

APLICACION DE ALGUNAS TECNICAS AL DISEÑO HIDROLOGICO CON INFORMACION ESCASA.

**María Victoria Vélez, Ricardo A. Smith, Carlos A. Pérez,
Carlos J. Franco, Hernan D. Bolaños
Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas, Universidad Nacional**

1. INTRODUCCION

El objetivo básico de todo estudio hidrológico es lograr un entendimiento adecuado del comportamiento de la variable hidrológica de interés. En el caso del diseño de obras civiles lo que en general se quiere analizar es el comportamiento de esas obras para condiciones hidrológicas extremas. Se entiende que si su comportamiento es adecuado para esas condiciones extremas, se puede asumir que la estructura tiene un comportamiento "seguro". De esta manera, por ejemplo, si se trata de diseñar un puente se quisiera considerar en el diseño una situación crítica de caudales como una creciente de magnitud considerable. Por otra parte, si se trata de diseñar una bocatoma para un acueducto se quisiera considerar nuevamente una situación crítica que en este caso sería un caudal mínimo de muy baja magnitud. El objetivo de un estudio hidrológico en estos dos casos sería entender y representar el comportamiento de los caudales máximos, en el caso del puente, y de los caudales mínimos, en el caso de la bocatoma para el acueducto.

En general, para lograr su objetivo, un estudio hidrológico usa información existente

con base en la cual trata de inferir el comportamiento general de la variable hidrológica de interés. Normalmente este proceso de inferencia concluye en la selección de un modelo, o de un conjunto de modelos, hidrológicos que se utilizarán para estimar las condiciones hidrológicas críticas que se requieren para el diseño. Los modelos y los valores estimados con ellos serán tan buenos como la calidad de la información utilizada.

La calidad de la información hidrológica está asociada a varias circunstancias como son:

- La calidad del proceso de recolección de información
- La longitud de los registros o de la información
- La representatividad de la información recolectada

Asumiendo que los procesos de recolección de información son adecuados, se puede presumir que una serie de registros hidrológicos de longitud considerable debe ser bastante representativa del comportamiento de la variable hidrológica asociada. Mientras

mayor sea la longitud de los registros, mayor será la probabilidad de que la serie incluya una gama amplia de posibles comportamientos de la variable hidrológica asociada. Desafortunadamente en muchas ocasiones la información disponible es muy poca llegando a tener en el mejor de los casos sólo unos cuantos años. La falta o escasez de información conduce en general a despertar grandes dudas sobre los resultados obtenidos, lo cual hace que las personas asuman una actitud conservadora en los diseños y que se presente un incremento importante en los costos de la obra. En general se cumple la relación a menor información mayores costos. Sin embargo, la realidad en nuestro medio en la gran mayoría de los casos es una situación de falta o escasez de información y las obras tienen que ser diseñadas.

Muchas son las posibilidades de solucionar el problema de escasez de información y en todas ellas se ve el ingenio de los investigadores para enfrentar este tipo de situaciones.

Una de las herramientas más utilizadas para enfrentar los problemas de escasez de información es el análisis de regresión y correlación, mediante el cual se define una regresión entre la variable o parámetro de interés con características que pueden ser determinadas o estimadas en la cuenca sin información. Esta es tal vez una de las herramientas de análisis más poderosas desarrolladas en estadística, pero al mismo tiempo una de las más peligrosas. El peligro está en que puede llegar a indicar una buena o muy buena correlación entre variables que no están correlacionadas. Para obviar este problema se recomienda usar esta herramienta con cautela tratando de justificar físicamente la razón de ser de la asociación de las variables que se correlacionan.

Algunas posibles soluciones ante el problema de escasez de información son entonces:

- Asociar características hidrológicas específicas a características morfométricas mediante procedimientos de correlación y regresión. Una vez definidas las ecuaciones de regresión las características hidrológicas pueden ser estimadas en la cuenca sin información usando las características medidas para esa cuenca. En general este método recibe el nombre de regionalización de características hidrológicas y las características hidrológicas comúnmente regionalizadas son la media, la varianza y el coeficiente de asimetría de la variable hidrológica de interés.
- Desarrollar comportamientos espaciales (mapas) de ciertas características hidrológicas. Una vez construidos estos mapas las características hidrológicas pueden ser estimadas en la cuenca sin información mediante procedimientos de interpolación de la misma forma como se hace, por ejemplo, con las isoyetas. Estos métodos reciben el nombre de mapas regionales.
- Desarrollar relaciones o modelos conceptuales que permitan estimar las características hidrológicas de interés con base en características medibles. Por ejemplo, el caudal a sección llena corresponde a una creciente con un período de retorno de 2 años, que es aproximadamente la media de los caudales máximos instantáneos. Estos métodos son los llamados geomorfoclimáticos.

Con base entonces en esas posibles soluciones algunas de las alternativas para resolver el problema de falta o escasez de información podrían ser:

1. Regionalizar parámetros de modelos:
 - Modelos lluvia-escurrimiento
 - Modelos de distribución de probabilidades

2. Regionalizar características hidrológicas
 - Características medias
 - Traslado de curvas de duración
 - Traslado de curvas de frecuencia
 - Traslado curvas intensidad-frecuencia-duración.
3. Comportamiento regional de características hidrológicas
 - Mapas regionales
 - Zonas de vida
 - Uso de modelos geomorfoclimáticos

Los anteriores procedimientos suponen en general que se cumplen las siguientes condiciones, en la región o regiones donde se usan:

1. Homogeneidad regional
2. Similitud física-climática
3. Las características geomorfológicas guardan una información importante sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca.
4. Existe una relación directa entre la geomorfología y la hidrología.

Como se dijo anteriormente el uso de cada una de las metodologías mencionadas anteriormente dependerá de cada caso específico. En algunos casos el analista deberá hacer uso de su imaginación para solucionar adecuadamente el problema de información que tenga, pues es posible que ninguno de los métodos acá presentados pueda ser utilizado. Las palabras sentido físico, racionalidad e imaginación son claves en la solución de los problemas de falta o escasez de información.

Se presentará en este trabajo una aplicación de estas técnicas a dos regiones específicas

de Colombia, los departamentos del Quindío y Antioquia.

2. REGIONALIZACION DE CARACTERISTICAS HIDROLOGICAS

2.1 CARACTERISTICAS MEDIAS

Se mostrará en este artículo la regionalización de características medias, básicamente la media y la desviación estándar de caudales máximos y mínimos para el departamento de Antioquia.

El departamento de Antioquia está localizado al nordeste del país y cubre la porción más septentrional de las Cordilleras Occidental y central. Tiene una superficie de 63612 Km² (ver figura 1). En su mayor parte el territorio Antioqueño es montañoso, especialmente en su sector central, donde se encuentran las Cordilleras Occidental y Central, desviaciones de la gran cadena montañosa de los Andes, separadas por el cañón del río Cauca. Esta zona montañosa está bordeada por tres grandes depresiones de tierras bajas y planas: el amplio valle del Magdalena al este; la depresión del Cauca-Nechí al noroeste; y el valle del Atrato al oeste.

El clima es muy variado: desde frío en su porción central, hasta cálido y húmedo en las llanuras periféricas, pasando por una amplia zona templada, ocupada por cultivos de café. La geología es igualmente variada: rocas ígneas y metamórficas en la Cordillera Central, volcánicas y sedimentarias antiguas en la Cordillera Occidental; y sedimentarias terciarias y cuaternarias en las depresiones periféricas. En relación con el clima, el relieve y la geología, los suelos tienen una



Figura 1. Localización del Departamento de Antioquia.

gran variabilidad: aptos para toda clase de cultivos permanentes y bosques en las zonas quebradas, y para cultivos industriales y ganadería intensiva en las zonas bajas.

Existen grandes zonas en el departamento donde no hay ningún tipo de información histórica de caudales máximos instantáneos ni de caudales mínimos promedios, información que es indispensable para el diseño y construcción de gran cantidad de obras civiles.

En estos sitios este problema se resolvería si se acuden a resultados de regionalización, donde con base en características morfométricas se pueden estimar estadísticos, parámetros de las distribuciones, recomendar distribuciones, etc, de tal manera que para un sitio determinado puedan hallarse los caudales asociados a diferentes períodos de retorno. Se encontraron ecuaciones de re-

gresión entre los estadísticos principales de los caudales (media y desviación estándar) y los parámetros morfométricos básicos (área de la cuenca (A), longitud del río principal (L) y pendiente media del río principal (S), y la precipitación (P)).

Se analizaron datos históricos de caudales máximos instantáneos y mínimos promedios en 121 estaciones del departamento de Antioquia. Estas estaciones son operadas por el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT) y Empresas Públicas de Medellín (EPM).

Para la obtención de los parámetros morfométricos se utilizaron planos topográficos a escalas: 1:1500000, 1:500000, 1:200000, 1:100000 y 1:25000. Se midieron a partir de estos planos el área, longitud y pendiente del río principal.

Después de recolectar toda la información disponible que había sobre caudales máximos instantáneos y caudales mínimos medios diarios, se eligieron las estaciones que al menos presentaran una longitud de registros de 10 años y que tuvieran una buena calidad de los registros, teniendo en cuenta que los caudales no estuvieran influenciados por obras o desarrollos aguas arriba y que el comportamiento de la cuenca fuera el más homogéneo posible a través del tiempo. Finalmente se procesaron 71 estaciones para caudales máximos instantáneos y 74 para mínimos medios diarios. La localización de las estaciones utilizadas se muestra en las figuras 2 y 3.

Para relacionar la media y la desviación típica de los caudales máximos instantáneos y mínimos medios diarios con parámetros morfométricos, se usaron procedimientos de escogencia de modelos de regresión tipo Step Wise, y procedimientos de regresión lineal múltiple para estimar los parámetros de los modelos seleccionados. Las ecuaciones de regresión estimadas permiten la regionalización de la media y la desviación típica de los caudales anteriores.

Con la media y la desviación típica conocidas se pueden estimar los parámetros de la distribución de probabilidades de interés. Por ejemplo, para la Log Normal de dos parámetros sería:

$$\alpha = \ln(\mu) - \frac{1}{2} \beta^2$$

$$\beta^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)$$

donde α es el parámetro de forma, β es el parámetro de escala, μ es la media y σ es la desviación típica.

Con la información de los parámetros morfométricos y la lluvia promedia total multianual se procedió a la regionalización, con el objeto de encontrar en cada zona ecuaciones para la media y la desviación estándar de los caudales máximos instantáneos y mínimos promedios diarios. De esta manera se podrían calcular los parámetros para la distribución que mejor se ajuste a la zona y por ende los eventos para distintos períodos de retorno en sitios sin información. Para los caudales máximos instantáneos utilizando el procedimiento de selección del modelo Step-Wise y procedimientos de estimación tipo regresión múltiple, se encontraron para todo el departamento las siguientes ecuaciones (en este caso se utilizan todas las estaciones disponibles):

- Usando el modelo seleccionado

$$\text{CAUDAL} = 10^{-4.439} * A^{0.588} * S^{0.177} * P^{1.463}, R=0.947$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{-3.728} * A^{0.485} * P^{1.201}, R=0.856$$

En donde R representa el coeficiente de correlación.

- Usando sólo área y precipitación

$$\text{CAUDAL} = 10^{-4.261} * A^{0.576} * P^{1.444}, R=0.943$$

También se hallaron ecuaciones zonales, en donde las zonas fueron definidas por las cuencas de los ríos más grandes y con mayor número de estaciones, los resultados de estas correlaciones se presentan a continuación:

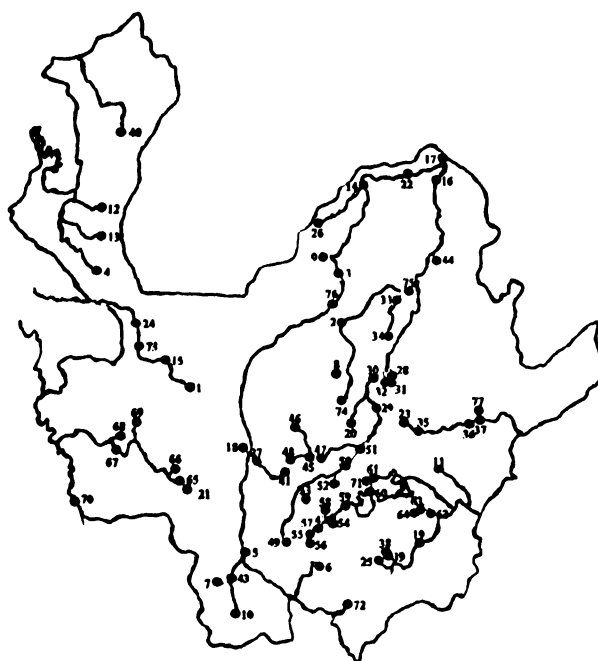


Figura 2. Ubicación y código de las estaciones utilizadas para caudales máximos instantáneos anuales



Figura 3. Ubicación y código de las estaciones utilizadas para caudales mínimos promedios anuales

- Zona de la cuenca del río Cauca
(Se utilizaron 15 estaciones):

$$\text{CAUDAL} = 10^{-2.402} * A^{0.571} * P^{0.916}, R=0.974$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{0.137} * A^{0.586}, R=0.974$$

- Zona Medellín - Porce - Nechí
(Se utilizaron 21 estaciones):

$$\text{CAUDAL} = 10^{-3.598} * L^{1.154} * P^{1.119}, R=0.962$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{-5.695} * L^{0.781} * P^{1.753}, R=0.932$$

- Zona Urabá-Riosucio
(Se utilizaron 8 estaciones):

$$\text{CAUDAL} = 10^{-3.004} * A^{0.474} * P^{1.136} * S^{0.382}, R=0.992$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{-3.737} * A^{-1.151} * L^{2.57} * S^{0.90} * P^{1.248}, R=0.891$$

Para los caudales mínimos, se muestra a continuación algunos de los resultados de las regresiones para el departamento y para tres de las zonas más representativas.

- Zona de los ríos Cauca, Medellín, Porce y parte baja del Nechí.

$$\text{MEDIA} = 10^{-4.752} * A^{0.960} * P^{0.883}, R=0.995$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{-2.509} * A^{1.052}, R=0.983$$

- Zona de los ríos Mulatos, León y Riosucio (8 estaciones utilizadas):

$$\text{MEDIA} = 10^{-3.137} * A^{1.404}, R=0.909$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{-2.545} * A^{1.112}, R=0.909$$

- Zona de los Ríos Anorí y parte alta del Nechí (8 estaciones consideradas)

$$\text{MEDIA} = 10^{-1.952} * L^{1.622}, R=0.971$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{-3.006} * L^{1.924}, R=0.970$$

Todo el departamento de Antioquia

$$\text{MEDIA} = 10^{-5.155} * A^{0.942} * P^{1.025}, R=0.974$$

$$\text{DESVIACION ESTANDAR} = 10^{-5.464} * A^{0.997} * S^{0.218} * P^{0.894}, R=0.974$$

En las ecuaciones anteriores se utilizaron las siguientes unidades: caudales en m³/s, área, (A), en Km², longitud (L) en Km, pendiente (S) en porcentaje y precipitación (P) en mm/año

2.2 DISTRIBUCIONES REGIONALES

A cada estación utilizada se les ajustaron las distribuciones Log-Normal de dos parámetros y Gumbel para los caudales máximos instantáneos anuales y Log-Normal de dos parámetros, Gumbel y Weibull para los caudales mínimos medios diarios anuales, con los parámetros estimados por los métodos de los momentos con estimadores no sesgados y máxima verosimilitud. Se hicieron las pruebas de ajuste de Smirnov-Kolmogorov, Cramer-Von Mises y la prueba de ajuste gráfica entre la función de probabilidades teórica y la empírica Weibull (i/(N-1)).

La selección de la distribución mas conveniente para cada estación se hizo de acuerdo

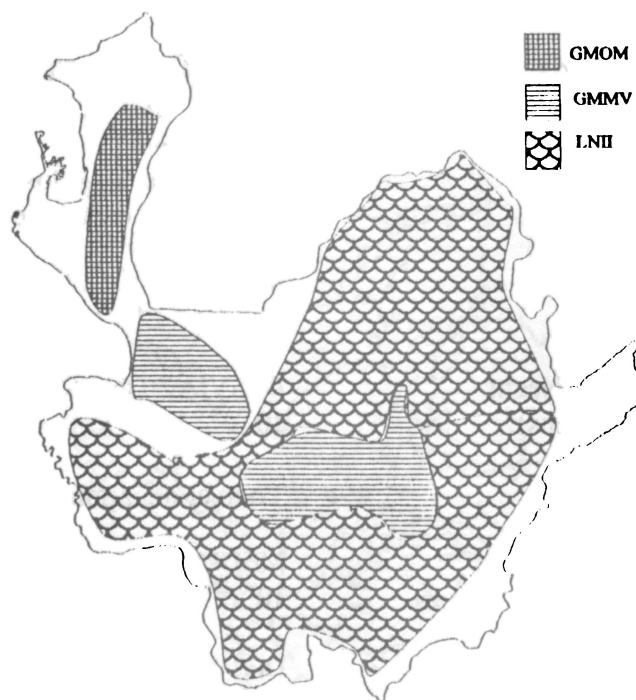


Figura 4. Distribución espacial de las funciones de probabilidad para caudales máximos instantáneos anuales.

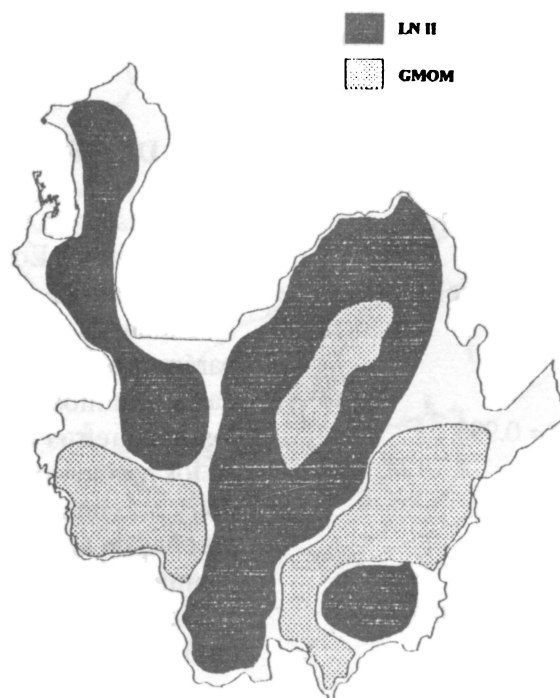


Figura 5. Regionalización de las distribuciones para caudales mínimos.

al menor valor calculado del estadístico de Smirnov-Kolmogorov y Cramer-Von Mises. Para aquellas estaciones donde dichos estadísticos eran muy similares se utilizó la distribución que presentaba el mejor ajuste gráfico como criterio decisor.

Para el estudio de caudales mínimos el Departamento de Antioquia se dividió en 6 regiones. En términos generales predominó el ajuste de la distribución Weibull. No obstante, con relación a la calidad de ajuste, las diferencias con las otras dos distribuciones no fueron grandes; razón que motivó la sustitución de la distribución Weibull en aquellas cuencas donde la diferencia en los estadísticos con respecto a las otras distribuciones era pequeña. Esto con el fin de evitar el trabajo con una distribución que involucra el coeficiente de asimetría, cuya estimación confiable requiere grandes volúmenes de información. Finalmente se recomendaron las distribuciones Log Normal de dos parámetros (LNII) y la Gumbel por el método de momentos (GMOM) para las diferentes regiones.

Para el estudio de caudales máximos instantáneos el departamento de Antioquia se dividió en cuatro regiones. En este caso sólo se usaron distribuciones de dos parámetros para evitar el problema de estimación del coeficiente de asimetría. Las distribuciones finalmente escogidas corresponden a la Gumbel ajustada por el método de momentos (GMOM) y máxima verosimilitud (GMMV) y a la Log Normal de dos parámetros (LNII).

Usando las pruebas de ajuste mencionadas anteriormente se recomiendan para cada región el uso de una distribución particular. La zonificación de las distribuciones se muestran en las figuras 4 y 5. Las zonas en blanco corresponden a zonas sin ninguna información hidrológica.

2.3 CURVAS DE DURACION

En el departamento del Quindío existen una serie de estaciones limnigráficas, de corrientes que desembocan al río La Vieja. Estas estaciones tienen una serie de registros muy corta (10 años) y era necesario obtener las curvas de duración para estas estaciones. Todos los ríos correspondientes a éstas desembocan en el Río la Vieja. Se hallan los rendimientos y son similares con los del río La Vieja, que tiene una serie de longitud 40 años, podría a partir de los datos del Río la Vieja, hallar curvas de duración más confiables para estas estaciones, además se podría generar información en sitios sin registros históricos.

El Departamento del Quindío se encuentra localizado en el flanco occidental de la Cordillera Central y situado a $4^{\circ}04'$ - $4^{\circ}44'$ latitud norte y $75^{\circ}26'$ - $75^{\circ}54'$ latitud oeste. Su capital es Armenia y posee once municipios más que son: Calarcá, Montenegro, Quimbaya, La Tebaida, Circasia, Filandia, Génova, Pijao, Salento, Córdoba y Buenavista. De acuerdo con el Censo Nacional de 1993, el Quindío tiene una población de 458.939 habitantes. El 84.87% de la población del Departamento vive en la zona urbana. El régimen de lluvias en el Departamento del Quindío es bimodal, se presentan dos épocas de abundantes lluvias que son los inviernos que van de marzo a mayo y septiembre a noviembre; también hay dos temporadas de menores precipitaciones denominadas veranos que van desde diciembre a febrero y de junio a agosto. El Departamento es una de las regiones más productivas de café del país y su localización se muestra en la figura 6.

Las estaciones limnigráficas utilizadas se muestran en la figura 7 y los parámetros morfométricos correspondientes a esas estaciones se pueden observar en la tabla 1.



Figura 6. Localización del Departamento del Quindío

Tabla 1. Parámetros Morfométricos hasta las estaciones limnigráficas.

Estación	Corriente	Longitud Km	Area Km ²
CRISTALES	Q. CRISTALES	16,73	30,10
BOCATOMA E.P.A.	RIO QUINDIO	28,85	155,20
LA ESPAÑOLA	RIO ROBLE	37,45	119,27
PTO ALEJANDRIA	Q. BUENA VISTA	30,49	50,21
RIO VERDE	RIO VERDE	17,59	77,37
CALLE LARGA	RIO QUINDIO	64,50	657,02
LA HERRADURA	RIO ESPEJO	47,65	153,86
SAN JUAN	RIO SAN JUAN	19,30	62,18
ALAMBRADO	RIO LA VIEJA	46,90	1614,36
CARTAGO	RIO LA VIEJA	101,70	2451,54

De las series de caudales suministradas se tomaron los máximos instantáneos anuales, mínimos medios anuales y medios anuales para las estaciones limnigráficas que opera la C.R.Q. y las que opera el Himat (Cartago y Alambrado).

Si se comparan los rendimientos medios y mínimos con los de las cuencas que tienen información en el Quindío, presentan una gran similitud según puede verse en la tabla 2.

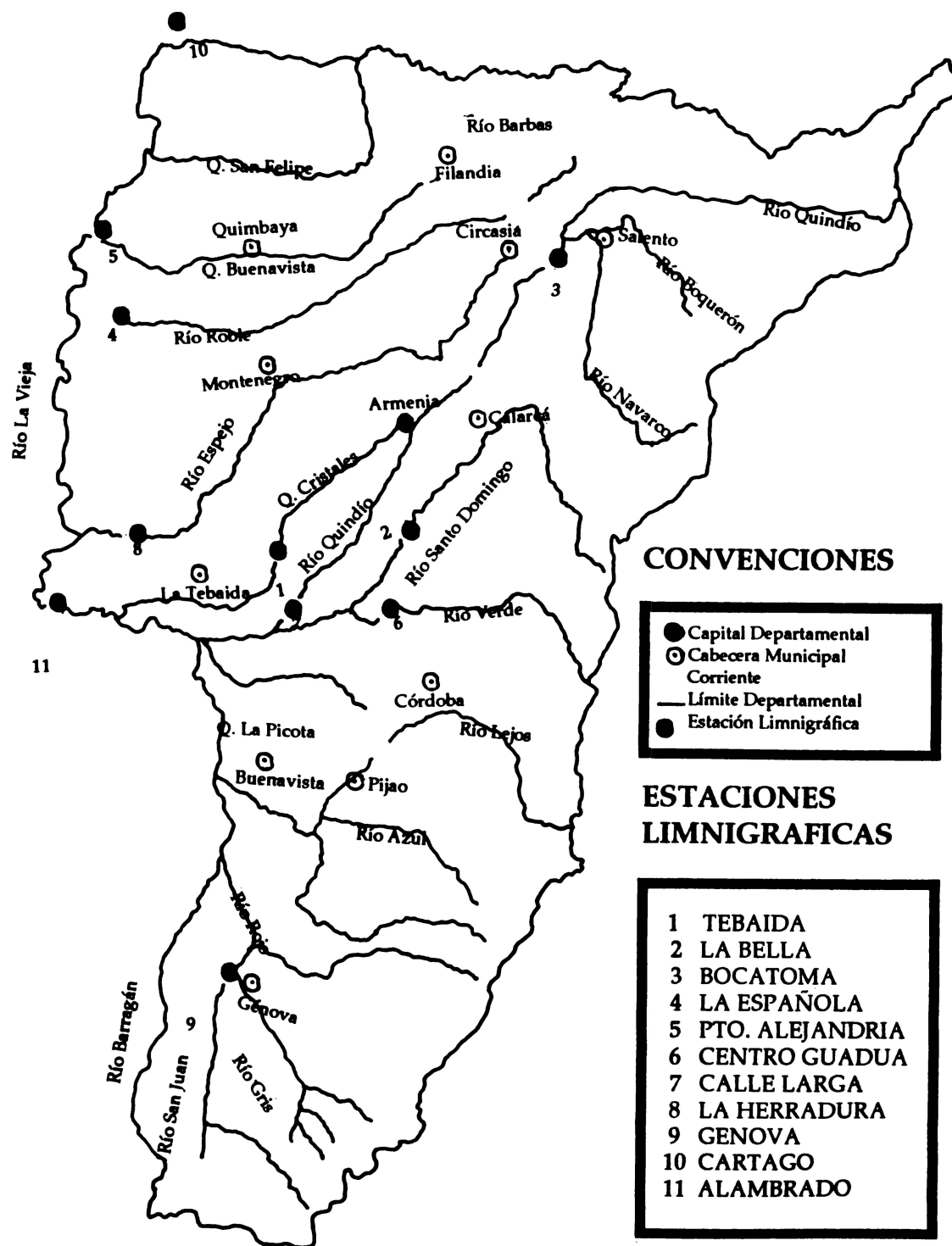


Figura 7. Estaciones Limnigráficas en el Departamento del Quindío

Tabla 2. Rendimientos de caudales máximos, medios y mínimos

Estación	Corriente	RENDMAX l/km ²	RENDMIN l/km ²	RENDMED l/km ²
LA HERRADURA	RIO ESPEJO	88,00	8,38	27,49
SAN JUAN	RIO SAN JUAN	224,99	8,20	26,21
CALLE LARGA	RIO QUINDIO	168,40	5,30	17,87
BOCATOMA E.P.A	RIO QUINDIO	235,71	10,66	31,80
RIO VERDE	RIO VERDE	62,17	8,14	15,77
ALEJANDRIA	Q.BUENA VISTA	71,40	18,70	30,83
CRISTALES	Q.CRISTALES	99,67	13,95	14,62
LA ESPAÑOLA	RIO ROBLE	471,87	9,06	32,28
ALAMBRADO	RIO LA VIEJA	278,93	10,18	34,52
CARTAGO	RIO LA VIEJA	231,42	10,24	36,67

Esto representa una gran ayuda en el caso de sitios sin información, ya que permitiría a partir de los registros de Cartago y Alambra-
do, generar series de caudales, conociendo solamente el área de la cuenca.

Se construyen las curvas de duración para cada una de las estaciones limnigráficas con los registros de los caudales promedios diarios. Con el fin de comparar el comportamiento de los caudales medios, con vistas a una posible regionalización, estas curvas se superpusieron y se adimensionalizaron obteniendo los resultados que se aprecian en la Figura 8. El parámetro que se usó para adimensionalizarlos fue la media de los caudales medios. Se trató de buscar una ecuación única, para una curva regionalizada, que representara el comportamiento de toda la zona, ver figura 9. Para lograr esto se hizo necesario considerar dos zonas. La primera, para caudales cuya probabilidad de excedencia fuera menor o igual al 55%. Para esta zona la ecuación es:

$$Q = e^{1.02745} * P^{-0.3211}$$

Cuando la probabilidad de excedencia es mayor del 55%, la ecuación es:

$$Q = e^{1.34776 - 0.0289207 * P}$$

donde p es la probabilidad de excedencia.

3. OTRAS METODOLOGIAS

Se presentan en este numeral, dos metodologías que también pueden usarse cuando se tiene poca información o se carece de ella. Estas metodologías son el método del Índice de Crecientes y el Gradex. Se mostrará un ejemplo de aplicación de ellas en las estaciones del Departamento de Antioquia mencionadas anteriormente.

3.1 METODO DEL INDICE DE CRECIENTES.

Este método fue presentado inicialmente por Dalrymple y Benson en 1960, las modificaciones teóricas sufridas por el método fueron hechas por Gupta, Mesa y Dawdy en 1994.

El procedimiento consiste en reunir apropiadamente todos los registros de todas las estaciones de medición de una región a estudiar en una sola serie más grande y por lo tanto más confiable, para proceder luego al ajuste de una distribución de probabilidades. Se calcula un índice para cada estación que puede ser la media de la serie histórica de caudales máximos instantáneos o el área elevada a un factor que puede ser variable,

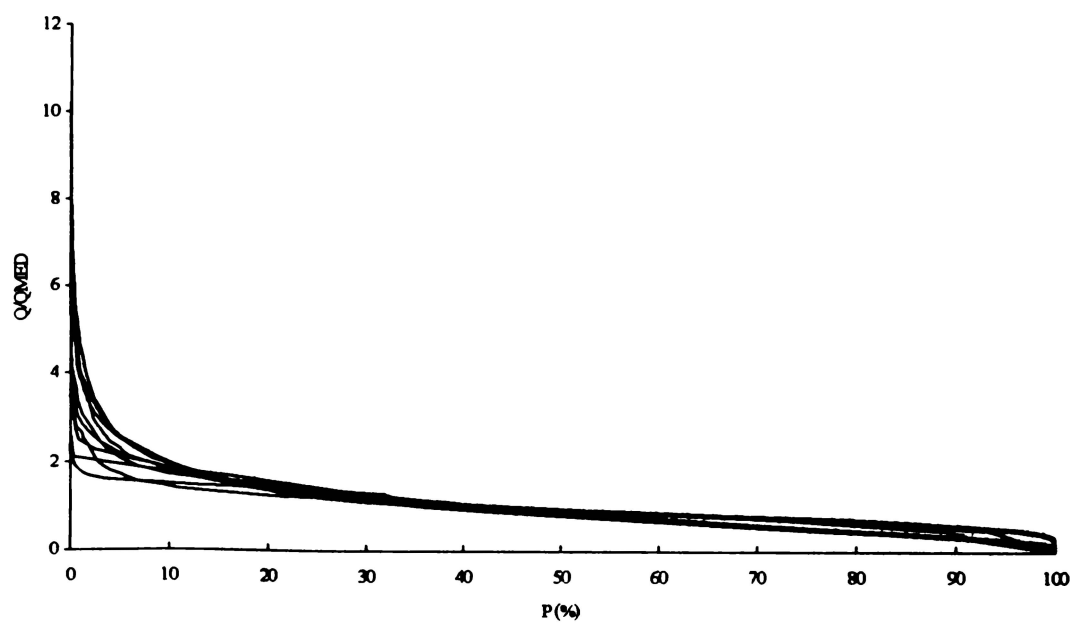


Figura 8. Curvas Adimensionales de Duración Superpuestas.

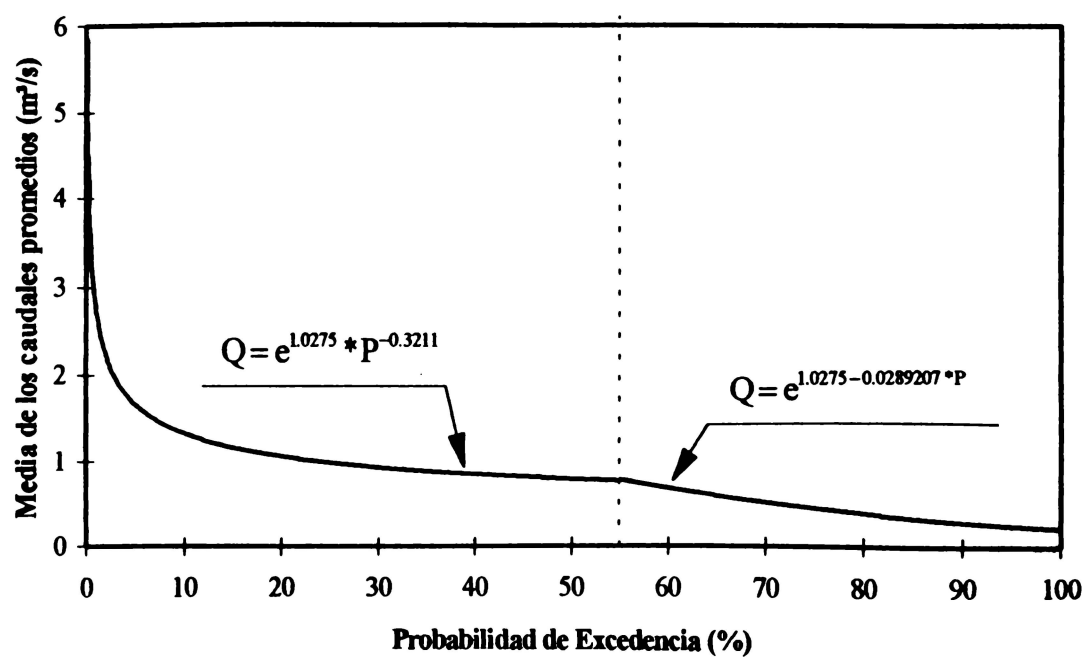


Figura 9. Curva de Duración Regional.

y luego se divide toda la serie de la estación por este índice.

En cuencas sin medida se requeriría únicamente del factor de escala, para lo cual se recurre a las ecuaciones regionales de la media de los caudales máximos instantáneos anuales.

Según Mesa (1994), el método es bastante atractivo pues ataca los tres puntos cruciales del análisis de crecientes:

- Hay bastante dificultad en determinar a partir de los datos la distribución probabilística que describe adecuadamente los caudales máximos. Aún en el caso de registros del orden de 100 años de longitud, la estadística no permite siempre discriminar entre una distribución y otra. El método del índice de crecientes permite especificar una única distribución para las crecientes de una región hidrológica homogénea y al hacerlo el número de datos se aumenta en la medida que existan varias estaciones de medición con registros de varios años.
- Economía de parámetros entre los modelos estadísticos. Todo parámetro que se estime tiene una incertidumbre asociada. Si la información base es la misma, la estimación de un número grande de parámetros conlleva un aumento de la incertidumbre. En el sentido contrario, un modelo con más parámetros es más flexible. Es necesario establecer un compromiso entre estas dos tendencias opuestas y buscar un equilibrio. En los Montes Apalaches, el enfoque tradicional, suponiendo distribuciones probabilísticas con tres parámetros daría un total de 810 parámetros para las 270 estaciones. Mientras que para el método del índice de crecientes solamente son necesarios 273 parámetros,

tres para la distribución estadística de los índices y uno para cada cuenca que permite pasar de crecientes a los índices.

- Posibilidad de extender el conocimiento regional, a las cuencas sin medición. Si el factor de escala es por ejemplo la creciente media y es posible estimar la creciente media con base en parámetros morfométricos, es posible obtener el caudal para un período de retorno determinado, simplemente multiplicando el índice de creciente regional para ese período de retorno por la creciente media.

En Antioquia el índice utilizado fue el caudal medio de las series de caudales máximos instantáneos en cada estación. En total se obtuvieron 71 índices, uno por estación y se obtuvo una serie de índices con una longitud de 1158 valores adimensionales, esta serie se ajustó a las distribuciones Log-Normal II, Gumbel y Log-Pearson III. El ajuste para la Log-Normal II fue malo, ya que no pasó las pruebas de los estadísticos de Smirnov-Kolmogorov y Cramer-Von Mises. Sin embargo la prueba de ajuste gráfica presentó un buen comportamiento. La distribución Gumbel se ajustó por los métodos de los momentos y máxima verosimilitud presentando mejores resultados la Gumbel por momentos tanto en el menor valor de sus estadísticos como en un mejor ajuste gráfico. Ver figura 10.

El resultado del ajuste de la prueba gráfica hace pensar en la aplicabilidad de esta teoría para el cálculo de eventos en sitios sin ninguna medición mediante la utilización de las ecuaciones regionales, que ya se han expuesto en numerales anteriores multiplicando el valor de la media obtenida de estas ecuaciones por el valor adimensional de diferentes períodos de retorno obtenidos de la serie de índices.

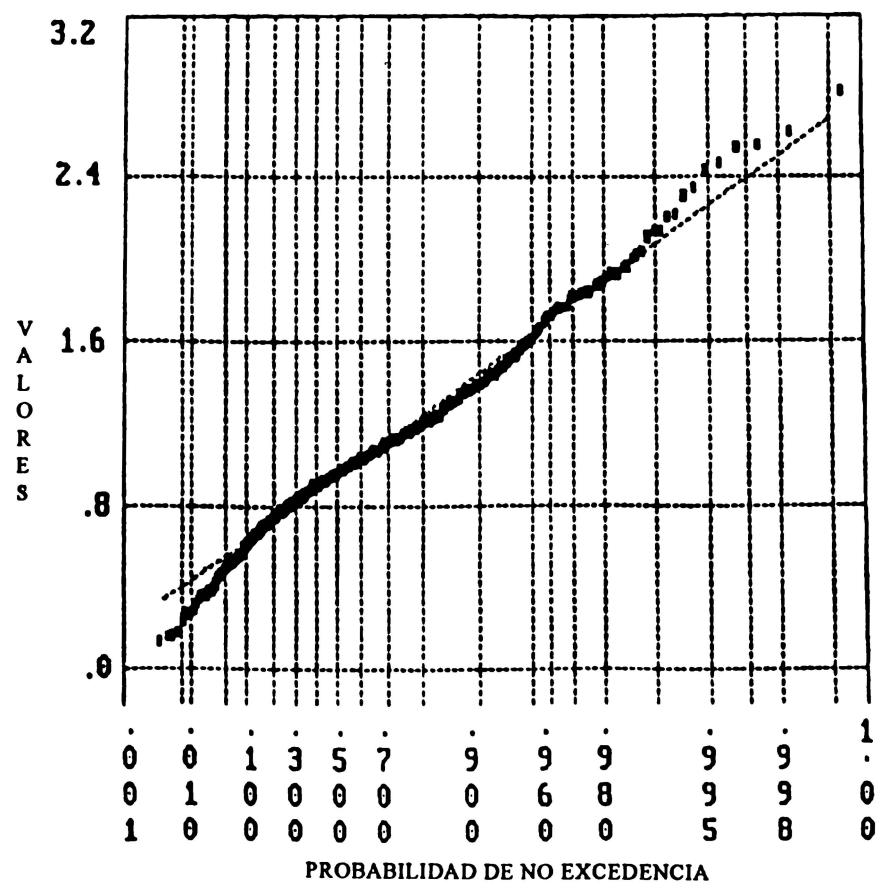


FIGURA 10. Prueba de ajuste gráfica para la distribución Gumbel ajustada por el método de los momentos.

En la tabla 3. se presenta el resultado del ajuste de estos índices a una distribución

Gumbel, ajustada por el método de momentos.

TABLA 3. Eventos adimensionales obtenidos de la serie de índices.

PERIODO RETORNO	MAGNITUD EVENTO	LIMITES DE CONFIANZA		PLOTING POSITION	ERROR %
		SUPERIOR	INFERIOR		
5	1.247	1.277	1.216	1.206	3.40
10	1.447	1.488	1.406	1.394	3.79
15	1.560	1.608	1.513	1.521	2.60
25	1.700	1.756	1.645	1.727	1.57
50	1.888	1.955	1.822	1.889	0.06
100	2.075	2.152	1.997	2.142	3.25

3.2 GRADEX

Este método muy utilizado en Francia, ignora deliberadamente la complejidad de los mecanismos que producen las crecientes. En cambio ofrece un modelo estadístico que toma los diferentes procesos como un todo.

La premisa de este método es que la distribución de probabilidades de las precipitaciones máximas es la misma que la de los caudales máximos instantáneos. A partir de la distribución estadística de la precipitación se deduce la distribución de valores extremos de caudales.

El sentido físico del método se basa fundamentalmente en la suposición de que al saturarse el suelo de una cuenca, toda la precipitación que cae sobre ésta se convierte en escorrentía. En este momento se podría igualar la pendiente de la función de distribución de probabilidades de la precipitación a la función de distribución de probabilidades de los caudales.

Se mostrará un ejemplo de aplicación a una estación limnigráfica y se comparará su resultado con el de las otras metodologías utilizadas. Se escogió la distribución Gumbel para modelar la precipitación.

El procedimiento seguido en el método del Gradex comprendió la recopilación de información de precipitaciones diarias (24 horas) máximas anuales, para una cuenca determinada, se tomó una serie representativa del comportamiento de la cuenca y a ésta se le ajustó una distribución Gumbel, tanto por el método de los momentos como el de la máxima verosimilitud. Se encontró que la serie se ajustaba mejor por el método de los momentos, en la gráfica en papel Gumbel del ajuste por el método de los momentos, se leyó la pendiente que toma la línea de ajuste de la distribución, esta pendiente es el

GRADEX (GRADiente de valores EXtremos). A continuación se transformó el GRADEX a la pendiente de la función de probabilidades de los caudales, por medio de una sencilla conversión con el área de la cuenca elegida, al tener la recta que define la función de probabilidades para los caudales y el valor del caudal para un período de retorno de 10 años. Basta solo determinar el valor deseado del período de retorno para la creciente, interceptar la recta de la función de distribución de probabilidades y leer la magnitud del evento.

Información más detallada acerca de la fundamentación y utilización del método se puede encontrar en Garcon (1994), Guillot (1993), Bois (1980).

Para aplicar el método del Gradex se trabajó con la cuenca delimitada por la estación G-8, en el río Guatapé en Antioquia, se tomaron los registros de la precipitación anual máxima en 24 horas y se procedió a ajustarles la distribución Gumbel, a la que se calculó su pendiente, tomando como abscisas el intervalo de probabilidad entre 0.9 y 0.8 (10 y 5 años) y como ordenadas la magnitud de la precipitación de 24 horas.

Una vez medida la pendiente (gradex), se realizó la transformación de dicha pendiente a la pendiente de la distribución de los caudales máximos, multiplicando por el área de la cuenca y haciendo el respectivo cambio de unidades. También se determinó la creciente de período de retorno de 10 años. Al tener un punto y la pendiente de la recta de la función de distribución de probabilidades de los caudales máximos, se puede trazar la recta que representa dicha función en papel Gumbel.

Se leen los eventos asociados a los diferentes períodos de retorno, obteniéndose los resultados que se muestra en la Tabla 3, así

TABLA 4. Comparación entre eventos obtenidos con otros métodos y el gradex para la estación G-8.

TR	LN II	GMOM	GMMV	REG. LN II	REG. GMMV	INDICE	ECUACION	GRADEX
5	229.69	224.36	233.07	178.98	177.40	239.41	146.97	95.00
10	255.99	250.62	264.56	203.01	202.47	277.90	170.44	130.00
15	270.21	265.43	282.32	216.18	216.62	299.62	183.69	155.00
25	287.34	283.79	304.34	232.20	234.16	326.54	200.10	185.00
50	309.61	308.41	333.85	253.25	257.66	362.61	222.10	220.00
100	331.10	332.84	363.14	273.82	281.00	398.42	241.14	260.00

mismo se encuentran en la tabla los eventos asociados a diferentes períodos de retorno por los diversos métodos utilizados, para hacer más fácil su comparación.

Donde LNII muestra los resultados del ajuste para varios períodos de retorno, realizado utilizando la distribución lognormal de dos parámetros para los registros originales de la estación; GMOM es el realizado a los mismos registros utilizando la Gumbel ajustada por el método de momentos; GMMV es el realizado a los registros históricos utilizando la Gumbel ajustada por máxima verosimilitud; REG.LNII es el resultado obtenido al ajustar la distribución Lognormal II con los parámetros de las obtenidos de las ecuaciones de regresión zonales mencionadas anteriormente; REG.GMMV es el resultado de aplicar este mismo procedimiento a los parámetros de la distribución Gumbel ajustada por máxima verosimilitud; ECUACION muestra los resultados de este mismo procedimiento utilizando la ecuación regionalizada para toda Antioquia, para hallar los parámetros de la Lognormal; INDICE, muestra los resultados de aplicar el método del índice de crecientes a la cuenca correspondiente a la estación G-8 y Gradex muestra los resultados de aplicar esta metodología a la misma estación.

4. CONCLUSIONES

- La función de distribución de probabilidad que predomina en el departamento de Antioquia para eventos extremos máximos es la Log-Normal II, la estimación de los parámetros para esta distribución o para la Gumbel en las zonas donde ésta tenga marcada influencia puede hacerse directamente con las ecuaciones para medias y desviaciones estándar en las diferentes zonas del departamento.
- Las ecuaciones regionales halladas presentan una correlación buena, debido al cuidado que se tuvo en la selección de la información y a la calidad de esta.
- El comportamiento general de las variables utilizadas en las correlaciones demuestra que, el área y la precipitación tienen una gran influencia en los diferentes modelos.
- Entre los modelos de regresión utilizados el multiplicativo tiene más sentido físico que el lineal, ya que al ajustar el modelo la constante presentaba valores altos, independientemente de las variables utilizadas y lo que se ganaba en la correlación era muy poco.

- Para los caudales mínimos las estaciones con registros más largos tienen la tendencia de ajustarse mejor a la distribución Gumbel. Por el contrario, las estaciones con un número menor de registros se ajustan mejor a la distribución Log-Normal II.
- Al comparar el tamaño de las cuencas utilizadas para los caudales mínimos, se nota que la distribución Weibull predomina en cuencas pequeñas.
- Los estadísticos calculados de las pruebas Smirnov-Kolmogorov y Cramer-Von Mises para las diferentes distribuciones utilizadas en caudales mínimos no difieren mucho de una distribución a otra. Para los caudales máximos esta diferencia es más notoria.
- En próximos trabajos para aplicar el Gradex, se podría pensar en regionalizar el caudal máximo instantáneo de 10 años y la pendiente de la distribución de las precipitaciones máximas de 24 horas.
- El método del índice de crecientes, por la importancia que tiene para cuencas sin registros o con poca información, merece que se le dediquen más trabajos de investigación en nuestro país.
- Todas estas metodologías para el análisis hidrológico con información escasa se desarrollan en regiones específicas, en las cuales su aplicación debe hacerse cuidadosamente, ponderando los resultados obtenidos, sin tomar las ecuaciones de regionalización como un recetario de cocina.
- Para verificar las metodologías propuestas en este artículo se calcularon los eventos para períodos de retorno de 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años y habiéndose observado que los valores ajustados por las distribuciones son bastante similares y que los valores obtenidos con las ecuaciones de regionalización para toda Antioquia sólo se ajustan bien con respecto a los valores estimados con las funciones de probabilidad para algunas estaciones. Este resultado es debido posiblemente al efecto que ejerce el área y la precipitación en las ecuaciones; es decir se presenta una gran variabilidad geomorfoclimática en todo el departamento de Antioquia. No obstante el valor del evento estimado con el índice de crecientes presenta unos resultados más cercanos a los obtenidos por el ajuste con las distribuciones de probabilidad y, por último, el valor obtenido al ajustar los parámetros estadísticos para cada región con la función de probabilidades que predomina en esa zona presenta valores que en muchos casos son parecidos a los obtenidos por las distribuciones y al método del índice de crecientes. Según los resultados expuestos se recomienda profundizar más en el método del índice de crecientes como una buena alternativa para calcular eventos en sitios sin medida utilizando las ecuaciones regionales.
- El método del Gradex presentó buenos resultados en su aplicación a la estación G-8, tomando órdenes de magnitud muy cercanos a los de los demás métodos, sin embargo se vio una gran sensibilidad en los valores calculados para los diferentes períodos de retorno a la creciente de los 10 años, la cual se le tiene que proporcionar al método. En general este método es operativamente sencillo y fácil de utilizar.
- Para el cálculo de eventos extremos a partir de la utilización de las expresiones de regionalización obtenidas en este estudio se recomienda que las ecuaciones

sean aplicadas para cuencas cuyos parámetros (área y precipitación media principalmente) estén dentro de los rangos analizados en este trabajo.

- Con respecto a la proyección que puede hacerse en el estimativo de los períodos de retorno y su correspondiente evento, debe tenerse presente que para calcular eventos con altos períodos de retorno se presenta una mayor incertidumbre, por lo tanto se tendría una mayor confiabilidad para eventos con períodos de retorno menores de 25 años, admitiéndose con mucha reserva el cálculo de eventos para períodos de retorno hasta de 50 años.

BIBLIOGRAFÍA

- Camargo, D.H. Baquero. Regionalización de caudales máximos en Antioquia. Proyecto de grado, Universidad Nacional, Medellín, 1981.
- Departamento Nacional de Planeación. Isoyetas medias multianuales. Planos. Bogotá. 1983.
- Empresas Públicas de Medellín. Boletín Hidrometeorológico. Vol 1, Vol 2. Medellín.
- Guillot, P. The arguments of the gradex method: a logical support to assess extreme floods. Extreme Hydrological Events : Precipitation, Floods and Droughts, Great Britain. 1993.
- Garcon, R. The gradex method: for a statistically robust evaluation of extreme-value floods based on local characteristics. Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering, Netherlands, volumen 1. 1994.
- Bois, P.H. Hidrologie Generale. Ecole Nationale Supérieure D'Hydraulique de Grenoble. 1979-1980.
- Gupta, V., O. Mesa, D. Dawdy. Multiscale theory of flood peaks: regional quantile analysis. Water Resources Research Vol 30, N°12, pag 3405- 3421, Diciembre 1994
- Guzman J, M. Vélez, Análisis de caudales máximos en Antioquia. Proyecto de grado. Universidad Nacional, Medellín, 1979.
- Kite G.W. Frequency and risk analyses in hydrology. Colorado, 1977.
- Leopold, L., M. Gordon, J. Mille. Fluvial processes in geomorphology. W. H. Freeman and company. San Francisco, 1964.
- Munera, J., J. Muñoz. Investigación regional de caudales mínimos en Antioquia. Proyecto de grado, Universidad Nacional, Medellín, 1980.
- Pérez, C., Franco, C. Regionalización de Caudales Máximos en Antioquia. Proyecto de grado, Universidad Nacional, Medellín, 1995.
- Salas, J., R. Smith, G. Tabios y J. Heo. Statistical computer techniques in hydrology and water resources. Colorado. Estados Unidos, 1993.
- Tamayo, D., J.A. Zuluaga. Relación entre las características probabilísticas observadas de lluvias y caudales máximos en algunas cuencas de Antioquia. Tesis. Universidad Nacional, Medellín, 1988.

Universidad Nacional, CORNARE. Modelos de estimación de caudales máximos instantáneos, medios y mínimos en 180 subcuencas de la región CORNARE. Informe final, Medellín, 1988.

Vélez, M., R. Smith, O. Mesa, J. Vélez. Hidrología para el diseño de obras civiles con énfasis en la información escasa. Seminario. Universidad Nacional, Medellín, 1993.