



Revista EIA

ISSN: 1794-1237

revista@eia.edu.co

Escuela de Ingeniería de Antioquia

Colombia

Álvarez, Lina María; Barros, Juan Fernando
PROPUESTA DE CALIBRACIÓN DE UN MODELO PARA EL TRÁNSITO DE CRECIENTES EN UN
TRAMO DEL RÍO MEDELLÍN
Revista EIA, núm. 6, diciembre, 2006, pp. 129-140
Escuela de Ingeniería de Antioquia
Envigado, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149216907011>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

PROPUESTA DE CALIBRACIÓN DE UN MODELO PARA EL TRÁNSITO DE CRECIENTES EN UN TRAMO DEL RÍO MEDELLÍN

LINA MARÍA ÁLVAREZ*
JUAN FERNANDO BARROS**

RESUMEN

En este artículo se presenta la metodología seguida en la calibración del modelo NWS-FLDWAV para el tránsito de crecientes en un tramo del río Medellín. Para la construcción del modelo se recopiló la información topográfica del tramo seleccionado del río y de las hidrógrafas de nivel registradas por las estaciones limnigráficas. A partir del análisis del comportamiento de las crecientes escogidas, se identificó la importancia de considerar los aportes de caudal a lo largo del tramo, los cuales surgen de la escorrentía directa causada principalmente por la precipitación. Se determinó una forma para calibrar el modelo a partir del coeficiente de rugosidad de Manning y del caudal de aporte en el tramo. Este caudal se obtuvo del análisis de la diferencia entre caudales base para las dos estaciones limnigráficas que limitan el tramo y se simuló con una distribución espacial y temporal.

PALABRAS CLAVE: tránsito de crecientes; calibración; caudal base; llanura de inundación; río Medellín; NWS-FLDWAV.

ABSTRACT

This paper presents the methodology used to calibrate an NWS-FLDWAV model for flood routing through a stretch of the Medellín river. To build the model, the topographic information of the selected river section was compiled as soon as the stage hydrographs registered in the gauge stations. The importance of considering the discharge contributions along the stretch, which arise from the direct run-off caused essentially by the precipitation, was identified through the analysis of the behavior of the chosen floods. A way to calibrate the model was discovered that included the Manning coefficient of frictional resistance and

* Ingeniera Civil, EIA. Grupos de Investigación Gabis y Espiral, EIA. linalsan@yahoo.com

** Ingeniero Civil, EIA. Magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Profesor-investigador, EIA. Grupos de Investigación Gabis y Espiral, EIA. pjubar@eia.edu.co

the contribution discharge. This discharge was obtained from the analysis of the difference between base discharges for the two measurement stations that limit the river segment and were simulated with a spatial and temporal distribution.

KEY WORDS: flood routing; calibration; base discharge; floodplain, Medellín river; NWS-FLDWAV.

1. INTRODUCCIÓN

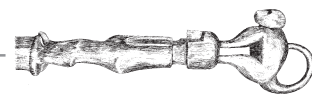
El tránsito de crecientes puede fundamentarse en el sistema de ecuaciones de Saint Venant¹, cuya solución se apoya en el desarrollo de técnicas numéricas. Debido a las limitaciones de tipo operativo para resolver estas ecuaciones, surgieron simplificaciones que dieron lugar a varios métodos de tránsito de crecientes. Existen, pues, varias alternativas para transitar crecientes a partir del método hidráulico, unas más exactas que otras, según los procedimientos de cálculo numérico empleados en la solución de las ecuaciones de Saint Venant. Gracias al desarrollo de estos procedimientos y al perfeccionamiento alcanzado en los sistemas informáticos en las últimas décadas, hoy en día se cuenta con modelos computacionales para el tránsito hidráulico de caudales que permiten hacer análisis y diseños que responden a las necesidades del medio, cumpliendo con los requisitos de seguridad y economía. Uno de ellos es el NWS-FLDWAV, un modelo generalizado de onda dinámica para flujo no permanente y unidimensional, basado en el método implícito de diferencias finitas, el cual cuenta con varias aplicaciones especiales que permiten considerar características particulares del flujo, del canal y de la llanura de inundación, herramientas que hacen posible la simulación y ayudan a obtener resultados coherentes con los observados en campo.

A pesar del progreso alcanzado en el ámbito internacional en el desarrollo de modelos como el NWS-FLDWAV para el tránsito de crecientes, en el departamento de Antioquia (Colombia) ha sido

escaso el uso de estas aplicaciones, razón por la cual, hasta finales del año 2005, no se contaba con un modelo calibrado de estas características para el río Medellín. Por esta razón se propuso calibrar un modelo dinámico de tránsito para el tramo del río Medellín comprendido entre el puente de entrada al municipio de Girardota y el puente El Hatillo. Este tramo tiene una longitud aproximada de 12 kilómetros y se encuentra ubicado en el norte del Valle de Aburrá, en el departamento de Antioquia. Para ello se contó con información histórica sobre los niveles en el río producidos por varias crecientes ocurridas en los años 1995, 1999, 2001 y 2003, registrados en las estaciones limnigráficas Girardota (RMS-22), El Hatillo (RMS-13), Yarumito (RMS-14) y Gabino (RMS-15), ubicadas en los extremos del tramo y aguas abajo de éste, en el orden en que se mencionan. También se contó con información sobre la geometría de varias secciones cuya topografía fue levantada en los años en que ocurrieron las crecientes, y se utilizaron los registros de las precipitaciones asociadas a las crecientes estudiadas, tomados de cuatro estaciones pluviográficas ubicadas en inmediaciones del tramo de estudio. Esta información, suministrada por las Empresas Públicas de Medellín E. S. P. (EPM)², sirvió como referencia para confrontar los resultados obtenidos al transitar las crecientes utilizando el modelo computacional NWS-FLDWAV para calibrarlo de manera que pueda emplearse en posteriores aplicaciones y se convirtió en una herramienta de predicción, diseño y revisión de proyectos en el río Medellín a su paso por la zona norte del Valle de Aburrá.

¹ Sistema de ecuaciones diferenciales parciales que resume los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento. Fue formulado por Saint Venant en 1871.

² Entidad dedicada a la prestación de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado, energía, gas y telecomunicaciones en el Valle de Aburrá.



A partir de la revisión bibliográfica y del reconocimiento del sitio en una visita, se obtuvo información sobre el estado de la llanura aluvial en la zona de interés, en el cual influye de forma significativa la alteración de la dinámica del río debida a la fuerte intervención antrópica a la que ha sido sometido.

2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA

2.1 Variables que se incluyen en el archivo de datos de entrada del modelo NWS-FLDWAV

El archivo de datos de entrada está constituido por datos (*Data Group*) que reúnen variables que se agrupan de acuerdo con el tipo de información que proporcionan al modelo, como es la relacionada con el método numérico de iteración, con la topografía, con las hidrógrafas de entrada y observadas, etc. Para la calibración del modelo en el caso estudiado se utilizaron 29 grupos de datos y 79 variables. Dentro de estas variables se distinguen aquellas que describen las características particulares de la corriente en la que se realiza el tránsito y del evento de creciente que se desea modelar. Las primeras variables mencionadas permiten precisar la topografía de las secciones (como son las cotas y anchuras), las distancias entre éstas, los coeficientes de expansión-contracción del canal y los coeficientes de rugosidad de Manning. Las variables relacionadas con la creciente modelada permiten expresar las condiciones de frontera, tanto aguas arriba como aguas abajo, proporcionando información sobre los hidrogramas, ya sean de nivel o de caudal, en los extremos del tramo.

El programa cuenta con variables que permiten una modelación más detallada y coherente con la condición real de flujo. Dichas variables permiten simular la existencia de controles hidráulicos como vertederos, compuertas y presas, la ocurrencia de fenómenos como el flujo de lodos o el flujo a través de la llanura de inundación y la presencia de flujos

laterales. Esta última variable fue muy útil en la calibración del modelo, pues permitió representar los aportes de caudal a lo largo del tramo y obtener así resultados coherentes con los registros.

2.2 Hidrógrafas de crecientes

El proceso de selección de las crecientes para la calibración del modelo se inició una vez conocidos los años para los cuales existía información topográfica del cauce del río a su paso por la zona norte del Valle de Aburrá. En primer lugar, se revisaron los registros de los caudales máximos de las estaciones limnigráficas Girardota (RMS-22), El Hatillo (RMS-13), Yarumito (RMS-14) y Gabino (RMS-15), operadas por EPM. Estos registros corresponden a los caudales instantáneos medidos en cada estación durante las crecientes ocurridas entre 1995 y 2003. De la información suministrada se seleccionaron 76 crecientes, de las cuales 62 se hallaban con registro en Girardota y El Hatillo. Revisando los valores de caudal pico de las crecientes se escogieron 14 teniendo en cuenta su comportamiento entre las estaciones.

2.3 Características topográficas del tramo de estudio

Se contó con información topográfica de la totalidad del tramo comprendido entre las estaciones Girardota (RMS-22) y El Hatillo (RMS-13) sólo para el año 2001, mientras que para el subtramo Tasa-jera-puente El Hatillo se encontró información de levantamientos realizados en los años 2001 y 2003. En la tabla 1 se presenta un resumen de las principales características topográficas de estos tramos en los años 2001 y 2003, información que se utilizó en la calibración del modelo.

Al comparar la topografía del cauce para diferentes años, se observa que éste ha sufrido, de forma acelerada, cambios localizados en su configuración, a causa de la erosión y socavación de orillas. Este fenómeno se asocia a los movimientos de masa debidos a la falta de cobertura vegetal y

Tabla 1. Principales características topográficas del tramo de interés en los años 2001 y 2003

| | Anchura (m) | | Diferencia anchuras (m) | | Altura (m) | | Diferencia alturas (m) | | Distancia entre secciones (m) | | Pendiente (%) | |
|------------|-------------|-------|-------------------------|-------|------------|------|------------------------|------|-------------------------------|--------|---------------|------|
| Año | 2001 | 2003 | 2001 | 2003 | 2001 | 2003 | 2001 | 2003 | 2001 | 2003 | 2001 | 2003 |
| Promedio | 40,27 | 43,49 | 16,38 | 24,22 | 4,98 | 5,85 | 1,47 | 1,46 | 356,93 | 345,64 | 0,51 | 0,64 |
| Desviación | 20,58 | 29,83 | 22,10 | 33,41 | 1,38 | 1,43 | 1,14 | 1,20 | 195,17 | 237,12 | 0,72 | 0,87 |

al sobrepastoreo, a desviaciones o intervenciones inapropiadas en los cauces, a la erosión laminar y sedimentación por cambios en la cobertura vegetal y al aumento en la escorrentía superficial causada por la urbanización y la deforestación. Otros cambios importantes en puntos específicos del cauce del río son originados por las crecientes, durante las cuales se perturban las orillas cóncavas en los meandros, y por las explotaciones de material aluvial en el cauce y en las riberas.

En el tramo de estudio se encuentran varios meandros inestables, limitados por curvas bruscas que cambian repentinamente la dirección de flujo. La formación de estas curvas se debe ante todo a los procesos de sedimentación de materiales fino-granulares arrastrados de canteras, a la continua disposición de escombros y basuras en el río, al efecto de las obras de defensa inadecuadas en el régimen del río y a la gran susceptibilidad a la erosión de los flancos del valle, que contribuye a la formación de barras, playas e islotes en el cauce, así como a migración de los meandros.

Lo anterior es muestra de la alta variabilidad de la llanura de inundación del río en el tramo seleccionado, debida al fenómeno de divagación del cauce, tan común en la zona, el cual incrementa el

nivel de riesgo al que se encuentran expuestas las obras de infraestructura y los asentamientos humanos que allí se sitúan.

3. ANÁLISIS DE LAS HIDRÓGRAFAS DE CRECIENTES

A partir de la revisión de los registros de los caudales máximos de las estaciones limnigráficas operadas por EPM en el tramo seleccionado, se escogieron 14 crecientes considerando los valores del caudal máximo y su comportamiento entre Girardota y El Hatillo. Para estas crecientes se analizó la relación entre los caudales máximos de cada estación, revisando si el caudal disminuía progresivamente en las estaciones ubicadas aguas abajo, debido al efecto de almacenamiento del volumen de agua en el canal. Sin embargo, en ocho de las crecientes el caudal máximo era mayor en El Hatillo que en Girardota, en tres casos se conservaba igual, y disminuía en los tres restantes. También se analizó la relación de los caudales base entre las estaciones. En la figura 1 se presentan las hidrógrafas de caudal de algunas de las crecientes, donde se aprecia el aumento de los caudales base y pico en las estaciones situadas aguas abajo.

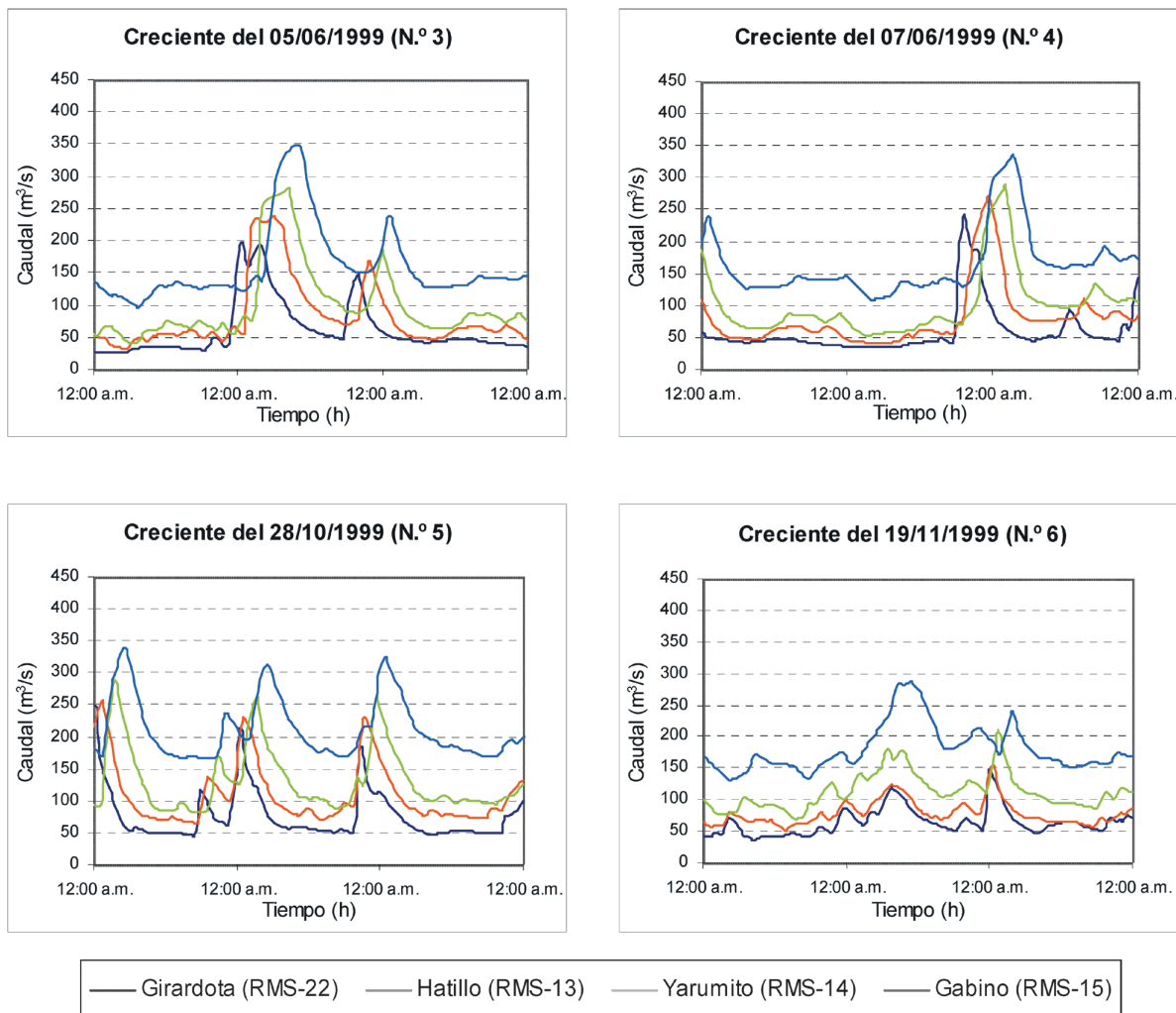
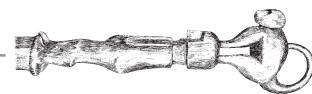


Figura 1. Hidrógrafas de caudal registradas en las cuatro estaciones ubicadas en el tramo de interés y aguas abajo de él

En la zona de estudio, la precipitación promedio anual aumenta de Sur a Norte, desde unos 1.650 mm en Girardota hasta 2.200 mm en Barbosa, por lo que es natural el aumento del caudal base aguas abajo, además de la recepción de las pequeñas corrientes que confluyen al tramo. Entre las estaciones Girardota y El Hatillo se encuentra la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera, cuyo máximo caudal de aporte al río Medellín es del orden de 40 m³/s, que corresponde al caudal descargado cuando la central trabaja con capacidad completa, es decir, cuando operan las cuatro unidades

generadoras. Este caudal de descarga contribuye al incremento del caudal base del río a la altura de la estación El Hatillo, pero no explica el aumento del caudal pico de las crecientes estudiadas, pues como medida preventiva contra la inundación de los predios ubicados aguas abajo, la Central deja de generar durante las crecientes al recibir la señal emitida por sensores de nivel ubicados aguas arriba de la estación Girardota, que permiten detectar el comienzo de crecientes, de manera que durante los eventos estudiados no hay aportes de caudal al río provenientes de la Central.

3.1 Análisis de caudales base y pico

Al reconocer que, en la mayoría de los casos, la creciente en El Hatillo era mayor que en Girardota, lo cual indicaba que en el tramo no se producía la atenuación de la creciente, se pensó que la causa de ello podrían ser los caudales base propios de cada estación, pues en la medida en que estos difieran significativamente entre sí, debe haber aportes de corrientes tributarias o contribuciones de escorrentía superficial directamente al cauce por precipitación. Buscando corroborar esta hipótesis se calcularon los caudales base en las cuatro estaciones limnigráficas tomando los períodos de caudal constante previos a las crecientes y luego se hallaron las diferencias entre caudales base y caudales pico de cada creciente. La tabla 2 resume los valores promedio de caudales base y pico y sus correspondientes desviaciones estándar para cada estación.

Se observa que la diferencia entre el valor promedio de ambos caudales (base y pico) en las

estaciones consideradas no se conserva, es decir, la diferencia de caudales base entre dos estaciones consecutivas no es igual a la diferencia de caudales pico en ese tramo³. Lo anterior corrobora la importancia de los aportes de caudal a lo largo del tramo, que de acuerdo con lo observado proceden del mismo evento de la creciente (lluvias en el tramo) y no de la descarga de tributarios (incluso de la central La Tasajera).

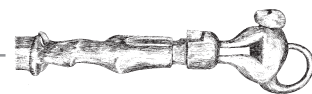
3.2 Análisis de las hidrógrafas de precipitación

Después de haber analizado la relación entre los caudales base y pico, habiéndose encontrado que no había una perfecta correlación entre ellos, se decidió buscar una explicación al aumento del caudal pico en el sentido del flujo estudiando el comportamiento de la precipitación entre Girardota y El Hatillo. Para ello se identificaron las estaciones pluviográficas de la red hidrometeorológica de EPM

Tabla 2. Resumen de caudales base y pico y estadísticos principales

| Caudal | Estación | Distancia (km) | Valor promedio (m ³ /s) | Desviación valor prom. (m ³ /s) | Diferencia (m ³ /s) | Desviación diferencias (m ³ /s) | Incremento (m ³ /s/km) |
|--------|------------|----------------|------------------------------------|--|--------------------------------|--|-----------------------------------|
| base | Girardota | | 32,8 | 13,5 | | | |
| | | 11,8 | | | 27,8 | 11,6 | 2,4 |
| | El Hatillo | | 60,6 | 16,9 | | | |
| | | 14,6 | | | 13,5 | 17,1 | 0,9 |
| | Yarumito | | 76,9 | 23,5 | | | |
| | | 18,6 | | | 48,60 | 28,7 | 2,6 |
| | Gabino | | 122,2 | 33,1 | | | |
| pico | Girardota | | 207,6 | 46,3 | | | |
| | | 11,8 | | | 14,0 | 30,5 | 1,2 |
| | El Hatillo | | 221,6 | 40,3 | | | |
| | | 14,6 | | | 1,26 | 54,9 | 0,1 |
| | Yarumito | | 221,7 | 74,8 | | | |
| | | 18,6 | | | 64,32 | 41,0 | 3,5 |
| | Gabino | | 282,8 | 70,2 | | | |

³ Véase la columna 6: Diferencia promedios (m³/s) de la tabla 2.



más cercanas al tramo, las cuales son: Girardota, Alto de San Andrés, La Tasajera y Barbosa.

En la figura 2 se presentan las hidrógrafas de lluvia y de las crecientes en tiempo real, con el fin de analizar la incidencia de la lluvia en el comportamiento de las crecientes entre Girardota y El Hatillo. Observando esta figura se confirma que la ocurrencia de una lluvia en este tramo afecta el comportamiento de la creciete presentada en Girardota haciendo que aumente al llegar a El Hatillo.

Se confirma que las contribuciones de caudal producidas por la precipitación a lo largo del tramo Girardota-El Hatillo son significativas, lo que permite explicar el aumento de los caudales de crecientes en las secciones aguas abajo. Así, puede decirse que para el tramo estudiado sí se presenta el efecto de atenuación de la creciete por almacenamiento del agua en el canal, pero esa atenuación es contrarrestada por los aportes de caudal que tienen lugar a lo largo del tramo debido a las lluvias allí localizadas.

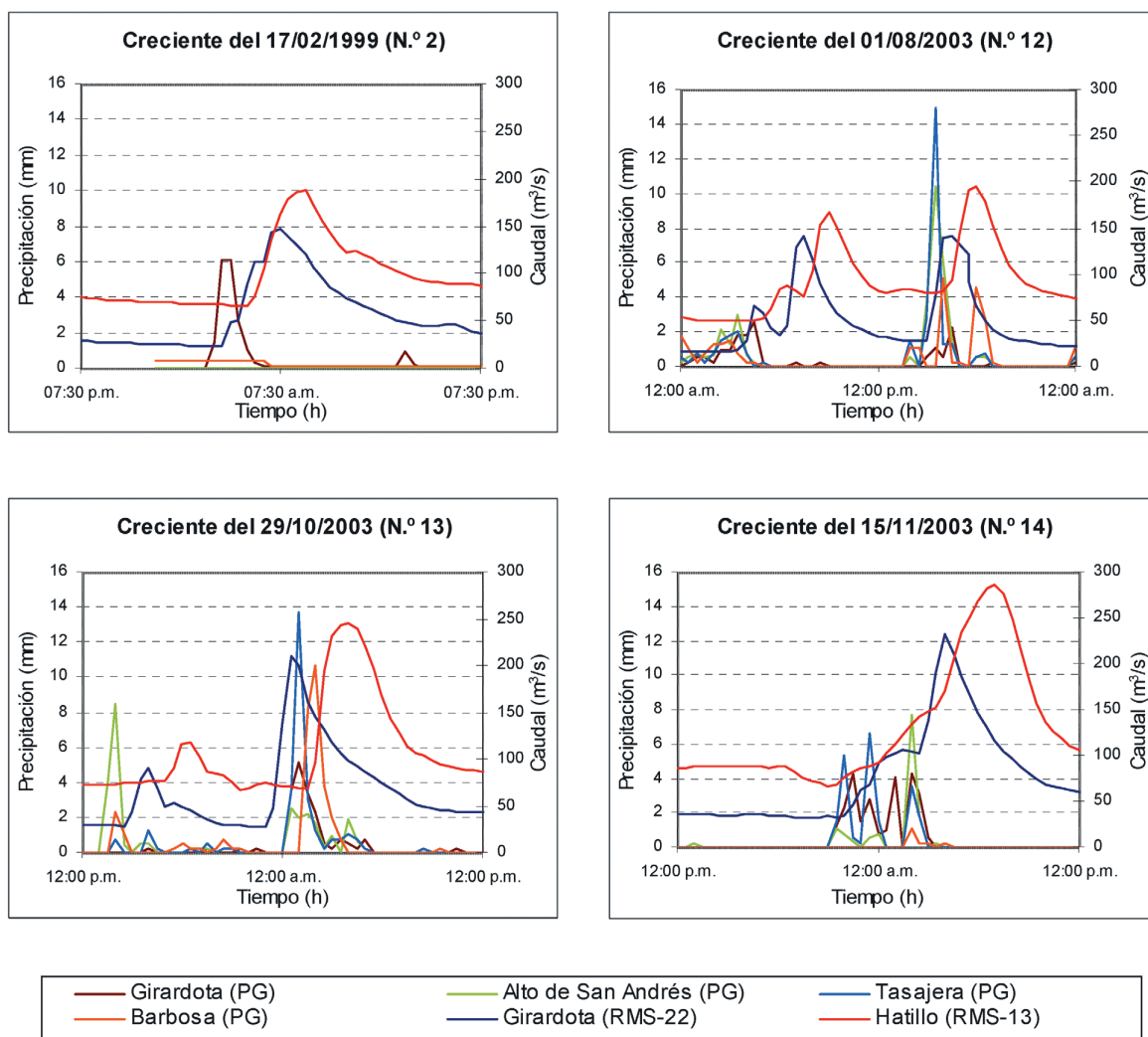


Figura 2. Hidrógrafas de caudal y de precipitación de algunas crecientes registradas en el tramo de estudio

4. METODOLOGÍA

4.1 Modelación preliminar

Una vez recopilada la información topográfica de las secciones definidas (ubicación en el tramo y geometría), las hidrógrafas de las crecientes para transitar y los indicadores hidráulicos que caracterizan el tramo, como son los coeficientes de Manning y de expansión-contracción, se construyó el archivo de datos de entrada del modelo sin calibrar. Los resultados de esta modelación muestran que el caudal de la creciente disminuye en la dirección del flujo, lo que es razonable, si sólo se tiene en cuenta el aporte de caudal de la creciente en la sección de frontera aguas arriba del tramo en el que se efectúa el tránsito, pues la creciente tiene una atenuación debida al volumen de agua que queda almacenado en el canal.

Como se observa en la figura 3, la hidrógrafa en El Hatillo obtenida de esta primera modelación difiere significativamente de la hidrógrafa observada, tanto en la magnitud del caudal pico como en el

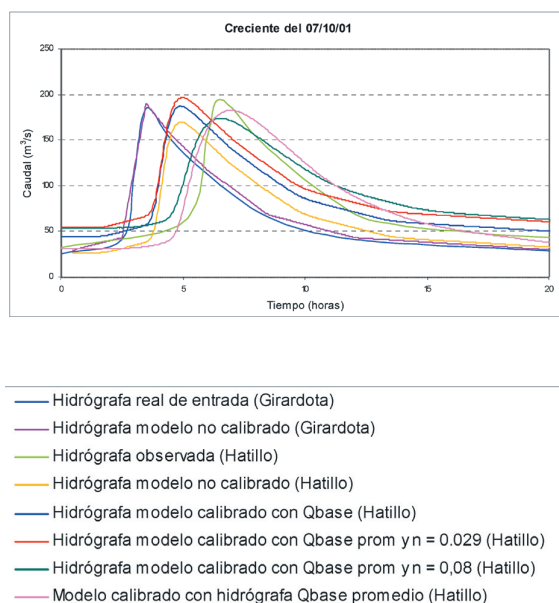


Figura 3. Comparación de las hidrógrafas de caudal para la creciente del 07/10/01 en fronteras del tramo

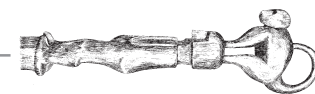
tiempo en que éste ocurre. Para acercar los resultados del modelo a los datos reales era necesario aumentar el valor del caudal pico entregado por el modelo y retardar su ocurrencia, lo que se logró definiendo unos caudales de aporte a lo largo del tramo y variando los coeficientes de rugosidad de Manning dentro de rangos que se consideran aceptables.

4.2 Modelación teniendo en cuenta aportes de caudal

La importancia de los aportes de caudal a lo largo del tramo de interés condujo a tenerlos en cuenta en la modelación. Se calcularon a partir de la diferencia de caudales base entre las estaciones El Hatillo y Girardota para la creciente transitada y el valor promedio obtenido a partir de las 14 crecientes estudiadas. Esa diferencia se dividió por la longitud total del tramo en el que se llevó a cabo el tránsito y luego este valor se multiplicó por la distancia entre secciones para encontrar así el valor del aporte correspondiente a cada subtramo del canal. Surgieron dos opciones de calibración: una utilizando la diferencia de caudales base para la creciente transitada y la otra utilizando la diferencia de caudales base promedio de ambas estaciones. Para esta modelación ese valor se tomó constante, suponiendo flujo permanente de los aportes y, por lo tanto, se obtuvieron hidrógrafas con volúmenes superiores a la hidrógrafa inicial de la creciente (hidrógrafa observada en Girardota, figura 3). Así logró llevarse el caudal pico en El Hatillo hasta un valor muy similar al real, se obtuvo el mejor resultado con la segunda opción de calibración, pero con un aumento en el volumen de la hidrógrafa, lo que hizo que los resultados del modelo se alejaran nuevamente del comportamiento real.

4.3 Calibración del modelo NWS-FLDWA V a partir de caudales de aporte y distribución variable

El aumento del volumen resultante en la hidrógrafa obtenida con la consideración anterior



indicó que los caudales de aporte no debían tomarse constantes en el tiempo. Se propuso, entonces, construir una hidrógrafa de factores para distribuir los aportes en el tiempo, tomando como base la forma de la hidrógrafa resultante en El Hatillo (figura 4). Aplicando estos factores a los caudales laterales homogéneos de los subtramos utilizados en la fase anterior, se obtuvo para cada uno la hidrógrafa de caudal distribuido (figura 5). El volumen de la hidrógrafa entregada por el modelo en El Hatillo se comparó con el de la hidrógrafa real y se modificó la hidrógrafa de factores hasta satisfacer la igualdad entre sus volúmenes. La figura 6 presenta el resultado final de la hidrógrafa en El Hatillo obtenida con la calibración y las hidrógrafas registradas en Girardota y El Hatillo.

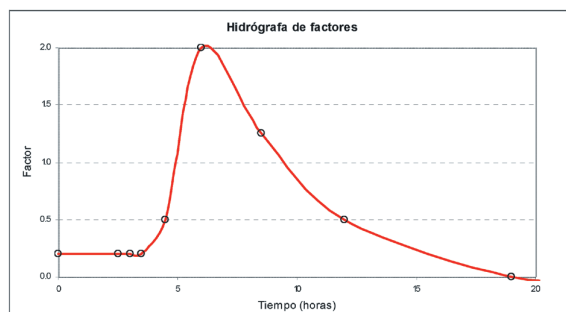


Figura 4. Hidrógrafa de factores para obtener las de los caudales de aporte

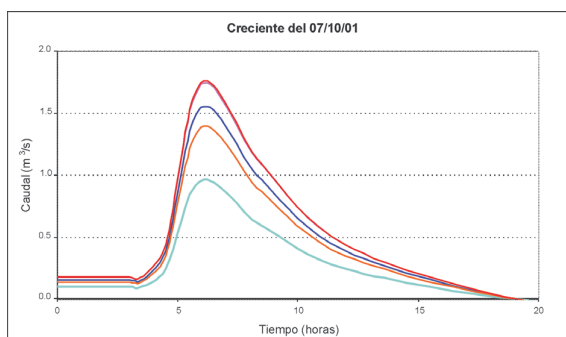


Figura 5. Hidrógrafas de aporte de caudal lateral para los 5 subtramos de Girardota-El Hatillo

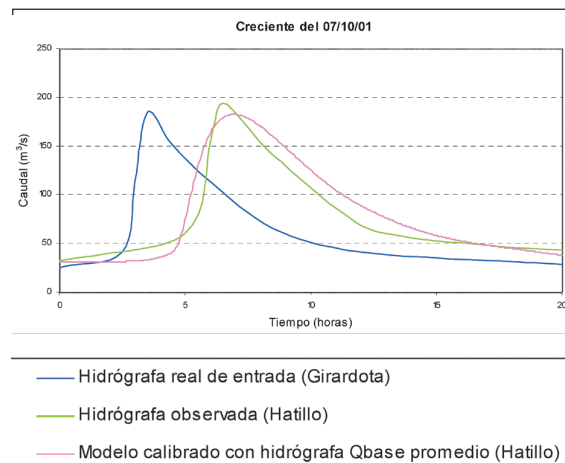


Figura 6. Hidrógrafas de caudales reales en ambos extremos del tramo y del calculado para El Hatillo

4.4 Calibración del modelo NWS-FLDWAV a partir de la variación del coeficiente de rugosidad de Manning (n)

Después de lograr la calibración del modelo en cuanto a la magnitud del caudal, se procedió a calibrarlo en cuanto al tiempo, pues el caudal máximo se alcanzaba primero en la hidrógrafa calculada por el modelo que en la observada. Con el fin de retardar dicho tiempo, se varió el coeficiente de rugosidad de Manning hasta hacer coincidir los tiempos correspondientes al caudal máximo en ambas hidrógrafas. Esto se logró con un valor de n igual a 0,08, pero se obtuvieron dos efectos no deseados: la disminución del valor del caudal máximo de la hidrógrafa y el aumento considerable de su volumen. Una vez más, surgió la necesidad de examinar los volúmenes de las hidrógrafas entregadas por el programa, pues el volumen de la hidrógrafa registrada siempre debe conservarse en los resultados de la modelación. El control de estos volúmenes se logró por medio de la hidrógrafa de factores. El coeficiente n es un dato para la modelación que permite al modelo representar las principales características de las crecientes registradas en el tramo estudiado. El valor empleado en la calibración no coincide con los valores estimados a partir de mediciones directas de caudal, los cuales

son notablemente más bajos y, por tanto, este valor no debe suponerse válido para otras aplicaciones.

4.5 Síntesis

Con la calibración del modelo utilizando las hidrógrafas de caudales de aporte obtenidas de la diferencia de caudales base promedio entre las estaciones Girardota y El Hatillo y con el n de Manning igual a 0,08, se logró un buen acercamiento al valor del caudal pico y al tiempo en que éste ocurre; aunque la forma de la hidrógrafa difiere de la real, el volumen de ambas es muy similar. Estas características de la hidrógrafa calculada en El Hatillo, usando el modelo calibrado de la manera descrita, hacen que se acepte como calibración definitiva y que el procedimiento que a ella condujo se adopte como propuesta de calibración del modelo NWS-FLDWAV. En la figura 7 se presentan en forma esquemática los pasos seguidos para lograr la calibración del modelo, los cuales constituyen la propuesta objeto de este trabajo.

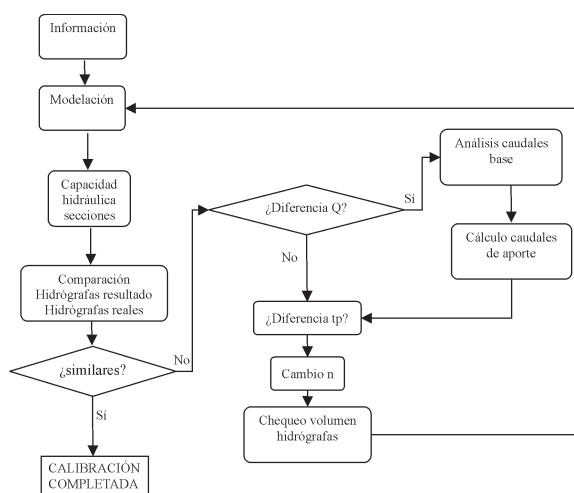


Figura 7. Resumen del procedimiento propuesto para la calibración del modelo

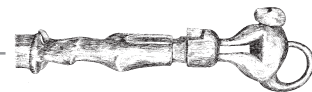
5. CONCLUSIONES

En el análisis del tránsito de crecientes en el río Medellín se encontró que los aportes laterales debidos a la precipitación en el trayecto del tránsito son determinantes en el comportamiento de la creciente aguas abajo, haciendo que la atenuación del caudal pico debida al almacenamiento de volumen de agua en el canal sea inferior al incremento en el caudal ocasionado por los aportes de la escorrentía. Para el caso de estudio se encontró que estos aportes no sólo tienen una distribución espacial característica, asociada con el lugar donde ocurre la lluvia, sino que también presentan una distribución temporal (hidrógrafa de aporte) que debe tenerse en cuenta en la calibración del modelo.

El coeficiente de rugosidad de Manning del río Medellín en el tramo estudiado admite un rango de variación entre 0,027 (valor teórico recomendado en estudios anteriores) y 0,08, que es el coeficiente empleado en la calibración del modelo, pues los resultados del tránsito de la creciente y la descripción del tipo de superficie indican este valor como el adecuado para describir la rugosidad de la superficie cuando ocurre flujo a lo largo de la llanura de inundación en la cual hay buena cobertura vegetal.

6. RECOMENDACIONES

El modelo NWS-FLDWAV ofrece muchas opciones útiles para representar las condiciones reales de flujo en canales naturales, que pueden explorarse buscando adoptar más herramientas para la simulación de este tipo de eventos. Es posible además hacer la integración con Sistemas de Información Geográfica, ya que constituyen una herramienta eficiente para administrar, visualizar y analizar la gran cantidad de información generada por el modelo. Se sugiere lo siguiente:



Profundizar en el estudio de las crecientes en cada estación, con el fin de construir funciones adimensionales (curvas de crecientes adimensionales) que permitan definir un comportamiento característico de las crecientes en cada estación.

Aplicar la metodología de calibración resultado de este trabajo a otras corrientes del Valle de Aburrá o a otros tramos de interés del río Medellín.

Estudiar la variación del coeficiente de rugosidad de Manning con la magnitud de los caudales, definiendo un patrón de comportamiento de este coeficiente en el tramo para cuando se presentan caudales bajos, normales o altos.

Mejorar la reglamentación en cuanto a usos del suelo en las riberas del río Medellín y velar por su cumplimiento.

RECONOCIMIENTOS

Al ingeniero Mauricio Correa y a las Empresas Públicas de Medellín E. S. P., por su disponibilidad para proporcionar oportunamente la información y por su respaldo.

A la Escuela de Ingeniería de Antioquia, por el apoyo económico a este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- ÁLVAREZ RUIZ, John Jairo. Estudio y diseño de las soluciones hidráulicas requeridas en las márgenes y retiros del río Medellín desde el km 12 + 00 hasta el km 18 + 00 aguas abajo en inmediaciones de la descarga de La Tasajera (Parque de las Aguas), siendo el km 0 + 00 el retén del municipio de Copacabana. Medellín: s.n., 1997. 58 p.
- ÁLVAREZ SANTAMARÍA, Lina María. Propuesta de calibración de un modelo para el tránsito de crecientes en un tramo del río Medellín. Estación Girardota-Puente El Hatillo. Envigado, 2005, 240 p. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Escuela de Ingeniería de Antioquia. Ingeniería Civil. Área de Hidráulica.
- ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ. Plan de Ordenamiento Territorial: zona norte. Medellín: L. Vieco, 1986. 269 p.
- CHOW, Ven Te. Hidráulica de canales abiertos. Santafé de Bogotá: McGraw Hill, 1994. 667 p.
- CHOW, Ven Te; MAIDMENT, David R. y MAYS, Larry. Hidrología aplicada. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1994. p. 249-360.
- COLNET Ltda. Estudio de las soluciones hidráulicas requeridas en las márgenes y retiros del río Medellín, desde el km 6 + 00 hasta el km 12 + 00, siendo el km 0 + 00 el retén del municipio de Copacabana. Medellín: s.n., 1997. 51 p.
- COMFENALCO ANTIOQUIA. Servicio de información local Medellín. Disponible en http://www.comfenalcoantioquia.com/sil/info_general.asp. Comfenalco Antioquia, Medellín (Antioquia), 1997-2005. [consultada el 25 de agosto de 2004].
- COMPAÑÍA COLOMBIANA DE CONSULTORES and GRE-ELEY and HANSEN. Río Medellín: flood plain analysis. Medellín: s.n., 1983. 18 p.
- CORREA BOTERO, Francisco Javier. Estudio hidrológico del río Medellín entre el sector del retén (municipio de Copacabana) y la descarga de la central La Tasajera (municipio de Barbosa). Medellín: s.n., 1997. 30 p.
- EL MUNDO. Anuario de Antioquia. Medellín: s.n., 2003. 508 p.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E. S. P. Central La Tasajera: monitoreo de la dinámica del río Medellín entre la descarga de la central y el puente del Hatillo, informe de resultados período 2000-2001. Medellín: EPM, 2002. 18 p.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E. S. P. Central La Tasajera: monitoreo de la dinámica del río Medellín durante el segundo semestre del año 2000. Medellín: EPM, 2000. 21 p.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN E. S. P. Central La Tasajera: monitoreo de la dinámica del río Medellín entre la descarga de la central y el puente del Hatillo, informe de resultados período 2001-2003. Medellín: EPM, 2003. 22 p.
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN. Saneamiento del Río Medellín. Medellín: EPM, 1992. 15 p.
- FREAD D. L. and LEWIS J. M. NWS FLDWAV model: theoretical description and user documentation. Disponible en http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/rvrmech/documentation/fldwav_doc.pdf. National Weather Service, Silver Spring (Maryland), 1998. [Consultada el 31 de agosto de 2004].
- GÓMEZ GIRALDO, Andrés. Seguimiento de la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera: estudio hidráulico: informe final. Medellín: s.n., 1996. 109 p.

- GÓMEZ SIERRA, Paula. Rompimiento de presas de tierra por erosión: análisis y aplicación. Envigado, 1999, 194 p. Trabajo de grado (Ingeniera Ambiental). Escuela de Ingeniería de Antioquia. Ingeniería Ambiental. Área de hidráulica.
- HENAO S., Ana María. Descripción general de la hoya hidrográfica del río Medellín. *En*: Revista Empresas Públicas de Medellín: Monografía del río Medellín. Vol. 3, N° 3 y 4 (jul.-dic.1981); p. 45-66.
- HENAO S., Ana María. El río Medellín en cifras. *En*: Revista Empresas Públicas de Medellín: Monografía del río Medellín. Vol. 3, N° 3 y 4 (jul.-dic.1981); p. 23-42.
- HERMELIN, M. Riesgo geológico en el Valle de Aburrá. *En*: Primera Conferencia sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. (7º: 1984: Medellín). Memorias de la I Conferencia sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá. Medellín: Sociedad Colombiana de Geología, 1984. 11 p.
- INGTAL Ltda. Estudio geomorfológico del río Medellín entre Copacabana (el retén) y la descarga de La Tasajera. Medellín: Instituto para el Manejo Integral de la Cuenca del río Medellín –Mi Río–, 1997. 96 p.
- INSTITUTO PARA EL MANEJO INTEGRAL DE LA CUENCA DEL RÍO MEDELLÍN Y SUS QUEBRADAS AFLUENTES –Mi Río–. Términos de referencia para la formulación del plan de ordenamiento físico de la zona norte del río Medellín (versión preliminar). Medellín: Mi Río, 1994. p. 25.
- INTEGRAL. Desarrollo hidroeléctrico del río Grande: estudio del impacto ambiental de la descarga de la Tasajera, estudio hidrológico. Medellín: s.n., 1993. 14 p.
- INTEGRAL. Desarrollo hidroeléctrico del río Grande: estudio del impacto ambiental de la descarga de la Tasajera, estudio geomorfológico y de dinámica. Medellín: s.n., 1993. 82 p.
- INTEGRAL. Desarrollo hidroeléctrico del río Grande: estudio del impacto ambiental de la descarga de la Tasajera, estudio hidráulico. Medellín: s.n., 1993. 211 p.
- INTEGRAL. Parque de Las Aguas: estudio de niveles de inundación, informe de diseño. Medellín: s.n., 1995. 48 p.
- OROZCO J., Álvaro. Desarrollo histórico. *En*: Revista Empresas Públicas de Medellín: Monografía del río Medellín. Vol. 3, N° 3 y 4 (jul.-dic.1981); p. 13-22.
- PIEDRAHÍTA ECHEVERRI, Javier. Del poblado de San Lorenzo de Aburrá a la parroquia de San José del Poblado. Medellín: Secretaría de Educación y Cultura, 1976. p. 11-47.
- RINCÓN, Leonel; ÁVILA, Luis Orlando y VARGAS, Juan David. Estado actual del corredor del río Medellín: informe final. Medellín: Departamento Administrativo de Planeación Metropolitana del Municipio de Medellín, 1994. 32 p.
- RODRÍGUEZ ARBELÁEZ, Luis Fernando y WILLS TORO, Álvaro. Revisión de la bibliografía sobre tránsito de crecientes. Medellín, 1985, 415 p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad de Minas. Área de Hidráulica.
- RODRÍGUEZ ARBELÁEZ, Luis Fernando. Modelo de Saint Venant aplicado al tránsito de crecientes. Medellín, 1989, 194 p. Trabajo de grado (Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Área de Hidráulica.
- SALAZAR A., Álvaro. Hidrología e hidráulica. *En*: Revista Empresas Públicas de Medellín: Monografía del río Medellín. Vol. 3, N° 3 y 4 (jul.-dic.1981); p. 67-111.
- TECNEC S. A. Estudio y diseño de las soluciones hidráulicas requeridas en las márgenes y retiros del río Medellín, desde el km 6 + 00 hasta el km 12 + 00 aguas abajo, siendo el km 0 + 00 el retén del municipio de Copacabana. Medellín: s.n., 1997. 51 p.
- TECNEC S. A. Estudio y diseño de las soluciones hidráulicas requeridas en las márgenes y retiros del río Medellín, desde el km 0 + 00 hasta el km 6 + 00 aguas abajo, siendo el km 0 + 00 el retén del municipio de Copacabana. Medellín: s.n., 1997. 41p.