	4 390	711.0	178.7	0.8735
5. Ajojúcar	12358	1940-2002(60)	1980-2002(23)	6 597	294.0	66.7	0.9979
6. Paso del Sabino	12382	1965-2002(31)	1965-2002(31)	10 559	2 727.0	209.6	2.3006
7. La Cuña	12504	1947-2002(52)	1947-2002(52)	19 097	2 440.0	525.2	0.8730
<b>Región Hidrológica 23: Costa de Chiapas</b>							
1. San Nicolás	23022	1966-1992(27)	1966-1992(27)	26	301.0	112.4	0.5310
2. Tonalá	23011	1962-1990(25)	1962-1990(25)	157	741.2	158.5	0.8987
3. Cacaluta	23015	1965-1997(33)	1965-1997(33)	176	479.7	186.6	0.5374
4. Pijjiapán	23009	1963-1996(31)	1963-1996(31)	186	1 004.8	279.2	0.6945
5. Cahuacán	23003	1950-1992(40)	1950-1992(40)	250	498.9	181.6	0.4762
6. Despoblado	23019	1965-1997(31)	1965-1997(31)	273	591.2	276.3	0.5604
7. Malpaso	23006	1955-1993(23)	1955-1993(23)	426	1 327.0	340.5	0.8735
<b>Cuenca del Río Guayalejo (Región Hidrológica 26: Pánuco)</b>							
1. Guadalupe	26429	1972-2005(34)	1972-2005(34)	274	443.8	76.9	1.4060
2. Sabinas	26388	1960-2005(45)	1960-2005(45)	497	1 198.1	367.8	0.5794
3. La Servilleta	26280	1960-2005(46)	1960-2005(46)	2 532	1 676.0	454.6	0.6368
4. Río Frío	26296	1960-2005(46)	1960-2005(46)	2 785	1 241.2	578.9	0.3912
5. La Encantada	26218	1949-2005(56)	1949-2005(56)	3 725	3 449.6	351.9	1.6132
6. San Gabriel II	26149	1942-2005(59)	1942-2005(59)	4 937	2 414.0	390.8	1.4563
7. Magiscatzin II	26249	1954-2005(52)	1954-2005(52)	10 968	5 510.0	1 501.4	0.7441
8. Tamesí	26416	1973-2005(33)	1973-2005(33)	14 923	2 577.7	1 253.5	0.4500

\* Área de cuenca.

\*\* Coeficiente de variación.

Cuadro 2. Predicciones ( $m^3/s$ ) obtenidas con los tres modelos probabilísticos indicados en las diez estaciones hidrométricas de la subregión Sinaloa Norte de la Región Hidrológica 10 (Sinaloa).

Estación hidrométrica Modelo Probabilístico	EEA* ( $m^3/s$ )	Periodos de retorno en años				
		10	25	50	100	500
(1) Bamícori						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	46.5	<b>416</b>	<b>649</b>	<b>866</b>	<b>1 123</b>	1 908
General de Valores Extremos ( <i>mL</i> )	52.3	391	591	783	1 020	1 816
Logística generalizada	56.7	378	575	773	1 029	<b>1 968</b>
(2) Pericos						
Log-Pearson tipo III ( <i>dr</i> )	31.6	446	566	652	733	908
General de Valores Extremos ( <i>mL</i> )	26.1	<b>453</b>	<b>591</b>	701	815	1 103
Logística generalizada	30.4	438	583	<b>711</b>	<b>857</b>	<b>1 291</b>
(3) La Tina						
Log-Pearson tipo III ( <i>dr</i> )	81.8	<b>256</b>	<b>405</b>	536	683	1 079
General de Valores Extremos ( <i>mv</i> )	80.7	239	403	<b>581</b>	<b>825</b>	<b>1 805</b>
Logística generalizada	87.0	227	370	523	732	1 567
(4) El Bledal						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	62.8	<b>575</b>	837	1 066	1 325	2 053
General de Valores Extremos ( <i>mv</i> )	45.5	563	<b>865</b>	<b>1 169</b>	<b>1 560</b>	<b>2 970</b>
Logística generalizada	66.0	536	795	1 054	1 389	2 602
(5) Chico Ruiz						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	58.7	<b>497</b>	<b>653</b>	756	847	1 019
General de Valores Extremos ( <i>mv</i> )	49.2	481	721	<b>949</b>	<b>1 227</b>	<b>2 142</b>
Logística generalizada	60.2	457	647	820	1 027	1 684
(6) Zopilote						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	51.0	<b>802</b>	<b>1 077</b>	<b>1 263</b>	<b>1 431</b>	1 751
General de Valores Extremos ( <i>mL</i> )	48.3	728	967	1 153	1 346	1 824
Logística generalizada	60.2	701	953	1 172	1 421	<b>2 156</b>
(8) Choix						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	79.6	<b>611</b>	<b>939</b>	<b>1 262</b>	<b>1 669</b>	3 054
General de Valores Extremos ( <i>mL</i> )	90.4	592	895	1 199	1 590	2 994
Logística generalizada	95.4	575	870	1 179	1 590	<b>3 177</b>
(9) Guamúchil						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	245.9	<b>1 323</b>	<b>1 948</b>	2 507	3 150	5 024
General de Valores Extremos ( <i>mL</i> )	244.5	1 254	1 927	<b>2 609</b>	<b>3 492</b>	6 701
Logística generalizada	256.3	1 218	1 873	2 562	3 487	<b>7 089</b>
(10) Naranjo						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	113.3	<b>1 473</b>	<b>2 323</b>	<b>3 092</b>	<b>3 975</b>	6 504
General de Valores Extremos ( <i>mL</i> )	156.3	1 353	2 105	2 843	3 775	7 010
Logística Generalizada	173.5	1 309	2 044	2 799	3 792	<b>7 522</b>
(11) Huites						
Log-Pearson tipo III ( <i>dl</i> )	815.7	<b>6 290</b>	<b>10 492</b>	<b>15 061</b>	<b>21 301</b>	<b>45 851</b>
General de Valores Extremos ( <i>mL</i> )	1 007.1	5 948	9 614	13 600	19 092	41 299
Logística generalizada	1 085.8	5 786	9 322	13 263	18 830	42 460

\* Error estándar de ajuste.

extremadamente montañosa no pertenece a la zona donde se ubica el resto y se presume que su comportamiento hidrológico tampoco. Por tales consideraciones se eliminó de la subregión Sinaloa Norte.

En el cuadro 3 se muestran los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes, deducidos al hacer cumplir el gasto máximo de diseño en cada estación hidrométrica, de acuerdo con el área de cuenca de ésta. Se indican en

negritas los valores máximos. Se observa que el coeficiente de Creager cambia de 14.81 a 78.90, al pasar el periodo de retorno de 10 a 500 años; en cambio, el coeficiente de Lowry tiene un aumento de 518.36 a 2647.07, y por último, el de Francou-Rodier pasa de 4.033 a 5.507, para el incremento de intervalo de recurrencia indicado. Finalmente, en la figura 1 se muestran las crecientes de diseño expresadas como gasto específico y las curvas envolventes de Creager con periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

### *Subregión Presa Solís-Chapala*

Esta subregión de la Región Hidrológica 12 (Lerma-Santiago) abarca de la Presa Solís, en el sur del estado de Guanajuato, hasta la laguna de Chapala. Tiene como colectores importantes que descargan al río Lerma los ríos de la Laja, Guanajuato y Turbio. Gran parte de esta subregión está en el estado de Guanajuato, con su porción sur en Michoacán y su zona poniente en Jalisco; abarca cuencas

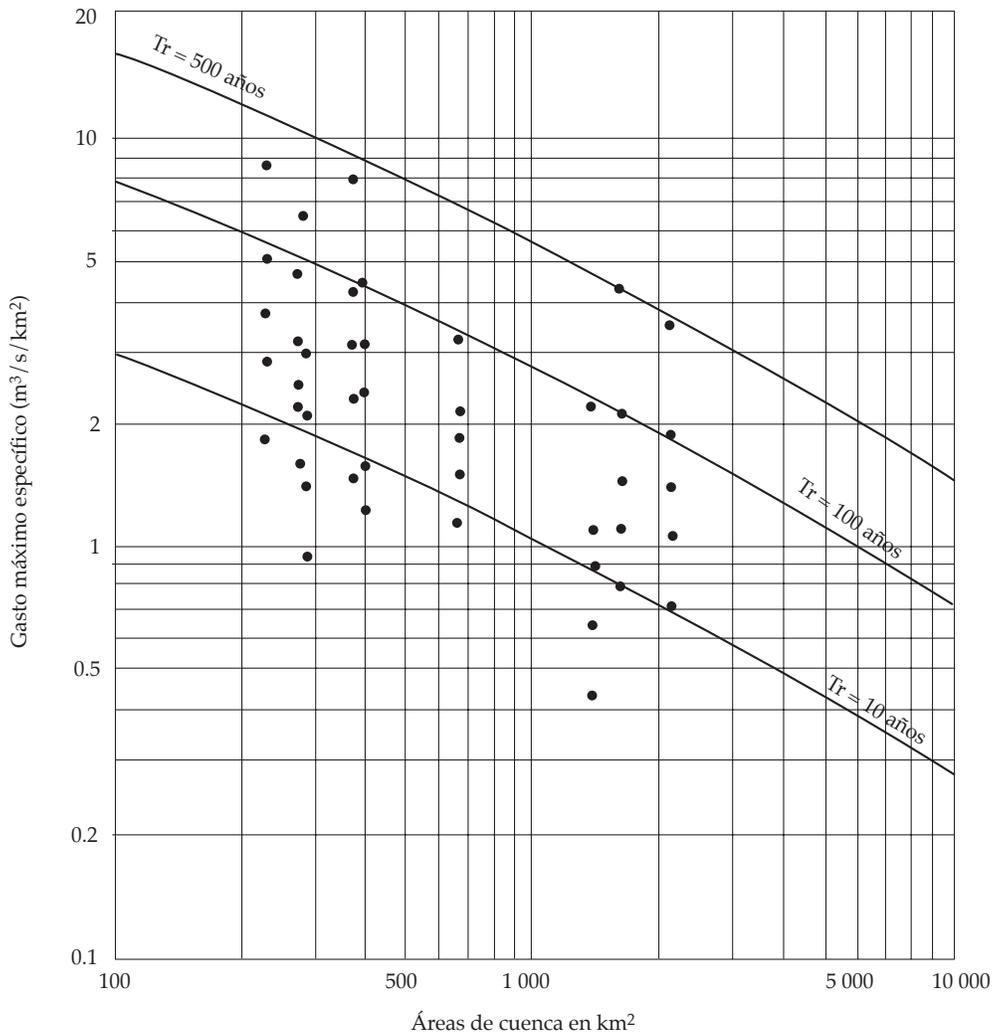


Figura 1. Contraste gráfico con las curvas envolventes de Creager en la subregión Sinaloa Norte de la Región Hidrológica 10.

Cuadro 3. Parámetros de ajuste de las curvas envolventes de Creager, Lowry y Francou-Rodier, obtenidos en las nueve estaciones hidrométricas de la subregión Sinaloa Norte.

Periodo de retorno ( $Tr$ ) Coeficientes de ajuste	Número de cuenca según el cuadro 1									
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	
$Tr = 10$ años										
Creager ( $C_c$ )	12.80	12.52	7.00	13.35	11.22	13.74	7.31	14.72	<b>14.81</b>	
Lowry ( $C_l$ )	355.94	346.47	193.78	371.31	312.72	399.87	237.97	493.30	<b>518.36</b>	
Francou-Rodier ( $K$ )	4.018	3.995	3.541	<b>4.033</b>	3.891	4.019	3.377	3.983	3.956	
$Tr = 25$ años										
Creager ( $C_c$ )	19.96	16.33	11.08	20.09	14.75	18.46	11.24	21.68	<b>23.36</b>	
Lowry ( $C_l$ )	555.30	452.02	306.57	558.58	410.88	536.99	365.72	726.34	<b>817.49</b>	
Francou-Rodier ( $K$ )	4.360	4.203	3.899	4.360	4.110	4.267	3.762	4.334	<b>4.378</b>	
$Tr = 50$ años										
Creager ( $C_c$ )	26.64	19.64	15.89	27.15	21.43	21.64	15.10	29.04	<b>31.09</b>	
Lowry ( $C_l$ )	740.97	543.81	439.80	754.88	597.13	629.72	491.52	972.80	<b>1 088.11</b>	
Francou-Rodier ( $K$ )	4.581	4.347	4.181	4.601	4.410	4.400	4.026	4.599	<b>4.643</b>	
$Tr = 100$ años										
Creager ( $C_c$ )	34.54	23.68	22.56	36.23	27.71	24.52	19.98	38.86	<b>39.97</b>	
Lowry ( $C_l$ )	960.87	655.47	624.50	1 007.37	772.05	713.49	650.03	1 302.04	<b>1 398.84</b>	
Francou-Rodier ( $K$ )	4.781	4.492	4.455	4.831	4.617	4.505	4.277	4.864	<b>4.876</b>	
$Tr = 500$ años										
Creager ( $C_c$ )	60.54	35.67	49.36	68.98	48.37	36.95	38.02	<b>78.90</b>	75.64	
Lowry ( $C_l$ )	1 683.88	987.42	1 366.33	1 917.88	1 347.78	1 074.97	1 237.36	2 643.24	<b>2 647.07</b>	
Francou-Rodier ( $K$ )	5.212	4.812	5.066	5.346	5.064	4.849	4.853	<b>5.507</b>	5.467	

pequeñas. En el cuadro 1 se tienen las características generales de las siete estaciones hidrométricas procesadas. Se observa que en las estaciones Huascato, El Batán y Las Américas se detectaron tramos de sus registros no confiables, los cuales fueron eliminados.

La prueba de Discordancias no detecta registros anómalos. Su valor crítico para siete estaciones hidrométricas es de 1.917 y las discordancias máximas observadas en La Patiña y Las Américas fueron 1.58 y 1.40, respectivamente. Por otra parte, el nuevo test de Langbein define a esta subregión homogénea con dos estaciones fuera de las curvas de control: Los Castillo y Cinco Señores. Al eliminar a Los Castillo por tener el mayor coeficiente de variación ( $Cv$ ), La Patiña ahora queda fuera y por ello se decidió conservar las siete estaciones de aforo en tal subregión.

Los resultados de las predicciones buscadas se tienen en el cuadro 4, mostrando únicamente los valores adoptados y un orden de magnitud del error estándar de ajuste (EEA). Finalmente, en el cuadro 5 se exponen los coeficientes de ajuste obtenidos para las curvas envolventes de diseño, presentando con negritas los valores máximos. Se deduce que el coeficiente de Creager cambia de 7.81 a 22.22, al pasar el periodo de retorno de 10 a 500 años; en cambio, el coeficiente de Lowry tiene un aumento de 222.02 a 645.68, y por último el de Francou-Rodier pasa de 3.583 a 4.430, para el incremento de intervalo de recurrencia indicado. Por último, en la figura 2 se muestran las crecientes de diseño expresadas como gasto específico y las curvas envolventes de Lowry con periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

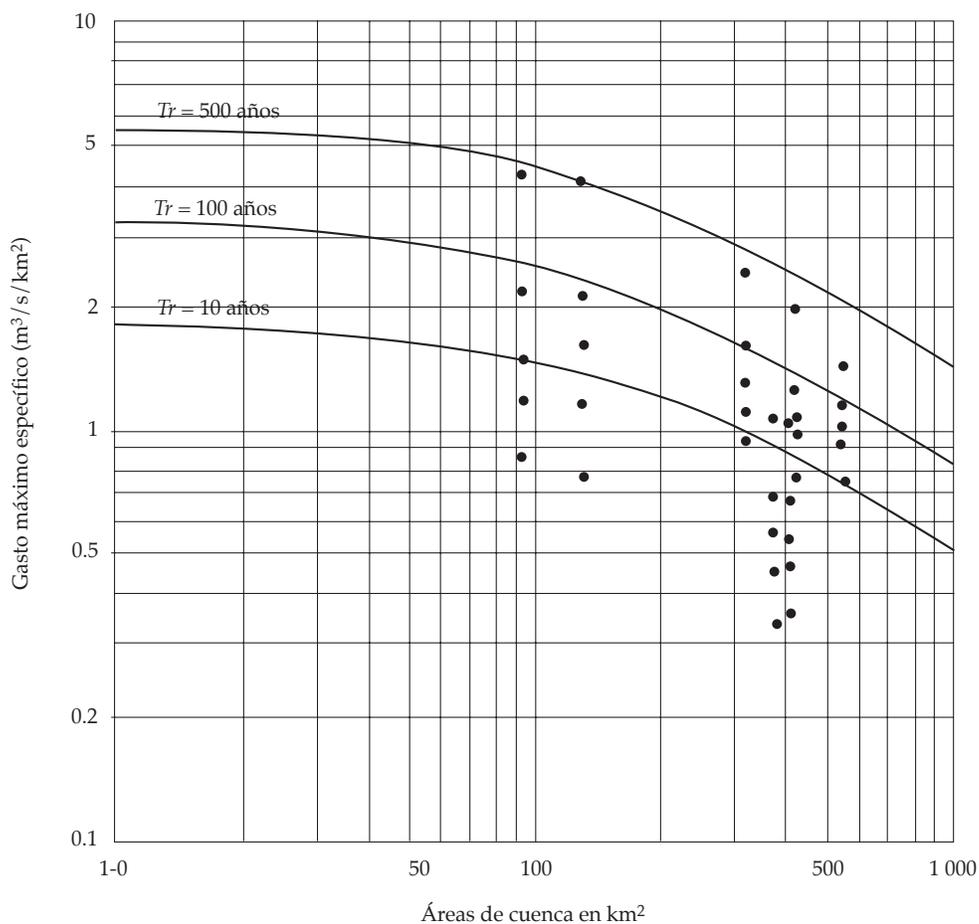


Figura 2. Contraste gráfico con las curvas envolventes de Lowry, en la subregión Presa Solís-Chapala de la Región Hidrológica 12.

Cuadro 4. Predicciones ( $m^3/s$ ) adoptadas en las siete estaciones hidrométricas de la subregión Presa Solís-Chapala de la Región Hidrológica 12 (Lerma-Santiago).

Estación hidrométrica	EEA ( $m^3/s$ )	Periodos de retorno en años				
		10	25	50	100	500
1. La Patiña	10.5	79	116	150	199	389
2. Los Castillo	10.0	100	164	222	290	522
3. Huascato	22.0	293	374	444	529	779
4. Silao	11.5	127	170	211	262	423
5. El Batán	8.0	145	188	225	274	422
6. Cinco Señores	17.0	319	404	477	566	820
7. Las Américas	22.0	405	489	558	638	848

Cuadro 5. Parámetros de ajuste de las curvas envolventes de Creager, Lowry y Francou-Rodier, obtenidos en las siete estaciones hidrométricas de la subregión Presa Solís-Chapala.

Periodo de retorno ( $T_r$ ) Coeficientes de ajuste	Número de cuenca según el cuadro 1						
	1	2	3	4	5	6	7
$T_r = 10$ años							
Creager ( $C_c$ )	4.15	4.26	7.47	2.95	3.24	7.04	<b>7.81</b>
Lowry ( $C_l$ )	126.20	123.69	206.94	81.90	90.34	196.62	<b>222.02</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	3.209	3.212	<b>3.583</b>	2.824	2.890	3.513	3.572
$T_r = 25$ años							
Creager ( $C_c$ )	6.09	6.98	<b>9.54</b>	3.94	4.20	8.92	9.43
Lowry ( $C_l$ )	185.30	202.86	264.15	109.63	117.13	249.02	<b>267.07</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	3.485	3.577	<b>3.775</b>	3.057	3.099	3.703	3.727
$T_r = 50$ años							
Creager ( $C_c$ )	7.87	9.45	<b>11.33</b>	4.89	5.03	10.53	10.76
Lowry ( $C_l$ )	239.61	274.60	<b>313.59</b>	136.07	140.19	294.01	305.90
Francou-Rodier ( $K$ )	3.670	3.800	<b>3.911</b>	3.230	3.244	3.837	3.835
$T_r = 100$ años							
Creager ( $C_c$ )	10.44	12.34	<b>13.49</b>	6.08	6.12	12.49	12.31
Lowry ( $C_l$ )	317.88	358.71	<b>373.63</b>	168.96	170.71	348.87	349.76
Francou-Rodier ( $K$ )	3.873	3.997	<b>4.049</b>	3.403	3.402	3.975	3.946
$T_r = 500$ años							
Creager ( $C_c$ )	20.41	<b>22.22</b>	19.87	9.81	9.43	18.10	16.36
Lowry ( $C_l$ )	621.39	<b>645.68</b>	550.20	272.79	262.92	505.43	464.88
Francou-Rodier ( $K$ )	4.355	<b>4.430</b>	4.354	3.786	3.749	4.274	4.180

### Subregión Cuenca del Río Verde

Hacia el poniente de la subregión anterior colinda la cuenca del Río Verde, que desemboca en el río Santiago, al noreste de la ciudad de Guadalajara. Gran parte del estado de Aguascalientes queda dentro de esta subregión, cuya porción oriental pertenece a Guanajuato, zonas del norte a Zacatecas y el resto a Jalisco; abarca cuencas grandes. De las siete estaciones hidrométricas, cuyas características generales se han concentrado en el cuadro 1, únicamente las dos primeras tienen régimen virgen, el resto afora cuencas bastante aprovechadas como Ajojúcar y Paso del Sabino sobre el río Aguascalientes, o bien Lagos y San Gaspar, en cuya cuenca se ubica la Presa El Cuarenta. En la estación Valle de Guadalupe se encontró un tramo de registro no confiable y en la estación Lagos su serie de gastos máximos corresponde

a los valores anuales superiores a  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , ya que se aceptó que la presa El Cuarenta afecta totalmente los años de crecientes bajas.

Nuevamente, la prueba de Discordancias ( $D_c = 1.917$ ) no detecta registros anómalos y los que presentan las discordancias mayores son Lagos y Paso del Sabino con 1.58 y 1.79, respectivamente. La nueva versión del test de Langbein indica que dos estaciones quedan fuera de sus curvas de control: Agostadero y Paso del Sabino. Al suprimir la segunda, cuyo coeficiente de variación ( $C_v$ ) difiere notablemente del resto (ver cuadro 1), la prueba deja fuera a la primera, pero en el límite, por ello se acepta procesar seis estaciones. En el cuadro 6 se tienen las predicciones adoptadas y en el cuadro 7 los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes de esta subregión, indicando con negritas las magnitudes máximas. Se observa que el coeficiente de Creager cambia de 4.46 a

21.77, al pasar el periodo de retorno de 10 a 500 años; en cambio el coeficiente de Lowry tiene un aumento de 241.19 a 1177.59, y por último el de Francou-Rodier pasa de 3.020 a 4.160, para el incremento de intervalo de recurrencia indicado. Finalmente, en la figura 3 se muestran las crecientes de diseño expresadas como gasto específico y las curvas envolventes de Francou-Rodier, que son rectas en el papel logarítmico, con periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

### Subregión Costa de Chiapas

La Región Hidrológica 23 (Costa de Chiapas) puede ser tratada como una subregión, ya que como se observa en el cuadro 1, las características generales y estadísticas de sus siete estaciones hidrométricas son bastante similares. La prueba de Discordancias ( $D_c = 1.917$ ) no muestra registros anómalos y las discordancias máximas de 1.70 y 1.46 se presentan en las estaciones

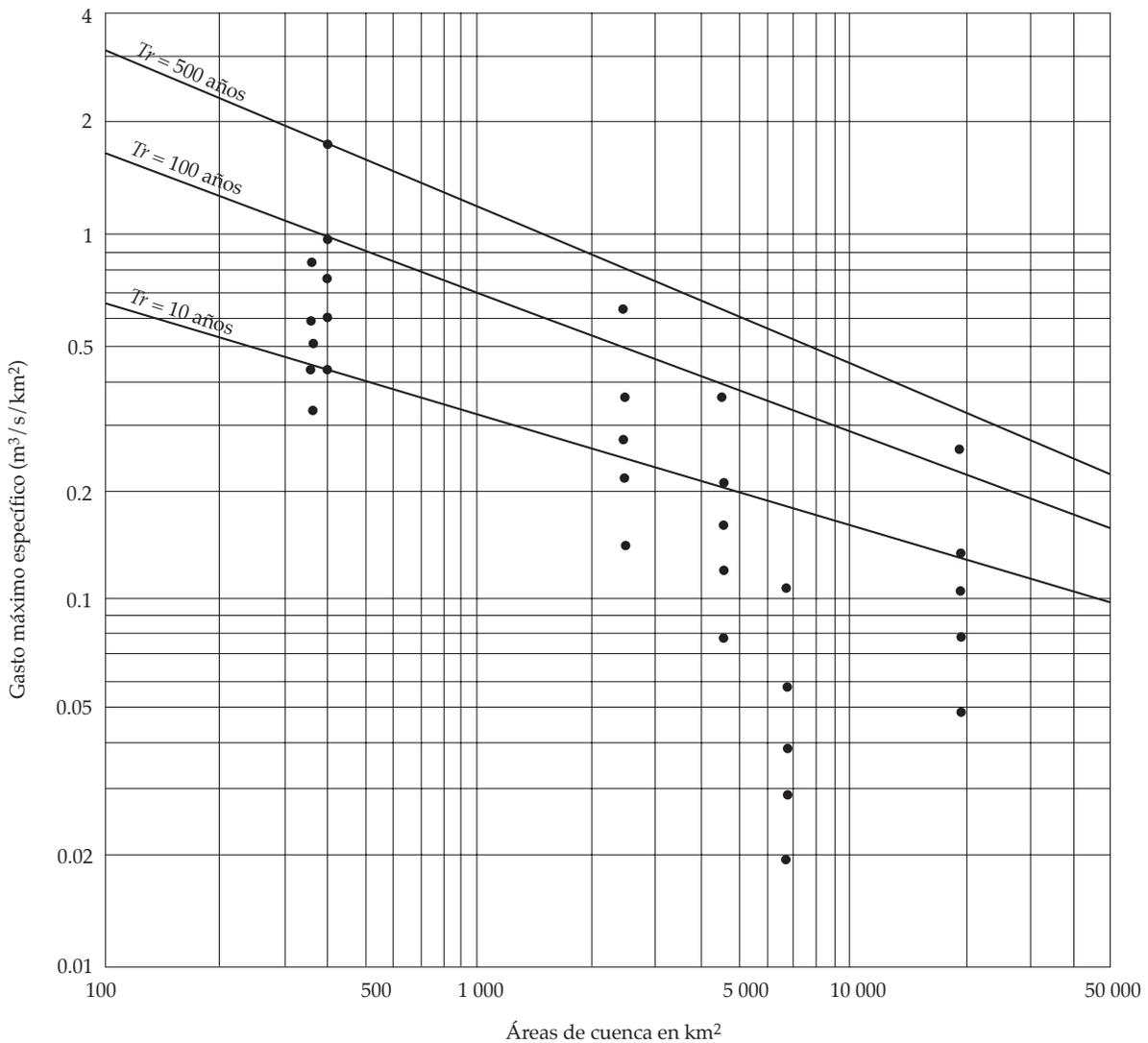


Figura 3. Contraste gráfico con las curvas envolventes de Francou-Rodier en la subregión Cuenca del Río Verde de la Región Hidrológica 12.

Cuadro 6. Predicciones ( $m^3/s$ ) adoptadas en las siete estaciones hidrométricas de la subregión Cuenca del Río Verde de la Región Hidrológica 12 (Lerma-Santiago).

Estación hidrométrica	EEA ( $m^3/s$ )	Periodos de retorno en años				
		10	25	50	100	500
1. Agostadero	9.0	121	154	180	212	302
2. Valle de Guadalupe	21.0	169	239	302	388	698
3. Lagos	55.0	381	536	695	892	1 549
4. San Gaspar	32.0	372	559	730	929	1 656
5. Ajojúcar	20.0	150	227	294	376	725
7. La Cuña	111.0	1 046	1 519	2 023	2 664	5 107

Cuadro 7. Parámetros de ajuste de las curvas envolventes de Creager, Lowry y Francou-Rodier, obtenidos en las seis estaciones hidrométricas de la subregión Cuenca del Río Verde.

Periodo de retorno ( $Tr$ ) Coeficientes de ajuste	Número de cuenca según el cuadro 1					
	1	2	3	4	5	7
$Tr = 10$ años						
Creager ( $C_c$ )	2.88	3.80	3.59	2.72	0.94	<b>4.46</b>
Lowry ( $C_l$ )	80.01	105.94	129.38	111.00	41.44	<b>241.19</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	2.814	<b>3.020</b>	2.600	2.130	0.853	1.986
$Tr = 25$ años						
Creager ( $C_c$ )	3.67	5.38	5.05	4.09	1.42	<b>6.47</b>
Lowry ( $C_l$ )	101.83	149.82	182.01	166.80	62.71	<b>350.26</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	3.006	<b>3.299</b>	2.921	2.536	1.284	2.422
$Tr = 50$ años						
Creager ( $C_c$ )	4.29	6.79	6.55	5.34	1.83	<b>8.62</b>
Lowry ( $C_l$ )	119.02	189.32	236.00	217.83	81.22	<b>466.47</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	3.130	<b>3.487</b>	3.165	2.802	1.552	2.756
$Tr = 100$ años						
Creager ( $C_c$ )	5.05	8.73	8.40	6.80	2.34	<b>11.35</b>
Lowry ( $C_l$ )	140.18	243.23	302.89	277.21	103.87	<b>614.27</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	3.261	<b>3.688</b>	3.400	3.042	1.808	3.078
$Tr = 500$ años						
Creager ( $C_c$ )	7.19	15.70	14.59	12.12	4.52	<b>21.77</b>
Lowry ( $C_l$ )	199.68	437.56	525.99	494.14	200.29	<b>1 177.59</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	3.542	<b>4.160</b>	3.918	3.618	2.490	3.838

Cuadro 8. Predicciones ( $m^3/s$ ) adoptadas en las siete estaciones hidrométricas de la subregión Costa de Chiapas (Región Hidrológica 23).

Estación hidrométrica	EEA ( $m^3/s$ )	Periodos de retorno en años				
		10	25	50	100	500
1. San Nicolás	12.0	191	249	297	352	538
2. Tonalá	64.0	312	448	584	765	1 472
3. Cacaluta	21.0	319	391	449	516	697
4. Pijijiapan	60.0	525	689	820	956	1 403
5. Cahuacán	19.0	283	374	457	568	979
6. Despoblado	26.0	506	566	620	680	816
7. Malpaso	106.0	674	1 109	1 580	2 222	4753

Malpaso y Tonalá, respectivamente. La versión corregida del test de Langebein indica que sólo la estación Cahuacán queda fuera de sus curvas de control, por ello la región es homogénea.

En el cuadro 8 se presentan las predicciones adoptadas y el cuadro 9 los valores de los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes, mostrando con negritas los valores máximos. Se deduce que el coeficiente de Creager cambia de 23.14 a 102.55, al pasar el periodo de retorno de 10 a 500 años; en cambio, el coeficiente de Lowry tiene un aumento de 896.76 a 2870.09, y por último el de Francou-Rodier pasa de 4.352 a 5.675, para el incremento de intervalo de recurrencia indicado. Por último, en la figura 4

se muestran las crecientes de diseño expresadas como gasto específico y las curvas envolventes de Creager y Lowry, las primeras punteadas, con periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

#### Subregión Cuenca del Río Guayalejo

Este río desemboca en la margen izquierda del río Pánuco frente a la ciudad de Tampico. Su cuenca en la zona norte está en el estado de Nuevo León y casi su totalidad en el estado de Tamaulipas. Existen varias estaciones hidrométricas que aforan manantiales, y para Mante, en la inspección inicial se determinó que su registro no es confiable. En la Dirección

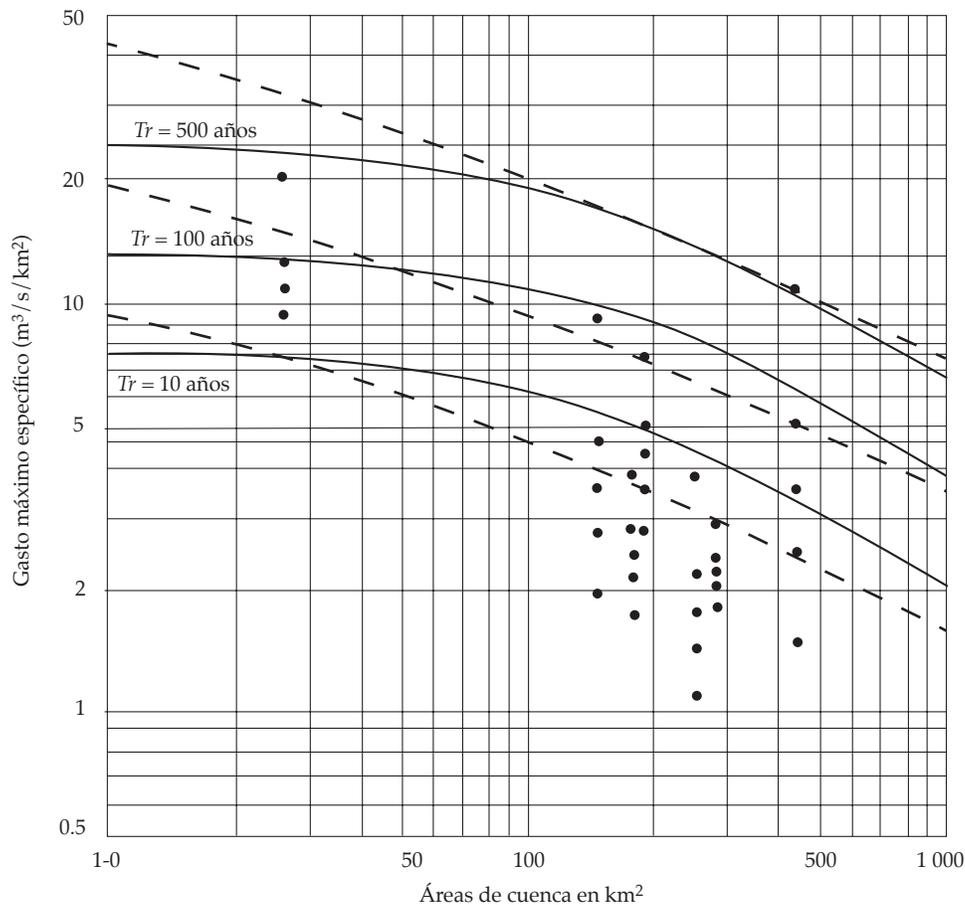


Figura 4. Contraste gráfico con las curvas envolventes de Creager y Lowry en la subregión Costa de Chiapas de la Región Hidrológica 23.

Local Tamaulipas de la Comisión Nacional del Agua (Conagua) se obtuvo la actualización de los registros hasta el año 2005. Las características generales y estadísticas de las ocho restantes se muestran el cuadro 1, en donde se observa que su variabilidad de valores del coeficiente de variación ( $C_v$ ) es grande, pasando de 0.3912 en Río Frío a 1.6132 en La Encantada.

La prueba de Discordancias ( $D_c = 2.140$ ) no determina que alguno de los registros sea anómalo, las discordancias máximas son 1.75 y 1.43 en las estaciones La Encantada y Guadalupe, respectivamente. Por otra parte, la nueva versión del test de Langbein indica que la región es inhomogénea, ya que sólo la estación Guadalupe queda dentro de sus curvas de control. Al definir como estaciones de aforos más importantes de tal subregión a Magiscatzin II y Tamesí, cuyos valores de  $C_v$  son bajos, se optó por realizar pruebas de

homogeneidad únicamente con las estaciones de menor  $C_v$ , es decir, Sabinas, La Servilleta, Río Frío y las dos citadas. Para estas cinco estaciones hidrométricas, Río Frío y Magiscatzin II quedan fuera de las curvas de control, por lo cual tal subregión es inhomogénea. Eliminando Río Frío, las cuatro estaciones de aforos restantes forman una zona homogénea.

En el cuadro 10 se tienen las predicciones adoptadas en las cuatro estaciones hidrométricas procesadas y en el cuadro 11, los valores de los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes, mostrando en negritas sus valores máximos. Se observa que el coeficiente de Creager cambia de 15.13 a 56.61, al pasar el periodo de retorno de 10 a 500 años; en cambio, el coeficiente de Lowry tiene un aumento de 740.14 a 2770.04, y por último el de Francou-Rodier pasa de 3.986 a 5.199, para el incremento de intervalo de recurrencia

Cuadro 9. Parámetros de ajuste de las curvas envolventes de Creager, Lowry y Francou-Rodier, obtenidos en las siete estaciones hidrométricas de la subregión Costa de Chiapas.

Periodo de retorno ( $Tr$ ) Coeficientes de ajuste	Número de cuenca según el cuadro 1						
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Tr</i> = 10 años							
Creager ( $C_c$ )	<b>23.14</b>	11.76	11.24	17.92	8.16	13.89	14.54
Lowry ( $C_l$ )	<b>896.76</b>	334.57	316.95	503.21	226.23	384.60	406.99
Francou-Rodier ( $K$ )	<b>4.352</b>	3.960	3.924	4.277	3.666	4.076	4.095
<i>Tr</i> = 25 años							
Creager ( $C_c$ )	<b>30.17</b>	16.88	13.78	23.52	10.79	15.54	23.93
Lowry ( $C_l$ )	<b>1 169.08</b>	480.41	388.49	660.41	298.98	430.21	669.67
Francou-Rodier ( $K$ )	<b>4.527</b>	4.230	4.078	4.483	3.882	4.164	4.498
<i>Tr</i> = 50 años							
Creager ( $C_c$ )	<b>35.98</b>	22.01	15.83	27.99	13.18	17.02	34.09
Lowry ( $C_l$ )	<b>1 394.44</b>	626.24	446.12	785.97	365.33	471.25	954.08
Francou-Rodier ( $K$ )	4.644	4.429	4.182	4.614	4.038	4.235	<b>4.784</b>
<i>Tr</i> = 100 años							
Creager ( $C_c$ )	42.64	28.83	18.19	32.63	16.38	18.67	<b>47.94</b>
Lowry ( $C_l$ )	<b>1 652.67</b>	820.33	512.69	916.33	454.07	516.86	1 341.75
Francou-Rodier ( $K$ )	4.756	4.631	4.287	4.731	4.206	4.307	<b>5.060</b>
<i>Tr</i> = 500 años							
Creager ( $C_c$ )	65.18	55.47	24.57	47.89	28.23	22.41	<b>102.55</b>
Lowry ( $C_l$ )	2 525.96	1 578.47	692.53	1 344.78	782.62	620.23	<b>2 870.09</b>
Francou-Rodier ( $K$ )	5.035	5.121	4.514	5.021	4.628	4.449	<b>5.675</b>

Cuadro 10. Predicciones ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) adoptadas en las cuatro estaciones hidrométricas de la subregión Cuenca del Río Guayalejo de la Región Hidrológica 26 (Pánuco).

Estación hidrométrica	EEA ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Periodos de retorno en años				
		10	25	50	100	500
1. Sabinas	35.0	646	931	1 214	1 574	2 844
2. La Servilleta	74.0	817	1 069	1 269	1 515	2 297
3. Magiscatzin II	160.0	2 929	4 153	5 219	6 420	10 962
4. Tamesí	135.0	1 994	2 483	2 917	3 467	5 161

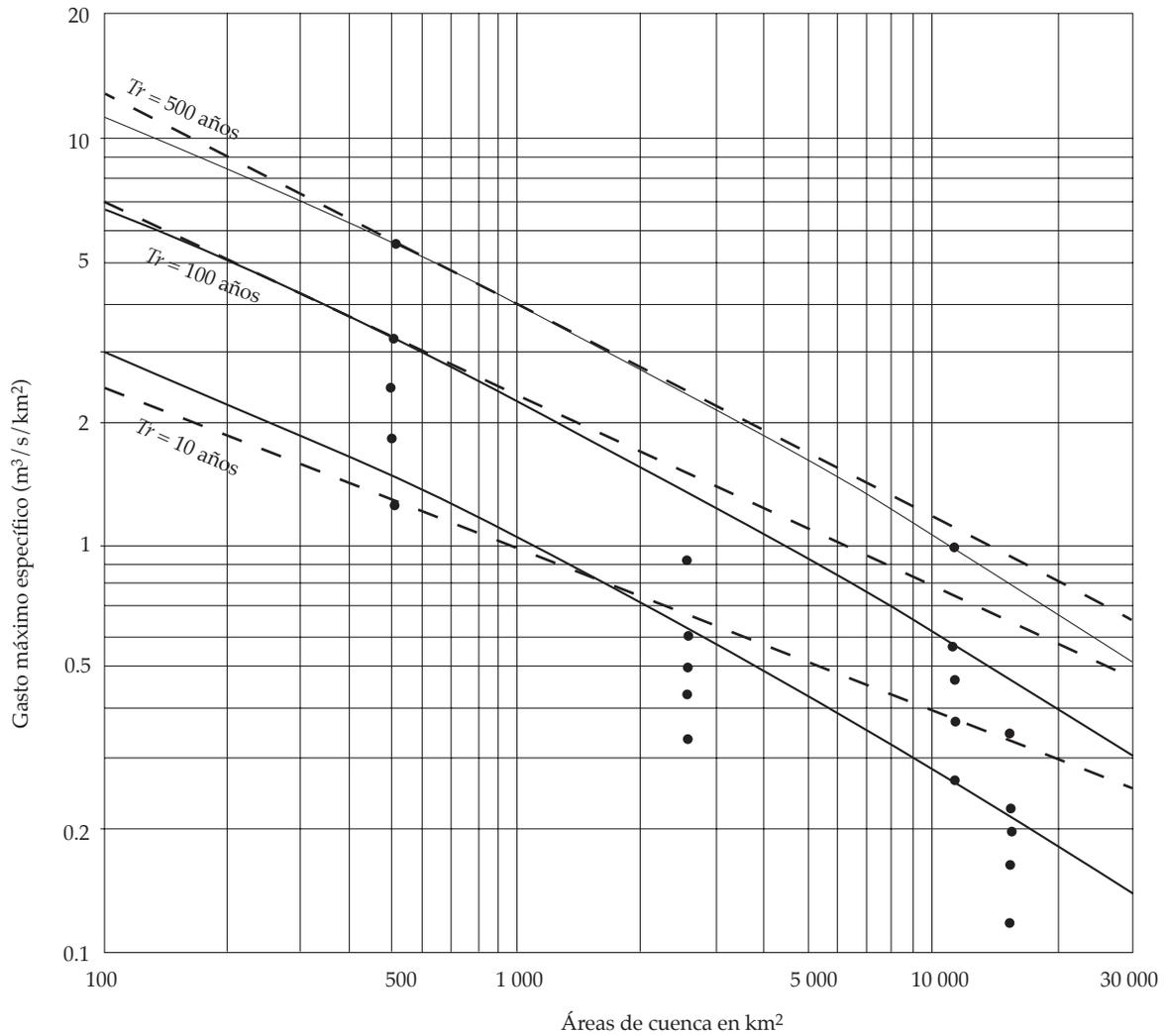


Figura 5. Contraste gráfico con las curvas envolventes de Creager y Francou-Rodier en la subregión Cuenca del Río Guayalejo de la Región Hidrológica 26.

indicado. Finalmente, en la figura 5 se muestran las crecientes de diseño expresadas como gasto específico y las curvas envolventes de Creager y Francou-Rodier, estas últimas punteadas, con periodos de retorno de 10, 100 y 500 años.

### Discusión de resultados

Asociadas con las predicciones estimadas (cuadros 2, 4, 6, 8 y 10) está el intervalo en que tienen validez, el cual queda definido por la amplitud de áreas de cuenca que tienen las estaciones hidrométricas que integran la subregión. Para las cinco subregiones analizadas, dos tienen intervalo corto: Presa Solís-Chapala y Costa de Chiapas, cuya amplitud abarca de 25 a 600 km<sup>2</sup>, aproximadamente. Otras dos subregiones tienen intervalo grande: cuencas de los ríos Verde y Guayalejo, variando de 350 a 20 000 km<sup>2</sup>.

La subregión Sinaloa Norte puede considerarse intermedia, con cuencas que varían de 223 a 2 064 km<sup>2</sup>. Las magnitudes anteriores se pueden verificar en las figuras 1 a 5.

La inspección de los cuadros 3, 5, 7, 9 y 11, que presentan los valores de los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes de diseño de Creager, Lowry y Francou-Rodier por subregiones, obtenidos para cada uno de los cinco periodos de retorno, y en cada cuenca o estación hidrométrica procesada, *debe* mostrar una similitud de magnitudes por renglones, lo cual implica una definición acertada de tal subregión, y una selección y procesamiento correctos de los registros de gastos máximos anuales. Los cuadros citados muestran tal similitud.

Por otra parte, en el cuadro 12 se han concentrado los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes de diseño, para los cinco

Cuadro 11. Parámetros de ajuste de las curvas envolventes de Creager, Lowry y Francou-Rodier, obtenidos en las cuatro estaciones hidrométricas de la subregión Cuenca de Río Guayalejo.

Periodo de retorno ( $T_r$ ) Coeficientes de ajuste	Número de cuenca según el cuadro 1			
	2	3	7	8
$T_r = 10$ años				
Creager ( $C_c$ )	12.86	7.52	<b>15.13</b>	9.24
Lowry ( $C_L$ )	363.60	273.94	<b>740.14</b>	478.63
Francou-Rodier ( $K$ )	<b>3.986</b>	3.282	3.603	2.943
$T_r = 25$ años				
Creager ( $C_c$ )	18.53	9.83	<b>21.45</b>	11.51
Lowry ( $C_L$ )	524.01	358.43	<b>1 049.44</b>	596.01
Francou-Rodier ( $K$ )	<b>4.285</b>	3.536	3.986	3.192
$T_r = 50$ años				
Creager ( $C_c$ )	24.16	11.67	<b>26.95</b>	13.52
Lowry ( $C_L$ )	683.29	425.49	<b>1 318.82</b>	700.18
Francou-Rodier ( $K$ )	<b>4.502</b>	3.698	4.236	3.374
$T_r = 100$ años				
Creager ( $C_c$ )	31.33	13.94	<b>33.16</b>	16.07
Lowry ( $C_L$ )	885.91	507.98	<b>1 622.30</b>	832.20
Francou-Rodier ( $K$ )	<b>4.715</b>	3.866	4.463	3.570
$T_r = 500$ años				
Creager ( $C_c$ )	56.60	21.13	<b>56.61</b>	23.92
Lowry ( $C_L$ )	1 600.72	770.18	<b>2 770.04</b>	1 238.82
Francou-Rodier ( $K$ )	<b>5.199</b>	4.259	5.050	4.022

Cuadro 12. Coeficientes de ajuste de las curvas envolventes de diseño en las subregiones y regiones indicadas.

Periodo de retorno ( $T_r$ ) Subregión y región hidrológica	Coeficientes de ajuste máximos		
	Creager ( $C_c$ )	Lowry ( $C_L$ )	Francou-Rodier ( $K$ )
$T_r = 10$ años			
Sinaloa Norte	14.81	518.36	4.033
Presa Solís-Chapala	7.81	222.02	3.583
Cuenca del Río Verde	4.46	241.19	3.020
Costa de Chiapas	23.14	896.76	4.352
Cuenca del Río Guayalejo	15.13	740.14	3.986
$T_r = 25$ años			
Sinaloa Norte	23.36	817.49	4.378
Presa Solís-Chapala	9.54	268.07	3.775
Cuenca del Río Verde	6.47	350.26	3.299
Costa de Chiapas	30.17	1 169.08	4.527
Cuenca del Río Guayalejo	21.45	1 049.44	4.285
$T_r = 50$ años			
Sinaloa Norte	31.09	1 088.11	4.643
Presa Solís-Chapala	11.33	313.59	3.911
Cuenca del Río Verde	8.62	466.47	3.487
Costa de Chiapas	35.98	1 394.44	4.784
Cuenca del Río Guayalejo	26.95	1 318.82	4.502
$T_r = 100$ años			
Sinaloa Norte	39.97	1 398.84	4.876
Presa Solís-Chapala	13.49	373.63	4.049
Cuenca del Río Verde	11.35	614.27	3.688
Costa de Chiapas	47.94	1 652.67	5.060
Cuenca del Río Guayalejo	33.16	1 622.30	4.715
$T_r = 500$ años			
Sinaloa Norte	78.90	2 647.07	5.507
Presa Solís-Chapala	22.22	645.68	4.430
Cuenca del Río Verde	21.77	1 177.59	4.160
Costa de Chiapas	102.55	2 870.09	5.675
Cuenca del Río Guayalejo	56.61	2 770.04	5.199
Valores regionales			
Región Hidrológica 10	130	4 700	5.93
Región Hidrológica 12	30	1 500	4.18
Regiones Hidrológicas 21 a 23	85	2 456	5.41
Región Hidrológica 26	75	2 500	5.19

periodos de retorno propuestos y las cinco subregiones analizadas. También se muestran los valores regionales obtenidos por Ramírez-Orozco *et al.* (2005) en las regiones hidrológicas respectivas. De manera general se observa que tales coeficientes reflejan de forma congruen-

te el potencial hidrológico de cada subregión para generar crecientes, lo anterior desde el periodo de retorno de 10 años hasta el de 500 años procesado.

Por ejemplo, en la subregión Sinaloa Norte, para el periodo de retorno de 500 años, se llega

a unos coeficientes bajos en relación con los regionales; esto se considera acertado debido a que tal subregión queda fuera de la zona montañosa. En cambio, en la subregión de la costa de Chiapas, los coeficientes encontrados en el periodo de retorno citado exceden a los regionales, esto se debe a que los gastos máximos observados tienen periodos de retorno ( $Tr$ ) del orden de cien años, lo cual se deduce al comparar los valores de la columna 6 del cuadro 1 contra los valores respectivos del cuadro 8, es decir, por estaciones hidrométricas.

En las dos subregiones analizadas de la Región Hidrológica 12 (Lerma-Santiago) y en la subregión de la cuenca del río Guayalejo, los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes de diseño con  $Tr = 500$  años se aproximan a los valores regionales, los cuales seguramente están definidos en otras áreas con más potencial hidrológico de tales regiones, que son de las más grandes del país, y por tanto incluyen zonas disímiles en lluvia, orografía y geología.

## Conclusiones

La estimación de las curvas envolventes con periodo de retorno y por subregiones es quizás el *método regional* más sencillo para la estimación de crecientes de diseño en cuencas sin aforos ubicadas dentro de tal subregión.

El uso de subregiones permite incorporar todo el conocimiento geográfico sobre tal zona para seleccionar las estaciones hidrométricas a procesar, es decir, las cuencas que conforman tal subregión hidrológica. Haciendo además una revisión detallada de los registros de gastos máximos anuales, para descartar los no confiables, o bien para eliminar los tramos anómalos, es muy probable que se llegue a resultados consistentes. Lo anterior se verifica por la similitud que exhiben o muestran los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes, obtenidos para cada periodo de retorno procesado en las cuencas que integran la subregión analizada.

Las descripciones realizadas para las cinco subregiones hidrológicas analizadas han

mostrado las ventajas de trabajar por áreas geográficas y las decisiones que se deben de tomar en esta etapa, así como la forma operativa en que se debe verificar la calidad de los datos (prueba de Discordancias) y la homogeneidad estadística de tal subregión (versión corregida del test de Langbein). Además, se ha indicado cómo procesar probabilísticamente los registros de gastos máximos anuales y cómo obtener fácilmente los coeficientes de ajuste de las curvas envolventes de diseño buscadas. Las curvas envolventes de diseño definidas tienen un intervalo de aplicabilidad, establecido por los tamaños de las cuencas involucradas en su estimación.

Recibido: 14/09/10

Aceptado: 02/02/11

## Referencias

- BHUNYA, P.K., MISHRA, S.K., OJHA, C.S.P. and BERNDTSSON, R. Flood Estimation in Ungauged Basins. Chapter 17. *Hydrology and Hydraulics*. Vijay P. Singh (editor). Highlands Ranch, USA: Water Resources Publications, 2008, pp. 605-646.
- BIONDIC, D., BARBALIC, D., and PETRAS, J. Creager and Francou-Rodier envelope curves for extreme floods in the Danube River basin in Croatia. *Predictions in Ungauged Basins*. IAHS Publication No. 309, 2007, 322 pp.
- BOBÉE, B. and ASHKAR, F. *The Gamma family and derived distributions applied in hydrology*. Chapter 7: Log-Pearson type 3 distribution. Littleton, USA: Water Resources Publications, 1991, pp. 76-120.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. *Análisis Probabilístico Univariado de Datos Hidrológicos*. Capítulo 6: Análisis con métodos paramétricos univariados. Avances en Hidráulica 13. Jiutepec, México: IMTA-AMH, 2006, pp. 89-115.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Aplicación de la prueba de Discordancias a las crecientes de la costa de Chiapas. *Memorias del XX Congreso Nacional de Hidráulica*. Tema: Hidrología superficial y subterránea, ponencia 5. Toluca, Estado de México, del 15 al 18 de octubre de 2008a.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Calibración del método Racional en ocho cuencas rurales menores de 1,650 km<sup>2</sup> de la Región Hidrológica No. 10 (Sinaloa), México. *Agrociencia*. Vol. 42, núm. 6, 2008b, pp. 615-627.
- CAMPOS-ARANDA, D.F. Discusión del artículo "Una modificación simple y útil del método de la avenida índice". *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. I, núm. 3, julio-septiembre de 2010a, pp. 119-121.

- CAMPOS-ARANDA, D.F. Verificación de la homogeneidad regional mediante tres pruebas estadísticas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. I, núm. 4, octubre-diciembre de 2010b, pp. 157-165.
- FILL, H.D. and STEDINGER, J.R. Homogeneity test based upon Gumbel distribution and a critical appraisal of Dalrymple's test. *Journal of Hydrology*. Vol. 166, 1995, pp. 81-105.
- HOSKING, J.R.M. and WALLIS, J.R. *Regional Frequency Analysis. An approach based on L-moments*. Chapter 3: Screening the data, and Appendix: L-moments for some specific distributions, Cambridge: Cambridge University Press, 1997, pp. 44-53/191-209.
- IMTA. *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Ocho CD. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002.
- KITE, G.W. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Chapter 12: Comparison of frequency distributions. Fort Collins, USA: Water Resources Publications, 1977, pp. 156-168.
- MANSELL, M.G. *Rural and Urban Hydrology*. Chapter 8: The analysis and predictions of flows. London: Thomas Telford Publishing Ltd., 2003, pp. 319-354.
- RAMÍREZ-OROZCO, A.I., GÓMEZ-MARTÍNEZ, J.F. y CAMPOS-ARANDA, D.F. Actualización de las envolventes regionales de gastos máximos para la república mexicana. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XX, núm. 1, enero-marzo de 2005, pp. 99-108.
- SOKOLOV, A.A., RANTZ, S.E., and ROCHE, M. *Floodflow Computation*. Chapter 4: Methods of floodflow computation and analysis where streamflow data area inadequate, Studies and Reports in Hydrology No. 22. Paris: The UNESCO Press, 1976, pp. 95-160.

## Abstract

CAMPOS-ARANDA, D.F. *Design envelopes estimation by hydrological subregion*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. II, No. 4, October-December, 2011, pp. 175-194.

*Design flood estimation in ungauged watersheds is very common. The use of envelope curves with return periods estimated by hydrological subregion is perhaps the simplest regional method for obtaining the necessary predictions. This work describes the 6 steps of the suggested procedure in detail: (1) subregion definition; (2) critical screening of the data; (3) statistical verification of the data; (4) subregional homogeneity verification; (5) prediction estimates, and; (6) calculation of fit coefficients for the envelope curves design. Creager, Lowry and Francou-Rodier envelope curves were utilized. The application of the above procedure is also explained in some detail for 5 Mexican subregions. Results are analyzed and conclusions are formulated that indicate the advantages of working by subregion and the ease of verifying reliable results when they are consistent.*

**Keywords:** *envelopes curves, discordances, Langbein test, probability distributions, hydrological regions.*

## Dirección del autor

*Dr. Daniel Francisco Campos Aranda*

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