

UNA MODIFICACIÓN SIMPLE Y ÚTIL DEL MÉTODO DE LA AVENIDA ÍNDICE

• Aldo I. Ramírez •
Universidad Autónoma de Querétaro, México

• Fabiola del R. Arellano-Lara •
Universidad Nacional Autónoma de México

Resumen

El método de la avenida índice es una técnica de regionalización hidrológica ampliamente usada en el mundo. Este método, propuesto formalmente por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, fue desarrollado tomando como base la prueba de homogeneidad hidrológica de Langbein y tiene como pasos generales la definición de la región homogénea, el planteamiento de una avenida índice, la generación de una curva regional y el uso de relaciones entre las características de la cuenca y la denominada avenida índice, la cual se toma como referencia. Las ventajas del método han sido reconocidas durante mucho tiempo, sin embargo el procedimiento de definición de la región homogénea puede presentar algunos inconvenientes. Es común, por ejemplo, el hecho de que la inclusión de una cierta estación adicional en el análisis de un cierto grupo de estaciones provoque que algunas otras de las estaciones salgan de la región homogénea o, por el contrario, al no considerar una de las estaciones del análisis, algunas de las estaciones que quedaban inicialmente fuera de la región homogénea queden ahora dentro de ella. Este comportamiento anómalo en la definición de las regiones es el motivo central de este trabajo. Aquí se plantea una modificación simple, pero muy útil en el método. Al aplicar un “filtro” que evite considerar desde un inicio aquellas estaciones que incluyen grandes desviaciones a la metodología, se comprueba que no sólo se obtienen regiones homogéneas más grandes, sino que además la calidad de la homogeneidad de éstas mejora sustancialmente. Mediante una validación cruzada se ha demostrado que mediante la aplicación del método modificado, los estimados de gastos en cuencas no aforadas son mucho mejores a los obtenidos con el procedimiento original del método.

Palabras clave: avenida índice, prueba de Langbein, homogeneidad regional, regionalización, cuenca Lerma- Santiago.

Introducción

El método de la avenida índice es una técnica sencilla de regionalización ampliamente usada en la hidrología. El método fue propuesto formalmente por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), como una forma de agrupar ciertas características de las cuencas (Viessman *et al.*, 1989).

El procedimiento original fue desarrollado por Dalrymple (1960), tomando como base la prueba de homogeneidad hidrológica de Langbein y

tiene como pasos generales la definición de la región homogénea, la cual se realiza en función del comportamiento de los gastos en la cuenca y el planteamiento de un evento de referencia llamado avenida índice, la generación de una curva regional, y el uso de relaciones entre las características de la cuenca y la mencionada avenida índice.

Aunque Dalrymple utilizó sólo el área de la cuenca como la característica que se relaciona con la avenida índice para las estaciones dentro de la región homogénea, en la actualidad

se han agregado muchas otras variables independientes en dichas relaciones. Entre éstas se pueden citar las fisiográficas, como elevación, pendiente y longitud del cauce; y las hidrometeorológicas, como precipitación media anual, temperatura o humedad.

El método de la avenida índice presenta diversas ventajas, entre las que se pueden mencionar las siguientes: la metodología es de aplicación y sistematización sencilla, el método requiere de la calibración de una sola ecuación índice, los estimadores regionales aseguran la consistencia en los resultados y los errores de estos estimadores son pequeños (Maidment, 1993).

Por otro lado, es pertinente mencionar que, en los lugares donde se dispone de información hidrométrica, el método de la avenida índice es en general menos exacto que el análisis de frecuencias, por lo que este último debería preferirse. Después de su introducción, el método de la avenida índice no fue utilizado por algún tiempo; sin embargo, en la última década, el método ha recobrado su popularidad y actualmente es juzgado como una de las técnicas más eficientes de regionalización (GREHYS, 1996a y 1996b).

Una hipótesis fundamental del método es que los datos registrados en diferentes sitios dentro de una región siguen una misma distribución, excepto por el factor de escala. La distribución Gumbel se usó en la versión original del método. Ahora bien, desde su concepción se han presentado diversas modificaciones al método, por ejemplo, Cunnane (1988) establece que el uso de la distribución Wakeby genera el mejor procedimiento regional, mientras que Potter y Lettenmaier (1990) sugieren que el uso de la distribución General de Valores Extremos produce mejores resultados. Otros autores, como Maidment (1993), Kjeldsen *et al.* (2001) y Heo *et al.* (2001), sugieren también el uso de otras funciones de probabilidad. Por otro lado, Greenwood *et al.* (1979) introdujeron el concepto de curvas regionales utilizando momentos de probabilidad pesada. Hosking y Wallis (1997), y Parida *et al.* (1998) prefirieron

utilizar momentos-L. Por otro lado, Gutiérrez y Ramírez (2005) plantean una adaptación de la metodología para el caso de utilizar una distribución de probabilidad de dos poblaciones. Sveinsson *et al.* (2001), por su parte, proponen una modificación que se conoce actualmente como el método de la avenida índice poblacional.

Por otro lado, Bocchiola *et al.* (2003) presentan un análisis de diversas metodologías desarrolladas para el cálculo de la avenida índice tanto directas como indirectas, para proveer un criterio cuantitativo confiable en la selección del mejor procedimiento. Recientemente, el concepto de la avenida índice ha evolucionado más allá de los desarrollos de Dalrymple y, por ejemplo, Gioia *et al.* (2005) obtienen en forma teórica una fórmula de la avenida índice que les permite realizar análisis de sensibilidad de los estimados en relación con la influencia de las características de la cuenca. A pesar de todas estas modificaciones, la metodología original sigue siendo ampliamente usada en todo el mundo para el análisis de escurrimientos en cuencas no aforadas. Es por esta razón que se plantea la modificación introducida en este artículo, el cual no tiene como objetivo la contrastación del método modificado con otras adaptaciones, análisis que sin duda brinda suficiente material para publicaciones futuras.

En la aplicación práctica del método de la avenida índice para la definición de una región hidrológicamente homogénea se observan comportamientos interesantes. Como se aprecia en el apartado de presentación del método, éste parte del análisis de los eventos medios en una cierta región, los cuales son comparados entre sí para identificar similitudes en el comportamiento de los escurrimientos. En este sentido, es común el hecho de que la inclusión de una estación más en el análisis provoque que algunas otras de las estaciones consideradas originalmente ya no puedan ser consideradas dentro de la región homogénea o bien, el no tomar una de las estaciones del análisis genera que algunas de

las estaciones que quedaban inicialmente fuera de la región homogénea queden ahora dentro de ella. Estos comportamientos anómalos en la definición de las regiones es el motivo central de este trabajo y del planteamiento de la modificación al método.

El método de la avenida índice

El método de la avenida índice —o del índice de avenidas, según otros autores de habla castellana— fue propuesto formalmente por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). La hipótesis básica del método de la avenida índice es que la serie de gastos máximos anuales para un grupo de estaciones hidrométricas sigue una misma distribución, con excepción de un parámetro de escala, llamado precisamente *avenida índice*. En el planteamiento original del método se considera que el gasto máximo medio anual corresponde precisamente a esa avenida índice, tal y como se verá a continuación.

Análisis de la información

Previo a la aplicación del método, es conveniente y recomendable realizar diversas acciones de verificación y validación de los datos. Así, es pertinente analizar los registros de las estaciones para descartar aquellas que presenten registros muy cortos o grandes incertidumbres en su información. En este trabajo, las estaciones con menos de diez años de registro, al igual que aquellas estaciones ubicadas en cauces controlados, han sido excluidas del análisis.

Selección del registro hidrométrico a considerar

De acuerdo con el método, es preciso seleccionar un periodo histórico común a todas las estaciones de medición. La elección deberá contemplar el mayor número de años de registros y de estaciones. Es válido completar o aumentar datos a las estaciones para incrementar el

periodo común. Estos valores pueden calcularse mediante correlación con los datos del resto de las estaciones o utilizando solamente las estaciones aledañas. Es usual establecer que los datos estimados de esta forma no se usen directamente, sino solamente como ayuda en la asignación de periodos de retorno observados a los eventos registrados (Kite, 1988). Los cálculos subsecuentes sólo involucrarán los eventos comprendidos dentro del periodo común establecido.

Definición de la avenida índice

La formulación original del método implica la determinación del gasto máximo medio anual y la asignación de éste como la avenida índice. Para esto se procede de la forma descrita a continuación.

Se ordena la muestra de datos de mayor a menor y se le asigna un periodo de retorno de acuerdo con la distribución empírica (posición de graficación) de Weibull:

$$T = \frac{n+1}{m} \quad (1)$$

donde:

n = tamaño de muestra.

m = número de orden del evento.

T = periodo de retorno asignado (observado).

La técnica original considera que los datos siguen la ley de distribución de valores extremos tipo I, conocida como Gumbel, y cuyo valor medio (avenida índice) se obtiene para un periodo de retorno de 2.33 años. El valor $\hat{Q}_{2.33}$ se considera más estable, en comparación con la media aritmética de los datos, ya que da un mayor peso a las avenidas medias que a las extremas, las cuales presentan grandes errores de muestreo (Dalrymple, 1960).

Prueba de Langbein de homogeneidad hidrológica

En esta etapa se comprueba la similitud entre las estaciones de la región. Langbein considera

que al suponer una distribución normal de los errores de la variable estandarizada Gumbel $y = \frac{x - \beta}{\alpha}$, el 95% de los datos quedará dentro del intervalo de $\pm 2\sigma_y$ del valor más probable de T , siendo σ_y el error estándar (Dalrymple, 1960):

$$\sigma_y = \frac{e^y}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{T-1}} \quad (2)$$

Donde, al considerar la distribución Gumbel, se tiene que:

$$y = -\ln\left(-\ln\left(\frac{T-1}{T}\right)\right) \quad (3)$$

La prueba original toma como base el gasto con periodo de retorno $T=10$ años, ya que es el intervalo más grande, para el cual la mayoría de los registros darán estimados confiables (Dalrymple, 1960). Con esto se tiene entonces que $2\sigma_y$ está dado por (4):

$$2\sigma_y = \frac{2e^y}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{T-1}} \quad (4)$$

De acuerdo con (3), para $T=10$ años se tiene que $y=2.25$, resultando que los límites de confianza están dados por:

$$y \pm \sigma_y = 2.25 \pm \frac{6.33}{\sqrt{n}} \quad (5)$$

y los periodos de retorno T_i y T_s correspondientes a los límites de confianza se calculan con la expresión (6):

$$T_{i,s} = \frac{1}{\{1 - \exp[-\exp(-y)]\}} \quad (6)$$

Estos límites de confianza, en función de la longitud del registro, fueron calculados por Dalrymple (1960), mismos que se presentan en el cuadro 1.

La gráfica, resultado de la prueba de homogeneidad, se obtiene llevando a un papel semilogarítmico los valores de n y T de las curvas de los límites superior e inferior. En la forma convencional, los valores del periodo de retorno se grafican en escala logarítmica sobre el eje de las ordenadas (figura 1).

Para cada estación de la región se calcula la relación entre el gasto para el periodo de retorno base (10 años) y la avenida índice ($T=2.33$ años), y se asigna a cada una de ellas la relación R_i (ecuación (7)).

$$R_i = \frac{\hat{Q}_{10}^i}{\hat{Q}_{2.33}^i} \quad (7)$$

A partir de los factores anteriores, R_y se determina la relación media de la región, Rm , dada por la ecuación (8):

$$Rm = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n}{m} \quad (8)$$

Cuadro 1. Límites de confianza para la prueba de homogeneidad hidrológica regional de Langbein.

n	Límite inferior $y-2\sigma_y$	Límite inferior (años) T_i	Límite superior $y+2\sigma_y$	Límite superior (años) T_s
5	-0.580494	1.2	5.081229	160
10	0.248645	1.8	4.252089	70
20	0.834936	2.8	3.665798	40
50	1.355170	4.2	3.145564	24
100	1.617367	5.6	2.883367	18
200	1.802768	6.5	2.697960	15
500	1.967281	7.7	2.533453	13
1 000	2.050195	8.3	2.450539	12

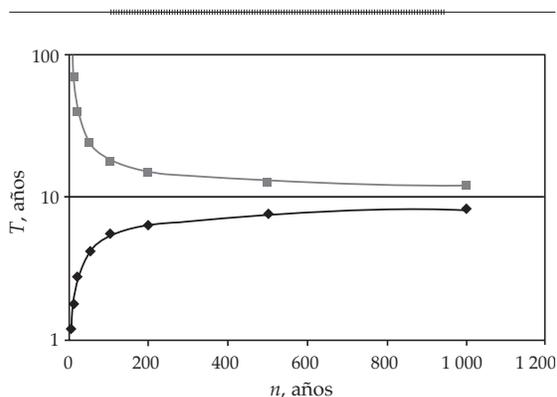


Figura 1. Gráfica de los límites de confianza de la prueba de homogeneidad.

donde m es el número de estaciones bajo estudio.

La relación media en la región se multiplica por la avenida índice en cada estación, generando así un \hat{Q}_{10} modificado y, a partir de éstos, se calculan los periodos de retorno correspondientes, $T_m(i)$, ya sea a partir de la muestra o la distribución.

Posteriormente se grafican los pares de valores $T_m(i) - n_m(i)$ en la figura 1, donde n_m es la longitud efectiva del registro, determinada como el número de eventos registrados más la mitad de los eventos estimados.

Para realizar la evaluación de la homogeneidad de las estaciones se comprueba que los $T_m(i)$ para cada $n_m(i)$ caigan entre los límites inferior y superior definidos en el cuadro. Este procedimiento puede hacerse en forma rápida mediante una inspección visual de las posiciones de las estaciones con relación a las curvas de los límites de confianza, considerando como estaciones homogéneas aquellas que se ubican dentro de estos límites. Los puntos que caigan dentro del "embudo" corresponderán a una misma región hidrológicamente homogénea.

Curva regional de frecuencias

Para cada estación dentro de la región homogénea se calcula la relación de eventos

para distintos periodos de retorno contra el evento medio anual ($\hat{Q}_{2.33}$) de acuerdo con la ecuación (9). En este punto se elige el periodo de retorno de interés o los periodos de retorno convenientes para los problemas de diseño en cuencas no aforadas. Posteriormente se calculan los valores medios de estas relaciones \bar{R}_i para cada periodo de retorno en la región.

$$R_i = \frac{\hat{Q}_{Ti}}{\hat{Q}_{2.33}} \quad i = 1.2, 1.5, 2, 5, 10, \dots \quad (9)$$

Graficando estos resultados contra los periodos de retorno se obtiene la curva regional de frecuencias, que representa la relación más probable en la región homogénea.

Al establecer la relación entre la avenida índice y las características fisiográficas de la cuenca es posible generar una curva de frecuencias en cualquier localización de la región homogénea y obtener estimados para cuencas no aforadas.

Una modificación simple

Tal como se estableció en la introducción, la aplicación del método de la avenida índice presenta una alta sensibilidad a la dispersión de los datos. Precisamente son los resultados obtenidos de las ecuaciones (7) y (8) los que pueden propiciar errores o variaciones en la definición de la región hidrológicamente homogénea.

En efecto, si la relación R_i de una estación hidrométrica dada presenta una gran desviación con respecto a la media, calculada ésta por la ecuación (8), infringirá también un efecto no deseado en el cálculo de la propia relación media, propiciando así que el cálculo de los Q_{10} modificados y los correspondientes T_m arrastren esa desviación. A la postre, esto puede generar que algunas estaciones queden fuera de la zona de homogeneidad hidrológica mostrada en la figura 1. Ante este hecho se plantean las preguntas: ¿Qué impacto sobre la definición de la región homogénea tendrá el no incluir desde un principio a las

estaciones cuyas relaciones R_i se encuentran muy desviadas de la relación media? Si se hace una preselección de las estaciones a incluir en la prueba de Dalrymple, ¿los estimados serán mejores?

En este sentido se plantea una hipótesis de trabajo definida como: el uso de estaciones, cuyas relaciones de escala R_i fueran del rango $Rm \pm \alpha \sigma$, donde α es un coeficiente obtenido del nivel de confianza seleccionado y σ es la desviación estándar de las R_i , genera una región homogénea menor en tamaño y una curva de frecuencias que arroja peores estimados.

La prueba de la hipótesis, que involucra la determinación del valor óptimo de α , permitirá la definición de una región homogénea de mejor calidad en los estimados.

Se propone entonces el procedimiento siguiente para la prueba de la hipótesis de trabajo. Para un grupo de estaciones perteneciente a una región se aplicará el método de la avenida índice en su versión original. Además, se aplicará el método con la modificación propuesta, para lo cual se utilizarán tres niveles de confianza, 90, 95 y 99%, para definir el valor de α . Para la aplicación de la versión modificada, se calculan inicialmente las relaciones del Q_{10} al $Q_{2.33}$ de acuerdo con la ecuación (7) y la relación media Rm con la ecuación (8). Posteriormente se identifican las estaciones cuya relación $R_i > Rm \pm \alpha \sigma$, y se excluyen del grupo a considerar en el análisis. Se procede a recalcular la nueva Rm con el grupo modificado de estaciones (ecuación (8)) y a repetir la identificación de aquellas estaciones con $R_i > Rm \pm \alpha \sigma$. Este proceso se repite hasta el punto en el que ninguna de las estaciones queda fuera del rango $Rm \pm \alpha \sigma$. Para los niveles de confianza seleccionados, y considerando una

distribución normal de los errores, se tienen los valores de α mostrados en el cuadro 2.

El proceso descrito anteriormente implica el “filtrado” del grupo inicial de estaciones para la identificación de la región homogénea y, en otras palabras, consiste en dejar de una buena vez fuera del análisis las estaciones que por su relación Q_{10} a la avenida índice claramente no presentan un comportamiento similar al promedio del grupo. Una medida inicial simple para evaluar la primera ventaja de este procedimiento de “filtrado” será el número de estaciones que pertenecen a una región homogénea. En forma lógica resultaría conveniente tener al mayor número posible de estaciones en la región homogénea. Sin embargo, quizá lo más deseable es que la región homogénea sea de la mejor calidad posible.

De acuerdo con el nivel de confianza seleccionado, se tendrá un grupo modificado de estaciones para la prueba de homogeneidad de Langbein y la posterior construcción de la curva regional de frecuencias. Una medida simple para la estimación del grado de “homogeneidad” de la región puede obtenerse calculando el rango entre las relaciones R_i como $\text{rango} = R_i \text{ máx} - R_i \text{ mín}$. Así, la región con el rango más pequeño corresponderá a una región con una mejor calidad en su homogeneidad.

Una vez que se han obtenido las regiones homogéneas para cada uno de los niveles de confianza seleccionados, es posible comprobar, mediante una validación cruzada, la calidad de los estimados. Así, se propone realizar el estimado en cualquiera de las estaciones pertenecientes a la región homogénea, bajo la hipótesis de que no se conoce su gasto, y estimando éste a partir de la curva regional de frecuencias, y la (o las) características fisiográficas de la cuenca.

Herramienta de cómputo desarrollada en ArcGis: “Regionalización”

Se desarrolló un programa de cómputo denominado “Regionalización”, con el

Cuadro 2. Valores de α para diferentes niveles de confianza.

Nivel de confianza	Valor de α
90 %	1.645
95%	1.9604
99%	2.575

propósito general de automatizar al máximo el procedimiento de la Avenida Índice de Dalrymple (1960); es decir, que la sistematización realizada requiere de mínimas intervenciones del usuario en una interfaz amigable. Tales acciones fueron diseñadas para permitir al usuario tomar decisiones en las distintas etapas del cálculo.

El programa "Regionalización" fue elaborado dentro del sistema de información geográfica *ArcGIS 8.3*, en versión *ArcView*. Se seleccionó este *software* por la capacidad que ofrece para el desarrollo de procedimientos que automatizan procesos, a través del lenguaje *Visual Basic para Aplicaciones* (VBA); *ArcGIS* brinda también un conjunto de objetos denominado *ArcObjects*, que permite manejar la información geográfica mediante programación y así mecanizar los procesos.

La ejecución del programa "Regionalización" fue diseñada para utilizar simultáneamente una base de datos hidrométricos, así como la cartografía correspondiente a cuencas y subcuencas. La base de datos implementada en *Access* comprende dos tablas relacionadas entre sí, una de las cuales, denominada *ESTAC_R12*, almacena la información de las estaciones hidrométricas, la cual se ligó con el archivo *shape* del mapa digital de las estaciones hidrométricas a través del campo que contiene la clave de la estación. La tabla llamada *GASTOS_COMP* contiene las series de tiempo de los gastos relacionados espacialmente. La figura 2 muestra el modelo entidad-relación de la base de datos hidrométricos y en el cuadro 3 se presentan los atributos de la tabla *ESTAC_R12*.

Ambas tablas se construyeron con información extraída del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (*BANDAS*), desarrollado en conjunto por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Comisión Nacional del Agua (Conagua), y puesto a la disposición del público en el año 1996.

Por otro lado, los mapas de cuencas y subcuencas se extrajeron del conjunto de

datos vectoriales de aguas superficiales, escala 1:250,000, de la serie 1, reportados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) de México. Los mapas digitales de estos temas se manejaron en archivos *shape file*.

El *software ArcView*, al igual que las aplicaciones de Microsoft Office, ofrece el mecanismo para crear elementos como botones o barras de herramientas, con el fin de implementar la funcionalidad requerida. Así, para ejecutar el código elaborado se agregó un botón a la interfaz de usuario de la aplicación *ArcMap*, que es parte de producto *ArcGIS 8.3*. En la figura 3 se muestra la ventana de diálogo principal en *ArcMap* al inicio del programa "Regionalización".

El programa despliega una serie de ventanas de diálogo, donde se van mostrando los cálculos parciales; se solicita al usuario que tome decisiones sobre el procedimiento; se muestran tanto los resultados finales como una última ventana de diálogo para la ejecución de pronósticos de gastos asociados con un periodo de retorno dado, utilizando los resultados de la regionalización obtenida. El programa aplica el método de la Avenida Índice de Dalrymple (1960), como ya se hizo mención, y además se implementaron dos opciones que modifican este método para permitir el análisis del mismo y un procedimiento de pronóstico. Tanto los cálculos parciales como los resultados finales y la gráfica de la curva regional pueden exportarse a *Excel* para su manejo y uso posterior. La implementación de este método de regionalización dentro de un SIG permitió aprovechar las características que ofrece este *software* para el manejo de la información espacial requerida en el análisis hidrológico, resultando así una herramienta útil (Arellano *et al.*, 2006).

Prueba de hipótesis mediante un caso de estudio

La prueba de la hipótesis planteada se realiza mediante la aplicación del procedimiento a la

Cuadro 3. Atributos de la tabla ESTAC_R12 (Arellano, 2006).

Columna	Descripción	Tipo de campo	Longitud	Enteros	Decimales
Cve_estac	Clave de la estación hidrométrica	Numérico	10	5	0
Nombre	Nombre de la estación	Texto	44		
des_corriente	Nombre de la corriente	Texto	45		
nom_col_general	Nombre del colector principal	Texto	21		
cve_colector	Clave del colector del sistema BANDAS	Numérico		3	0
nom_afluente	Nombre del afluente	Texto	30		
cve_afluente	Clave del afluente del sistema BANDAS	Numérico		3	0
nom_subafluente	Nombre del subafluente	Texto	27		
cve_subafluente	Clave del subafluente del sistema BANDAS	Numérico		3	0
nom_canal	Nombre del canal	Texto	31		
nom_corriente	Nombre de la corriente	Texto	44		
área_drenada	Área drenada por la corriente	Numérico		5	0
lon_gra	Grados longitud	Numérico		3	0
lon_min	Minutos longitud	Numérico		2	0
lon_seg	Segundos longitud	Numérico		2	0
Longitud	Longitud en grados	Numérico		3	7
lat_gra	Grados latitud	Numérico		2	0
lat_min	Minutos latitud	Numérico		2	0
lat_seg	Segundos latitud	Numérico		2	0
Latitud	Latitud en grados	Numérico		3	7
gasto_máx	Gasto máximo registrado	Numérico		3	3
fecha_gast	Fecha de la ocurrencia del gasto máximo	Fecha	10		
gasto_mini	Gasto mínimo registrado	Numérico		1	3
fecha_ga_1	Fecha de la ocurrencia del gasto mínimo	Fecha	10		
situación_actual	Situación actual de operación	Texto	13		
F_coord	Fuente de obtención de las coordenadas	Texto	8		
instrument	Instrumentación de la estación	Texto	9		
operada_por	Organismo encargado de la operación	Texto	10		
XCOORD	Coordenada X, UTM	Numérico		6	8
YCOORD	Coordenada Y, UTM	Numérico		6	8

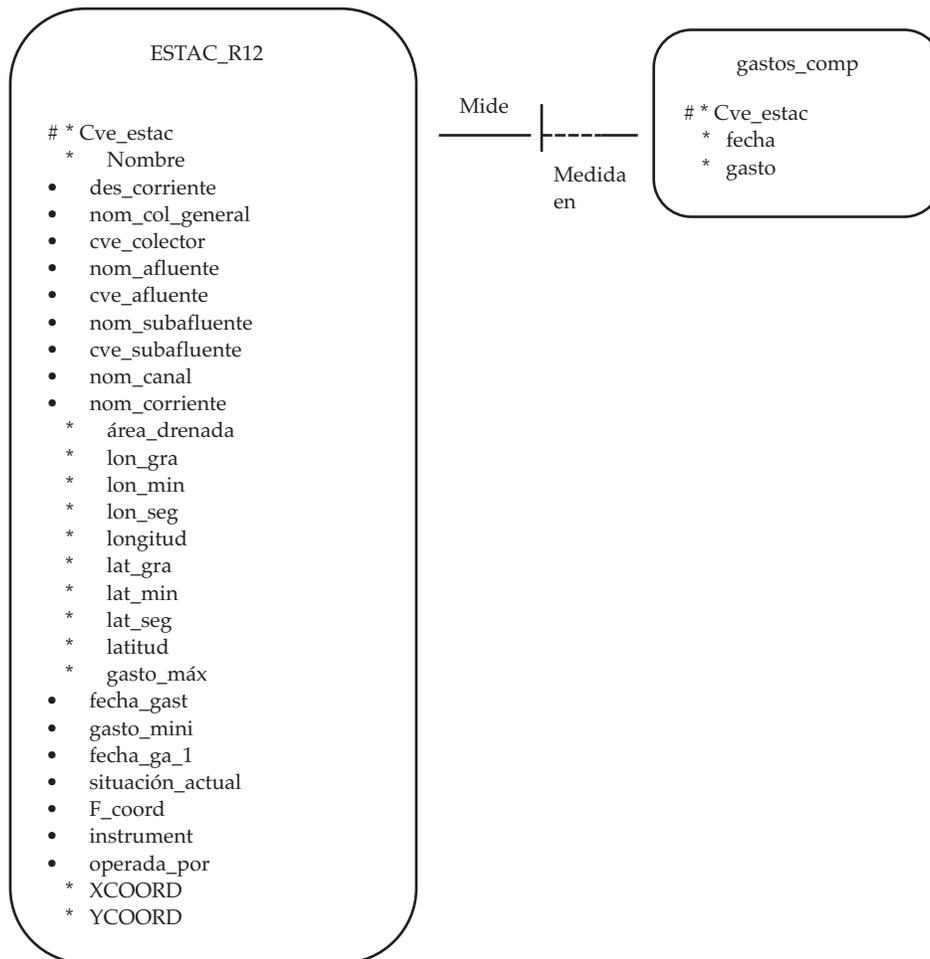


Figura 2. Modelo entidad-relación de la base de datos hidrométricos (Arellano, 2006).

Región Hidrológico-administrativa XII, Lerma-Santiago, en la república mexicana. Esta región, una de las más importantes en México, tiene una extensión de 134 581 km² y es drenada principalmente por los ríos Lerma y Santiago; en ella se encuentra el lago de Chapala, el cuerpo de agua más grande del país. El sistema Lerma-Santiago tiene un curso aproximado de 1 194 km desde el Estado de México hasta su desembocadura en Nayarit. La dirección predominante del escurrimiento en la cuenca es del oriente, con elevaciones de hasta 4 400 msnm al occidente. Para efectos de su manejo hidrológico, la región ha sido dividida en 12 subcuencas.

La región XII se encuentra aforada en 326 estaciones hidrométricas con datos históricos, cuyos datos están disponibles en la base de datos BANDAS (1999). Actualmente, de acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua, sólo 263 se encuentran en servicio. La figura 4 muestra la distribución de las estaciones en la cuenca.

Con la finalidad de tener un análisis preliminar de la variación de los gastos máximos dentro de la zona de estudio fue construido el mapa de los coeficientes de variación (CV), que se muestra en la figura 5. En este mapa de CV se observó que las variaciones máximas se presentan por lo

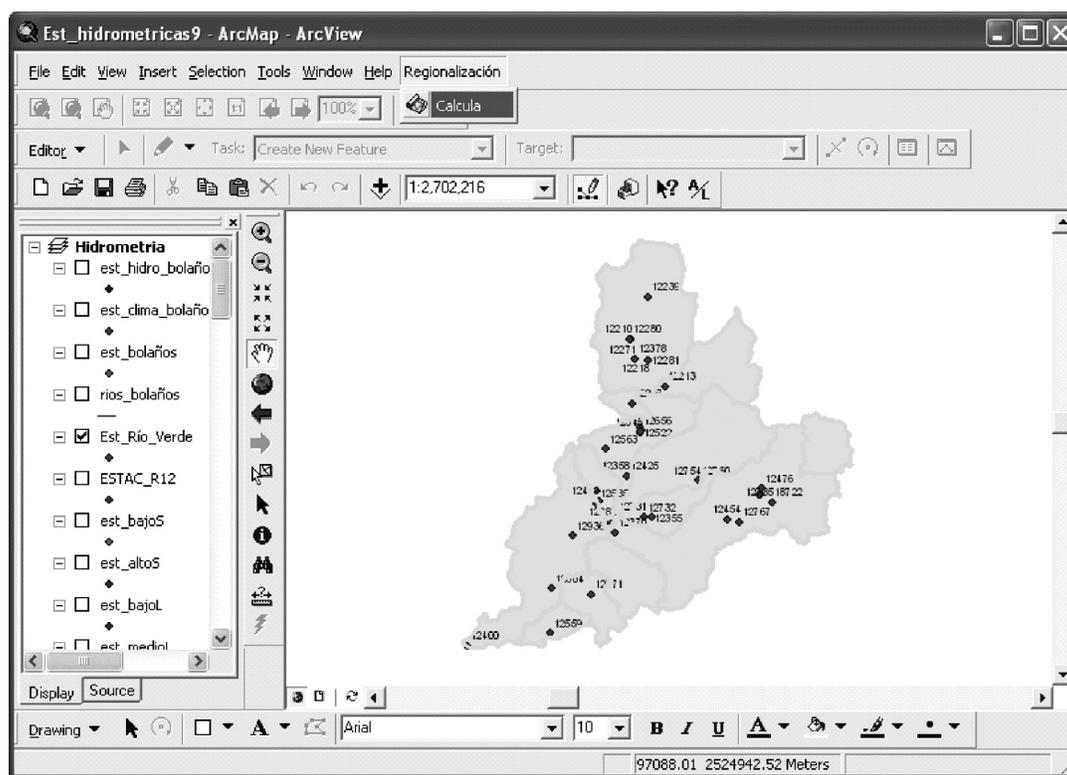


Figura 3. Ventana de diálogo principal para la aplicación del programa “Regionalización” (Arellano, 2006).

general en las partes altas de las subcuencas debido muy probablemente a la mayor dispersión de estaciones hidrométricas en estas zonas. Asimismo, se encontró que el río Lerma-Santiago, casi en todo su trayecto, pasa por las zonas de CV menores de 1, lo cual corresponde a una menor dispersión de los gastos, además de mayor densidad de estaciones en las zonas cercanas al río.

Definición de regiones homogéneas

Empleando el programa “Regionalización” se realizó un primer análisis, aplicando el método original con la prueba no modificada de Langbein a las 326 estaciones de la región hidrológica, a la que se denominó regionalización base. De acuerdo con el procedimiento, es necesario trabajar un periodo común en el registro. Esa misma

base de datos se utilizó en las simulaciones posteriores. El periodo común resultó ser de 1969 a 1987.

La aplicación de los tres casos correspondientes a los niveles de confianza del 90, 95 y 99% se identificaron como regionalización 90%, regionalización 95% y regionalización 99%, respectivamente. La regionalización base da origen a una región homogénea de 48 estaciones (figura 6d).

Los resultados obtenidos de la aplicación del filtro a diversos niveles de confianza generan regiones homogéneas de mayor extensión en general. Así, el número de estaciones en la región homogénea resultó ser de 44, 67 y 76 para 90, 95 y 99%, respectivamente. El resumen de resultados de cada región se presenta en el cuadro 4. En él se incluyen, además, el valor de la relación media R_m , la desviación y el rango.

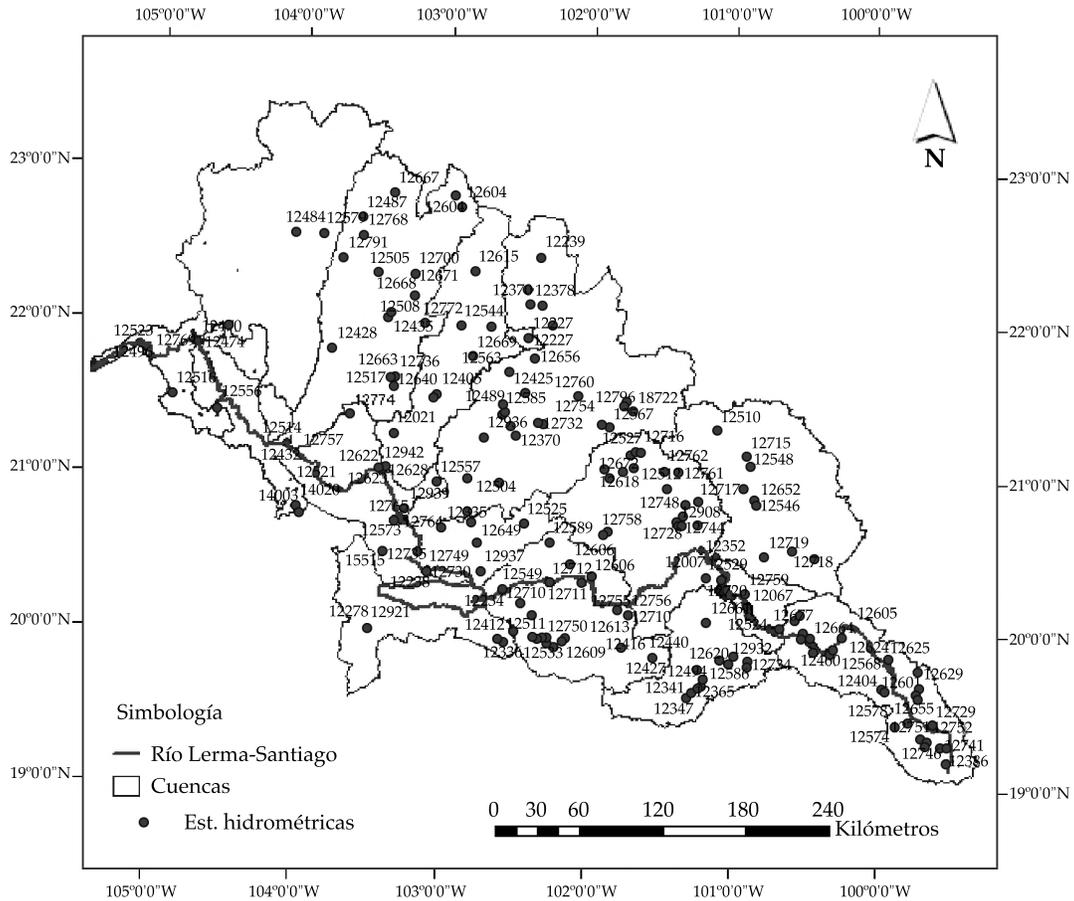


Figura 4. Distribución de estaciones hidrométricas en la Región Hidrológica XII.

De acuerdo con la información del cuadro 4, la reducción dramática en la dispersión de las R_m y del propio valor de las citadas relaciones es evidente. Ese es precisamente el objetivo de la modificación del método.

Los resultados del número de estaciones y el rango indican que la aplicación del “filtro” no sólo genera regiones más grandes (con excepción de la regionalización 90), sino “más homogéneas”. Es lógico esperar que estos resultados tengan un impacto positivo importante en las estimaciones de gastos a través del método de la avenida índice. Con base en los resultados presentados en el cuadro 4, las regiones homogéneas generadas después de la aplicación del filtro fueron

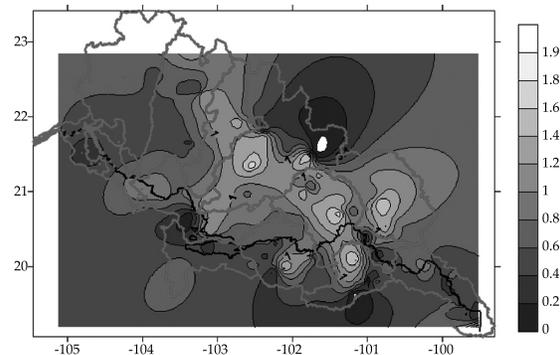


Figura 5. Mapa de coeficientes de variación de gastos máximos anuales de la Región Hidrológica XII.

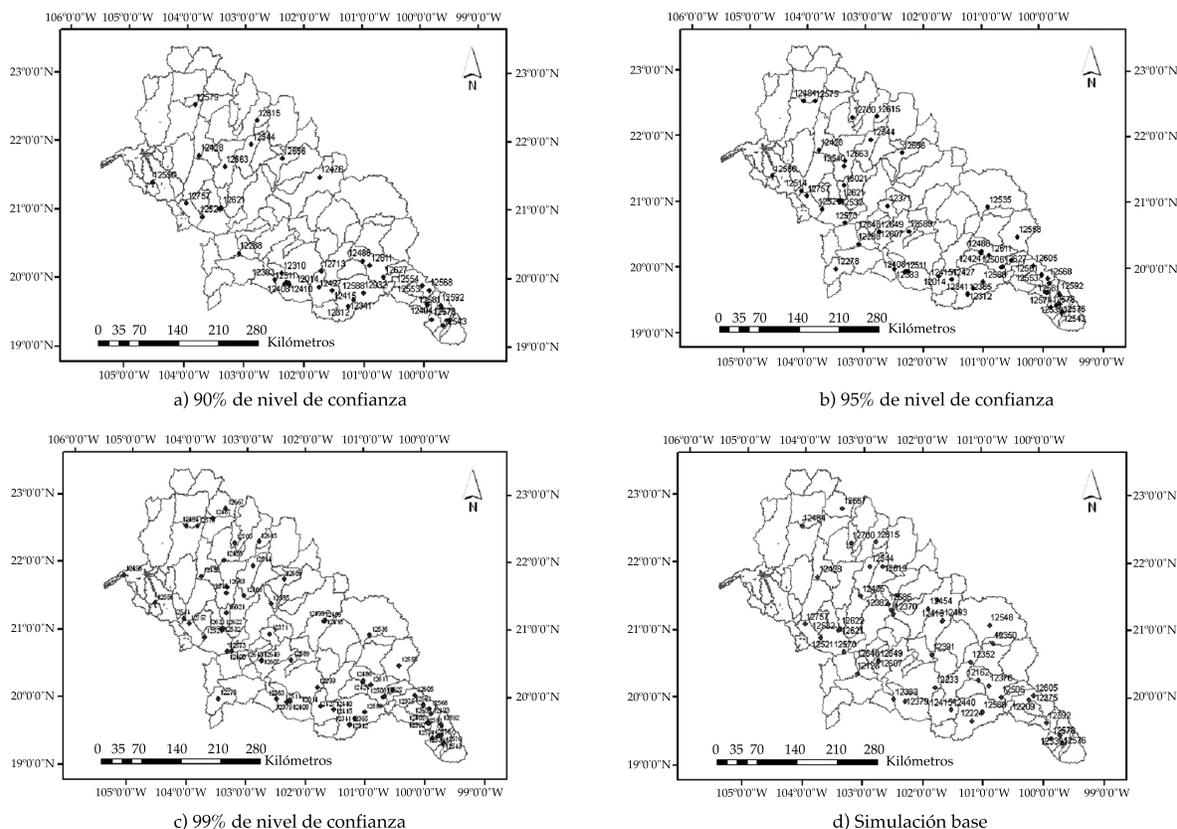


Figura 6. Regionalizaciones finales para diferentes niveles de confianza en la Región Hidrológica XII.

Cuadro 4. Resumen de resultados de las regionalizaciones planteadas.

	Regionalización base	Regionalización 90	Regionalización 95	Regionalización 99
Número de estaciones	48	44	67	76
Rm	9.6717	1.5117	1.8845	2.1370
σ	32.2220	0.2635	0.4267	0.6257
Rango	219.7201	1.1405	1.5994	2.3988

incrementándose gradualmente a medida que se elevaba el nivel de confianza y lo mismo ocurrió con los tres parámetros de control considerados (Rm , σ , y Rango). Las tendencias de estos incrementos graduales son indicativas de la consistencia del procedimiento. Aunque la región homogénea obtenida para el nivel de 90% es más pequeña que la regionalización

base, los parámetros de control muestran, sin embargo, que la región generada es de mucha mejor calidad. En la figura 6 se presentan las estaciones homogéneas obtenidas en cada una de estas regionalizaciones. Es de notar que en prácticamente todos los casos, la región homogénea queda definida por ubicaciones muy dispersas en el espacio; sin embargo, se

puede observar que para el caso del método modificado, la dispersión de las estaciones disminuye.

Validación cruzada

La validación de los resultados se realizó aplicando el método de la avenida índice para las regionalizaciones planteadas. Se eligieron en forma aleatoria las estaciones 12514, El Caimán; 12627, Pasarela Solís; 12428, Bolaños; y 12504, La Cuna. Estas estaciones cuentan con registros, por lo cual es posible realizar estimaciones de gastos sin necesidad de técnica regional alguna. Para este caso, dichas estimaciones se obtuvieron mediante un análisis de frecuencias, ajustando la función de distribución Gumbel. Esa es precisamente la fortaleza de la validación cruzada, pues permite comparar los estimados regionales con los estimados puntuales en cuencas aforadas, al considerarlas hipotéticamente como no aforadas. En el ejemplo se realizaron estimados para los gastos de 20, 50 y 100 años de periodo de retorno. La estimación a periodos de retorno mayores no es recomendable para cuencas no aforadas, utilizando métodos basados en regionalización. Los datos generales de las estaciones se presentan en el cuadro 5 y la ubicación de éstas se tienen en la figura 7.

Para la validación de la modificación al método se aplicó el método de la avenida índice en cuatro corridas. La primera, para la validación cruzada, usando la estación 12514, precisamente se realizó excluyendo desde un inicio esa estación. En este caso, el método generó regiones homogéneas de 44, 62 y 74 estaciones para los niveles de confianza de 90, 95 y 99%, respectivamente. Para el segundo caso, se excluyó desde un inicio la estación 12627; las estaciones 12428 y 12504 se excluyeron para el tercero y cuarto caso, generándose en cada procedimiento el mismo número de estaciones en la región homogénea que en el primer caso. La obtención de las regiones homogéneas garantiza de esta

manera que no habrá efecto espurio alguno en la validación.

Los resultados de los cuadros 6, 7, 8, y 9 indican que la aplicación del filtrado inicial del método modificado, independientemente del nivel de confianza seleccionado, propicia una gran mejoría en los gastos estimados.

Es notorio que los errores cometidos en los estimados realizados con la regionalización base correspondiente a la aplicación de método original son muy grandes. Sin embargo, también es preciso mencionar que la definición de la región homogénea cumple con los requisitos establecidos por el método. Los errores del orden de 500% indican que la curva regional de frecuencias no es muy confiable, a pesar de que la definición de la región homogénea se realizó adecuadamente. Esto refuerza la idea de que en su versión original, el método de la avenida índice puede incluir errores severos en la estimación de los gastos generados en cuencas no aforadas.

Por otro lado, las desviaciones de los gastos correspondientes a los tres periodos de retorno y las cuatro estaciones hidrométricas consideradas sugieren que el nivel de confianza considerado, mientras se mantenga mayor al 90%, no presenta una influencia

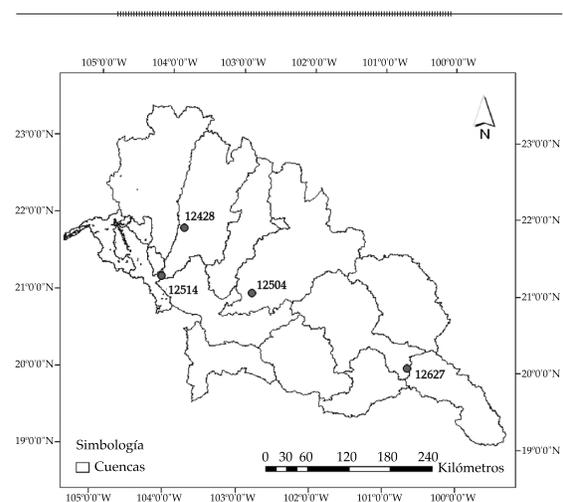


Figura 7. Localización de las estaciones 12514, 12627, 12428 y 12504 en la Región Hidrológica XII.

Cuadro 5. Algunas características generales de las estaciones para la validación cruzada.

Característica	Estación 12514	Estación 12627	Estación 12428	Estación 12504
Periodo de registro	1948-2000	1967-1999	1947-2000	1947-1999
Cuenca	Bolaños	Lerma-Toluca	Bolaños	Verde Grande
Área aportación (km ²)	15 010	8 510	11 900	19 097

Cuadro 6. Resultados de la validación cruzada. Estación 12514.

	Q ₂₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₂₀ real	Q ₅₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₅₀ real	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₁₀₀ real
Estimado real (Gumbel)	917.84	-	1 120.39	-	1 272.18	-
Regionalización base (m ³ /s)	5 132.60	459%	6 769.16	504%	7 995.53	528%
Regionalización 90 (m ³ /s)	889.96	3%	1 086.08	3%	1 233.04	3%
Regionalización 95 (m ³ /s)	861.85	6%	1 051.48	6%	1 193.58	6%
Regionalización 99 (m ³ /s)	934.46	2%	1 147.90	2%	1 307.84	3%

Cuadro 7. Resultados de la validación cruzada. Estación 12627.

	Q ₂₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₂₀ real	Q ₅₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₅₀ real	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₁₀₀ real
Estimado real (Gumbel)	125.75	-	142.36	-	154.80	-
Regionalización base (m ³ /s)	3 801.55	2 923%	5 013.71	3 422%	5 922.05	3 726%
Regionalización 90 (m ³ /s)	595.51	474%	726.74	510%	825.08	533%
Regionalización 95 (m ³ /s)	642.90	411%	784.90	451%	855.32	453%
Regionalización 99 (m ³ /s)	695.94	453%	855.32	501%	974.75	530%

Cuadro 8. Resultados de la validación cruzada. Estación 12428.

	Q ₂₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₂₀ real	Q ₅₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₅₀ real	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Desviación del Q ₁₀₀ real
Estimado real (Gumbel)	1 266.26	-	1 592.01	-	1 836.12	-
Regionalización base (m ³ /s)	3 303.43	261%	4 356.76	274%	5 146.08	280%
Regionalización 90 (m ³ /s)	282.60	78%	344.87	78%	391.54	79%
Regionalización 95 (m ³ /s)	542.01	57%	661.27	58%	750.63	59%
Regionalización 99 (m ³ /s)	805.86	36%	989.93	38%	1 127.86	39%

Cuadro 9. Resultados de la validación cruzada. Estación 12504.

	Q_{20} (m ³ /s)	Desviación del Q_{20} real	Q_{50} (m ³ /s)	Desviación del Q_{50} real	Q_{100} (m ³ /s)	Desviación del Q_{100} real
Estimado real (Gumbel)	1 075.75	-	1 341.29	-	1 540.27	-
Regionalización base (m ³ /s)	5 346.45	497%	7 051.21	526%	8 328.69	541%
Regionalización 90 (m ³ /s)	970.84	10%	1 184.78	12%	1 345.11	13%
Regionalización 95 (m ³ /s)	912.42	15%	1 113.17	17%	1 263.61	18%
Regionalización 99 (m ³ /s)	989.29	8%	1 215.25	9%	1 384.58	10%

significativa sobre los estimados, aunque se favorece la selección del 99% en el primer, tercer y cuarto caso, y el 95% en el segundo. Si bien los gastos estimados en el segundo de los ejemplos, el más crítico, difieren aún en gran medida de los obtenidos por medio del análisis de frecuencias en la estación, éstos son mucho mejores que los obtenidos con el método original, de tal forma que el método modificado continúa mostrando sus bondades, aunque no de forma tan dramática como en los ejemplos 1 y 4. Este hecho se debe a que la estación 12627 está más desviada de la curva regional de frecuencias que el resto de las estaciones.

Conclusiones

Se ha presentado en este trabajo una adaptación sencilla, pero muy útil del método de la avenida índice.

La modificación consiste en un “filtrado” de las estaciones previo a la identificación de la región hidrológicamente homogénea. Esta modificación del método genera regiones hidrológicas más grandes, más homogéneas y, sobre todo, con curvas regionales que producen estimados mucho mejores que el método original, lo cual se demostró mediante un proceso de validación cruzada en estaciones de la cuenca Lerma-Santiago en la república mexicana.

Adicionalmente se ha presentado una aplicación de *ArcGis* para la aplicación

sistemática del método de la avenida índice sobre una base geográfica.

En vista de los resultados obtenidos en los casos de aplicación, es altamente recomendable aplicar el método de la avenida índice en su versión modificada para la estimación de gastos en cuencas no aforadas.

Recibido: 01/04/2008

Aprobado: 18/05/2009

Referencias

- ARELLANO, F. *Sistematización del método de la avenida índice y su aplicación en cuencas de la región Lerma-Santiago*. Tesis de maestría en Ingeniería. México, D.F.: UNAM, Campus Morelos, 2006.
- ARELLANO, F., RAMÍREZ, A. y VELÁZQUEZ, J. *Implementación del método de la avenida índice en un SIG y ejemplo de aplicación*. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, octubre, 2006.
- BANDAS. Banco de Datos de Aguas Superficiales. Jiutepec, México: IMTA-CONAGUA, 1999.
- BOCCHIOLA, D., DE MICHELE, C. and ROSSO, R. Review of recent advances in index flood estimation. *Hydrology and earth system sciences*. Vol. 7, no. 3, 2003, pp. 283-296.
- CUNNANE, C. Methods and merits of regional flood frequency analysis. *J. Hydrol.* Vol. 100, 1988, pp. 269-290.
- DALRYMPLE, T. Flood frequency analysis. *USG Water Supply Paper*. 1543-A, USGS, Reston, Va., 1960, 80 pp.
- GIOIA, A., FIORENTINO, M., IACOBELLIS, V. and MARGIOTTA, M. Theoretical derivation of the index flood. *Advances in Geosciences* 2. Vol. 2, 2005, pp. 249-253.
- GREENWOOD, J., LANDWEHR, J., MATALAS, M. and WALLIS, J. Probability weighted moments: distribution and relation to parameters of several distributions

- expressable in inverse way. *Water Resources Research*. Vol. 15, no. 5, 1979, pp. 1049-1054.
- GREHYS (Groupe de Recherche en Hydrologie Statistique). Intercomparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers. *Journal of hydrology*. Vol. 186, no. 1-4, 1996a, pp. 85-103.
- GREHYS (Groupe de Recherche en Hydrologie Statistique). Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of hydrology*. Vol. 186, no. 1-4, 1996b, pp. 63-84.
- GUTIÉRREZ, A. y RAMÍREZ, A.I. Predicción hidrológica mediante el método de la avenida índice para dos poblaciones. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XX, núm. 2, abril-junio de 2005, pp. 37-47.
- HEO, J., SALAS, J. and BOES, D. Regional flood frequency analysis based on a Weibull model. Part 2. *Simulations and applications*. Vol. 242, no. 3-4, 2001, pp. 171-182.
- HOSKING, J. and WALLIS, J. *Regional Frequency Analysis – An approach based on L-Moments*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- KITE, G.W. *Frequency and risk analyses in hydrology*. Littleton, USA: Water Resources Publications, 1988.
- KJELDSSEN, T., SMITHERS, J. and SCHULZE, R. Regional flood frequency analysis of the KwaZulu-Natal province, South Africa, using the index flood method. *Journal of Hydrology*. Vol. 255, no. 1-4, 2001, pp. 194-211.
- MAIDMENT, D. *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993.
- PARIDA, B., KACHROO, R. and SHRESTHA, B. Regional flood frequency analysis of Mahi-Sabarmati basin (subzone 3-A) using the index flood procedure with L-moments. *Water Resources Management*. Vol. 12, 1998, pp. 1-12.
- POTTER, K.W. and LETTENMAIER, D.P. A comparison of regional flood frequency estimation methods using a resampling method., *Water Resour. Res.* Vol. 26, no. 3, 1990, pp. 415-424.
- SVEINSSON, O., BOES, D. and SALAS, J. Population index flood method for regional frequency analysis. *Water Resources Research*. Vol. 37, no. 11, 2001, pp. 2733-2748.
- VISSMAN, W., KNAPP, J., LEWIS, G. and HARBAUG, T. *Introduction to hydrology*. New York: Harper & Row Publishers, 1989.

Abstract

RAMÍREZ, A.I. & ARELLANO-LARA, F. DEL R. *A simple and useful modification of the index flood method. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish). Vol. I, no. 1, January-March, 2010, pp. 69-85.*

The index flood method is a hydrologic regionalization technique widely used in the world. The method, which was originally proposed by the U.S. Geological Survey, was developed based on the application of the Langbein homogeneity test. Its general application steps are the definition of the homogeneous region, the determination of an index flood, the generation of a regional frequency curve, and the use of various relationships between physiographic characteristics of the basin and the so called index flood. Over time, many advantages have been recognized for the method, but some deficiencies have also been identified. It is common, for example, that the inclusion of a certain station in the analysis of an initial group of stations causes some of the other stations to fall out of the homogeneous region, or vice versa, not including a certain station can produce some others to become part of the homogeneous region. This anomalous behaviour of the method is the main issue of this work. In the paper, a simple but useful modification of the original method is proposed. The use of a "filtering" procedure avoids the inclusion, from the outset, of those stations that impose serious deviations to the method. The use of this filter not only generates bigger homogeneous regions, but also regions with a better homogeneity. Furthermore, through a cross validation technique, it was shown that the discharge estimates of ungauged basins within the region are much better than those obtained with the original version of the method.

Keywords: *index flood method, Langbein test, regional homogeneity, regionalization, Lerma-Santiago river basin.*

Dirección institucional de los autores

Aldo I. Ramírez

Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ)
Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de las Campanas s/n
Colonia Las Campanas
76010 Querétaro, México
teléfono: + (52) (442) 1921 200, extensión 6400
aldo.ramirez@uaq.mx

Fabiola del R. Arellano-Lara

Facultad de Ingeniería
División de Estudios de Posgrado
Universidad Nacional Autónoma de México
Centro de Investigaciones del Agua (CIAQ)
Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de las Campanas s/n
Colonia Las Campanas
76010 Querétaro, México
teléfono: + (52) (442) 1921 200, extensión 6025
fabiola.arellano@uaq.mx
fabi_arelara@yahoo.com.mx