

# Efecto de la rugosidad de Gauckler–Manning en el tránsito de caudales en canales de baja pendiente

Edder Alexander Velandia Durán\*

## RESUMEN

Los modelos matemáticos son herramientas computacionales empleadas para simular de manera aproximada el comportamiento de una onda de flujo en un sistema de drenaje. Sobre este particular, en la modelación del flujo en canales, la rugosidad del canal representado por el coeficiente de Gauckler-Manning es un parámetro que interactúa dinámicamente con otros parámetros en el comportamiento del flujo en un sistema de drenaje. En este documento se presenta una modelación de una onda de caudal en un canal natural de baja pendiente haciendo uso de HECRAS 3.1.3, con el objeto de analizar el efecto de la sensibilidad del coeficiente de rugosidad de Gauckler-Manning en el comportamiento de una onda de creciente.

**Palabras clave:** simulación, Gauckler–Manning, canales, crecientes.

## GAUCKLER – MANNING ROUGHNESS EFFECT IN THE FLOW OF LOW SLOPE CHANNELS

### ABSTRACT

The mathematical models are computational tools used to approximately simulate the behavior of a flow wave in a drainage system. In this sense, in the model of a channel flow, the roughness of channel represented by the Gauckler-Manning coefficient is a parameter that dynamically interacts with some other parameters on the behavior of the flow in drainage system. This paper presents a model of a wave of flow in a low slope natural channel by using HECRAS 3.1.3 in order to analyze the effect of the sensitivity of the Gauckler-Manning roughness coefficient in the behavior of a flood.

**Key words:** simulation, Gauckler-Manning, channels, flood.

\* Profesor Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle. Correo electrónico: velandia@lasalle.edu.co  
Fecha de recepción: 18 de octubre de 2007.  
Fecha de aceptación: 25 de enero de 2008.

## INTRODUCCIÓN

Para tratar de definir la importancia y poder del agua, el escritor argentino Jorge Luís Borges nos recuerda algunas palabras del filósofo Heráclito: “La fuerza del agua, asociada a su indetenida capacidad fecundadora, a su constante cambio de estado, a su infinito y femenino ciclo nos sirve de canal conductor para analizar una serie de catástrofes ocasionadas por su dinámica y por el olvido de la metáfora que contiene”. Siguiendo el sentido de estas palabras y las situaciones que cotidianamente se presentan en todas las latitudes, las crecientes en sistemas de drenaje son uno de los fenómenos más recurrentes y destructivos de la naturaleza asociados con el agua.

Una creciente se puede definir como una masa de agua que se desplaza con alta velocidad por un sistema de drenaje como resultado de lluvias intensas, rotura de diques o por el deshielo de grandes volúmenes de nieve. Las crecientes son el resultado de una serie de eventos que se presentan sobre una cuenca en cortos períodos de tiempo pero durante la mayor parte de éste existe un flujo variable que también es relevante dentro del contexto de sistemas de drenaje desde el punto de vista de transporte.

El hombre, al reconocer la necesidad y el riesgo implícito de vivir cerca de corrientes de agua, ha pensado desde tiempos remotos en cómo poder minimizar su vulnerabilidad ante los diferentes fenómenos que se propagan en este tipo de sistemas. Para ello ha desarrollado diferentes tareas como: identificar los tipos de riesgo y niveles de amenaza, caracterizar los sistemas de drenaje, implementar sistemas de monitoreo y registro, diseñar planes de contingencia, crear e implementar estructuras hidráulicas, estudiar el comportamiento del flujo, efectos y respuestas del sistema en el tiempo y, de manera especial, el diseño de modelos matemáticos que tienen por objeto simular de manera aproximada el comportamiento de una onda de flujo a superficie libre aguas abajo de un punto de observación.

Sobre este particular, el comportamiento del flujo en canales es un fenómeno de complejo análisis debido a la variedad de situaciones que pueden darse a lugar en un sistema de drenaje. En este sentido, un flujo a superficie libre por un sistema de conducción, cualquiera que sea, está sometido a la acción de diversas condiciones propias del sistema de drenaje que varían en el espacio y en el tiempo. Dicha variabilidad se hace más evidente con la presencia de eventos puntuales o distribuidos en las zonas de influencia de la cuenca y/o por la acción planificada o no planificada del hombre sobre el área tributaria o el mismo cauce. En hidráulica de canales, especialmente en sistemas de baja pendiente, el estudio del transporte de caudales es clave para poder establecer la capacidad hidráulica real del sistema, el efecto de una onda de flujo aguas abajo de la zona de la cuenca en donde se desarrolla y las posibles estrategias de mitigación o de alerta con base a las características del drenaje. Con relación a este último particular, un cauce se define de baja pendiente para un desnivel menor al 10% (Saldarriaga, 2005).

## MODELACIÓN DEL FLUJO EN CANALES

Un modelo es un sistema que simula un entorno real, mediante la entrada de información, la cual es procesada para generar resultados que se presentan en forma adecuada para su interpretación. Dooge (1967) definió un sistema como “cualquier estructura, instrumento, esquema o procedimiento, real o abstracto, que interrelaciona en una referencia dada de tiempo, una entrada, causa o estímulo, de materia, energía o información, y una salida, efecto o respuesta de información, energía o materia”.

En la actualidad, los modelos existentes que permiten simular el comportamiento de crecientes se estructuran bajo conceptos matemáticos que plantean soluciones casi siempre idealizadas bajo simplificaciones importantes de las ecuaciones que gobiernan

un fenómeno y modelos físicos para la modelación a escala de fenómenos específicos. En las dos últimas décadas, los modelos matemáticos han tenido un desarrollo notable, son fácilmente utilizables pero tienden a no ser certeros cuando se aplican a situaciones donde existen limitaciones en el conocimiento de las variables involucradas (Saldarriaga, 2005).

Sobre este particular, la simulación es una estrategia empleada en la modelación para dar una respuesta a la pregunta: ¿Qué pasa si...? Bajo este concepto se puede observar el comportamiento de un sistema para diversas combinaciones de las variables de entrada con relación al tiempo, contemplando cambios de estado y análisis determinísticos o estocásticos. Con base a la caracterización de un sistema propuesta por Chow (1982), un río o conducto para el que se analice un tránsito de crecientes en condiciones normales de operación se considera como un sistema abierto, complejo, dinámico, causal, no lineal, no estacionario, distribuido y continuo.

Para el análisis de las crecientes por onda dinámica a través de modelos matemáticos se emplean como base los planteamientos propuestos en el siglo XIX por los primeros investigadores modernos de este campo como Laplace, Lagrange y Saint Venant. Este último con su publicación denominada *Teoría del flujo no permanente en el agua con aplicaciones a flujos de ríos y a propagación de mareas en canales de ríos* (1871), se convertiría en uno de los padres de este campo de investigación (Izbash & Khaldre, 1970).

Actualmente, los modelos matemáticos se clasifican de acuerdo a su agregación espacial en agregados y distribuidos. Los modelos agregados (hidrológicos) permiten determinar los niveles y caudales en función del tiempo para un punto específico de un sistema, con base a hidrogramas conocidos aguas arriba (HW). Estos modelos se basan en la solución de la ecuación de continuidad acompañada por una ecuación

que relaciona la salida de masa de un volumen de control con la masa almacenada en éste.

En cuanto a los modelos distribuidos (hidráulicos), estos permiten determinar los niveles y caudales en un tramo de cauce en función del tiempo y del espacio. Este tipo de modelos se basan en la solución simultánea de la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de momentum lineal. En este sentido, las ecuaciones (1) y (2) representan la ecuación de balance de masa y la ecuación conservativa de continuidad para canales, la ecuación (3) corresponde a la ecuación no conservativa de continuidad y la (4) representa la ecuación de conservación de momentum sin considerar entradas o salidas longitudinales de agua en el tramo de análisis (Saldarriaga, 2005).

$$MA = ME - MS \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

$$y \frac{\partial Vel}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

$$TIM_x = \rho dx \left[ \beta v_x \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} \right] \tag{4}$$

Ahora, teniendo en cuenta las anteriores ecuaciones y solucionando bajo un análisis de fuerzas en el sentido x se obtiene la ecuación (5) conocida como la ecuación conservativa para el tránsito hidráulico de crecientes o también conocida como la ecuación completa de St. Venant.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \tag{5}$$

Por medio de esta ecuación, los modelos hidráulicos de tránsito de crecientes se pueden clasificar en: onda cinemática al descartar las fuerzas de inercia y gradiente de presión; onda difusiva al descartar el término de aceleración inercial y al mismo tiempo considerar los términos de gravedad, fricción y gra-

diente de presión; onda dinámica al considerar plenamente todos los términos de la ecuación completa de St. Venant: inercia, presión, gravedad y fricción. En esta clasificación es evidente la importancia del componente de fricción en el análisis matemático al ser este término el único que se encuentra en todos los tipos de modelos.

Según la anterior clasificación de los modelos hidráulicos y las condiciones involucradas en cada sistema de drenaje particular, se ha establecido que el comportamiento de una onda de flujo en sistemas de baja pendiente debe ser representado a través de un análisis de onda dinámica mientras que para los sistemas con altas pendientes pueden emplearse modelos más simples como los modelos de onda cinemática. De acuerdo con este planteamiento, es claro que al tratar de simular el movimiento de un flujo en sistema de baja pendiente aumenta la complejidad del análisis en busca de una mejor aproximación a la realidad más aún cuando se tienen sistemas naturales en donde las condiciones geomorfológicas del cauce definen un patrón cambiante del sistema de drenaje con el tiempo y el espacio.

En la actualidad existen otros modelos para el estudio de tránsito de caudales en sistemas de drenaje basados en análisis multidimensional y condiciones variables, los cuales desarrollan un análisis más complejo de las variables involucradas e integran, en algunas ocasiones, procesos de transporte de sedimentos y calidad de agua. Estos modelos son costosos y requieren más información base pero son aún más aproximados en comparación con los otros modelos.

## COEFICIENTE DE GAUCKLER-MANNING

En ríos, el tránsito de ondas es un fenómeno complejo debido a diferentes factores: uniones y tributarios,

variaciones en la sección transversal, meandros, valles de inundación, resistencia tanto con la profundidad del flujo como con la localización a lo largo del cauce, vegetación, obstáculos naturales o impuestos, etc. En este sentido, la solución de la ecuación completa de Saint Venant proporciona una buena aproximación del movimiento de ondas de flujo a superficie libre para una amplia variedad de sistemas de drenaje.

Según Saldarriaga (2005) las simplificaciones que se deben tener en cuenta al momento de utilizar muchos de los modelos matemáticos de solución de las ecuaciones completas de Saint Venant son: flujo unidimensional; el lecho debe ser no erosionable; se debe mantener una distribución hidrostática de presiones; las variaciones de velocidad tanto en la vertical como transversalmente deben ser pequeñas; el agua se considera incomprensible; el eje longitudinal del canal o dirección principal del flujo debe ser aproximadamente recto; se deben poder aplicar las ecuaciones de resistencia fluida – ecuación de Gauckler-Manning. En este sentido, la componente de fuerzas de fricción, representada por la ecuación de Gauckler-Manning (6), es útil en el análisis de flujo uniforme y permanente en canales de alta pendiente.

$$V = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S^{1/2} \quad (6)$$

En la ecuación de Gauckler-Manning, “n” es el coeficiente de fricción definido empíricamente que depende únicamente de la rugosidad superficial del canal; sin embargo, el alineamiento del canal, geomorfología y sedimentos así como otros ajenos al canal como plantas en las orillas y en la superficie del agua afectan su valor. Este coeficiente fue propuesto por Philippe Gauckler en 1867 con base a un análisis de los datos experimentales encontrados por Darcy y Bazin. Pero fue hasta 1890 cuando Robert Manning lo incorporó en la ecuación (6) (Chanson, 2002).

En cuanto a la ecuación de Saint Venant si bien no es evidente la influencia del factor de rugosidad de Gauckler-Manning en el tránsito de caudales, su efecto se encuentra implícito en las fuerzas involucradas en el análisis. En este sentido, es evidente que el coeficiente de rugosidad del canal es uno de los parámetros que al variar en el tiempo o en la distancia generan cambios en el tránsito de ondas de flujo en un sistema de drenaje indistintamente de los posibles cambios en las demás variables del sistema. Algunos procedimientos para definir el coeficiente de rugosidad corresponden al uso de tablas como la publicada por el U.S Department of Agriculture (1955), Chow (1959), Bray (1979), entre otros. En este sentido, los coeficientes de rugosidad varían entre un amplio rango de valores generalmente entre 0,006 y 0,080.

### **MODELACIÓN FLUJO NO PERMANENTE EN UN CANAL DE BAJA PENDIENTE PARA DIFERENTES VALORES DE “N”**

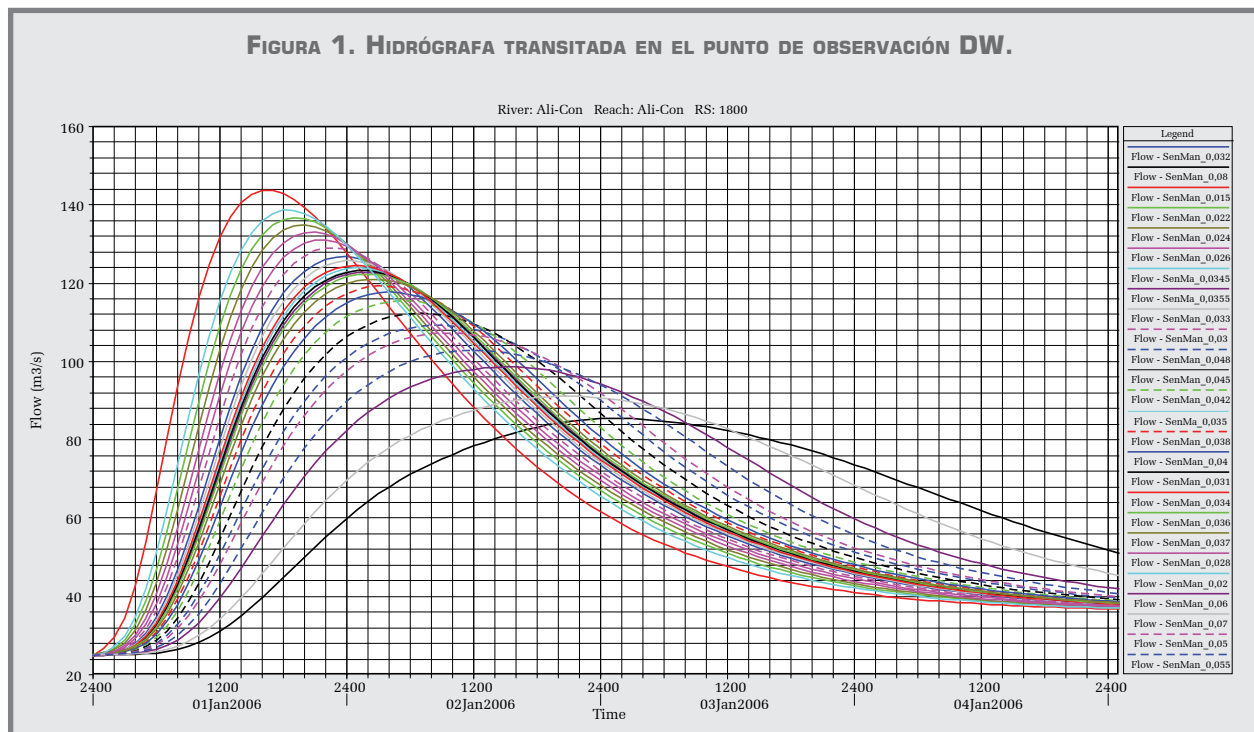
Con objeto de estudiar la sensibilidad del tránsito de crecientes en canales naturales de baja pendiente para cambios en el coeficiente de rugosidad de Guckler-Manning se realizaron diferentes simulaciones en HECRAS 3.1.3<sup>1</sup> bajo flujo no permanente y con 25 variaciones del coeficiente de rugosidad para una condición de control fija aguas abajo. Si bien se reconocen otros parámetros con influencia en el tránsito de una onda de creciente tales como: la condición de control aguas abajo, rugosidad en las zonas altas, el número de secciones por kilómetro (relación de Courant), la descargas laterales, los intervalos de tiempo en la simulación y la variación de caudales de los tributarios, estos son constantes para dejar libre el valor de rugosidad.

Para el estudio de la sensibilidad del valor del coeficiente de rugosidad en el tránsito de caudales se utilizan las secciones de la cuenca media tramo La Conejera - Alicachín, Río Bogotá, Colombia (HMV, 2003). Este tramo de río se caracteriza por pendientes entre  $10^{-5}$  y  $10^{-4}$  m/m, sección irregular trapezoidal y variaciones de fondo debidas a su dinámica geomorfológica. Por otra parte, si bien en el tramo de observación existen no menos de 15 tributarios, puentes, plantas acuáticas, entre otras situaciones, sólo se considera para el análisis planteado la información topográfica del canal. Es importante aclarar que el objeto de las modelaciones es mostrar la sensibilidad del valor de la rugosidad en el transporte de ondas de caudal en un río no intervenido de baja pendiente más no presentar resultados ni conclusiones relacionadas con el sistema de drenaje en su total magnitud. Para el estudio se utiliza como base una hidrógrafa de creciente ingresada en el punto aguas arriba del tramo de drenaje (La Conejera).

Con base en las simulaciones presentadas por Velandia (2006), para variaciones del coeficiente de Gauckler-Manning del canal principal entre valores de 0,015 - 0,08 y bajo las condiciones particulares del sistema de drenaje se obtuvo que:

Los tiempos de arribo y la magnitud de los caudales de la hidrógrafa de salida (DW) se ven afectados de manera importante al variar el coeficiente de rugosidad en el canal. Al observar los resultados de la simulación se encuentra que para valores de rugosidad del canal bajos se observa un movimiento rápido de la onda y una reducida amortiguación del pico de la onda de creciente, mientras que, al aumentar el valor de la rugosidad se encuentra un aumento considerable del amortiguamiento del pico de la creciente y un retraso muy superior a los tiempos de arribo encontrados para las hidrógrafas de salida para canales menos rugosos.

1 US Army Corps Engineers River Analysis System (2004) desarrollado por el Hydrologic engineering Center (HEC) adscrito al USACE (US Army Corps Engineering). Herramienta que permite simular el comportamiento del flujo en canales en una dimensión bajo condiciones de flujo permanente y no permanente y diferentes escenarios.



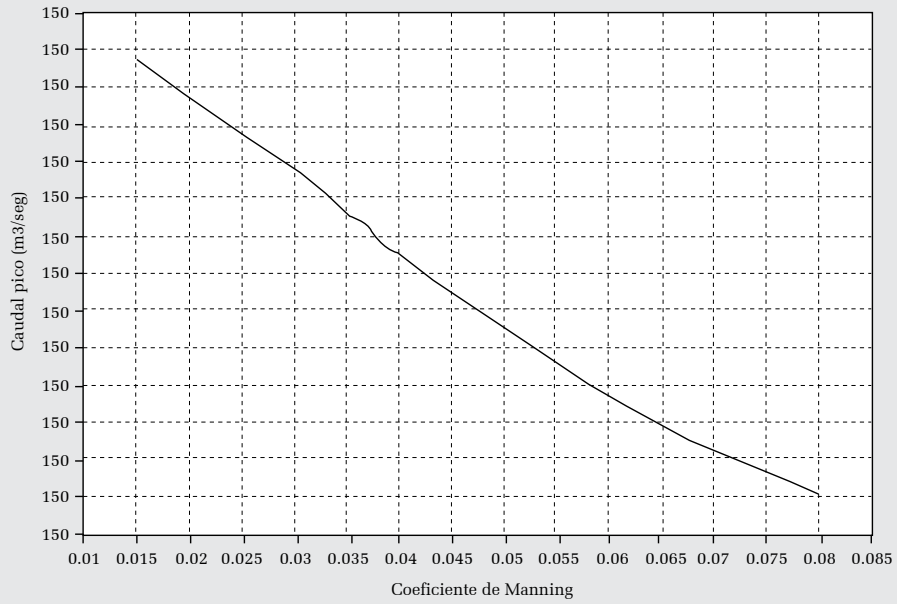
Al graficar caudal pico de la creciente aguas abajo y los valores de la rugosidad asociada (ver Figura 2) se encuentra una relación inversa entre estos parámetros y la incidencia de los valores de la rugosidad en el amortiguamiento de una onda de creciente en un canal natural de baja pendiente. Con base en esta observación se encuentra que al variar el coeficiente de rugosidad de 0,02 a un valor de 0,08 se reduce cerca de un 40% el caudal pico de la onda de creciente observada aguas abajo para una condición de caudales base promedio pre-creciente.

En cuanto a los tiempos de arribo del pico de la onda en el punto de observación aguas abajo se observa que para un canal de poca rugosidad el tiempo de arribo del pico de la creciente se presenta mucho más rápido que el encontrado para canales con rugosidades más altas. Para el caso, al variar la rugosidad del canal de 0,02 a 0,08 el tiempo de arribo del caudal pico se incrementa en casi tres veces para el sistema de mayor rugosidad con relación al sistema con menor rugosidad. En este mismo sentido, al observar la Figura 1 se pueden apreciar visualmente los cambios de forma de las ondas de creciente en función de las variaciones

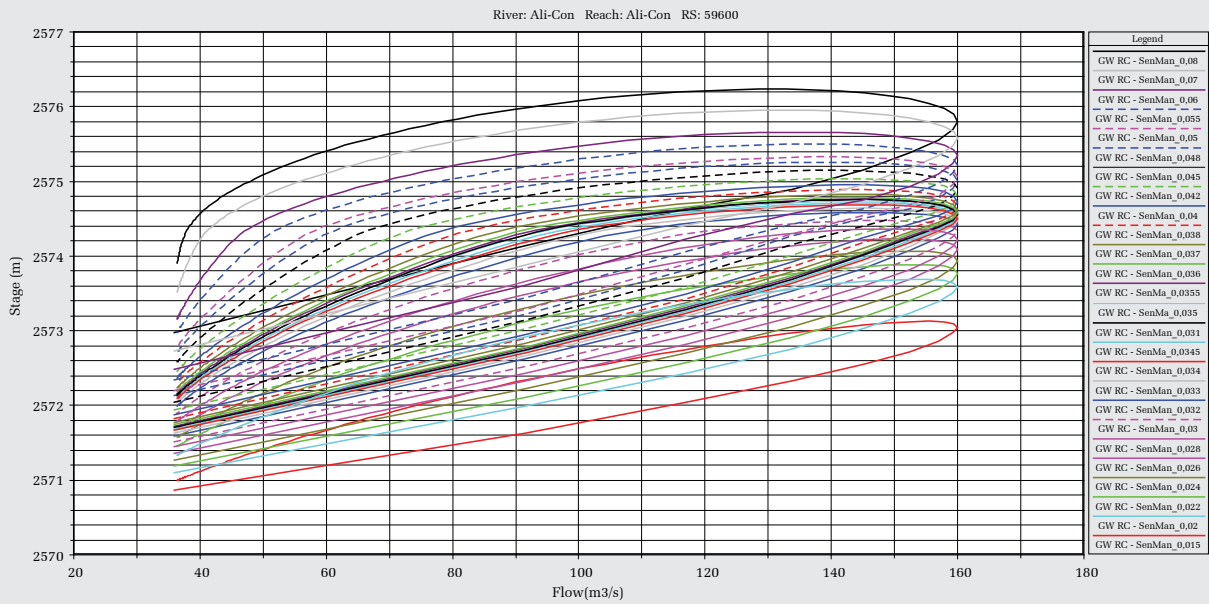
de la rugosidad del canal principal, siendo para los canales más rugosos, ondas más achatadas que las observadas para canales con rugosidades bajas del canal principal. La anterior apreciación, muestra la capacidad de amortiguamiento de una creciente en un canal en función de la rugosidad del canal.

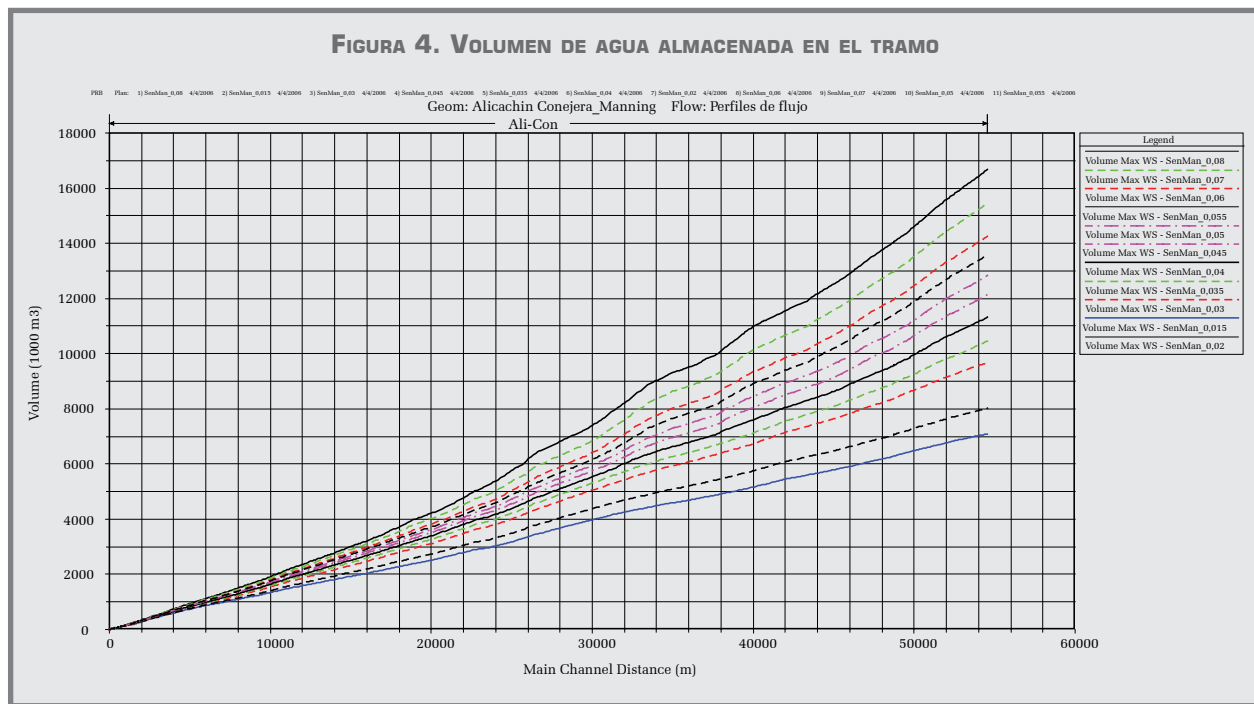
Otro aspecto relevante encontrado tras las simulaciones es el comportamiento del loop de creciente en el punto de observación aguas arriba del sistema (HW). El loop mostrado para cada simulación representa el comportamiento de los niveles en el punto de observación con respecto a los cambios de caudal generados por el tránsito de la onda de creciente en el sistema de drenaje. En su fase inicial, inicio de la creciente se observa la parte inferior de la curva mientras que para la fase posterior al pico de la creciente se observa la parte superior de la curva. De igual forma, para rugosidades bajas se encuentran pequeños cambios en los niveles y por ende loops más cerrados en comparación con los resultados para canales con rugosidades más altas; para estos casos los cambios de nivel son notables y el comportamiento del loop es más evidente.

**FIGURA 2. EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING CON RESPECTO AL CAUDAL PICO DW**



**FIGURA 3. LOOP DE CRECIENTE Y DECRECIENTE EN EL PUNTO DE OBSERVACIÓN HW**





En la Figura 4 se puede observar que para cambios en el valor de la rugosidad del canal principal es evidente la variación del almacenamiento en el tramo observado. En este sentido, para canales con rugosidades bajas se observa un almacenamiento menor al encontrado para el mismo drenaje con rugosidades más altas. Con base en lo anterior, se puede establecer que al aumentar la rugosidad del canal se aumenta su capacidad de almacenamiento.

Al graficar la relación entre el almacenamiento en el tramo y los valores de la rugosidad de Gauckler-Manning se observa una relación ascendente positiva entre estos parámetros (ver Figura 5). En este sentido, al aumentar la rugosidad existe un mayor almacenamiento que sigue un comportamiento cuasi lineal. Para el caso, una variación de 0,005 del coeficiente de rugosidad del canal principal da lugar a una variación en el almacenamiento del tramo de aproximadamente 1 millón de m<sup>3</sup> respectivamente.

## CONCLUSIONES

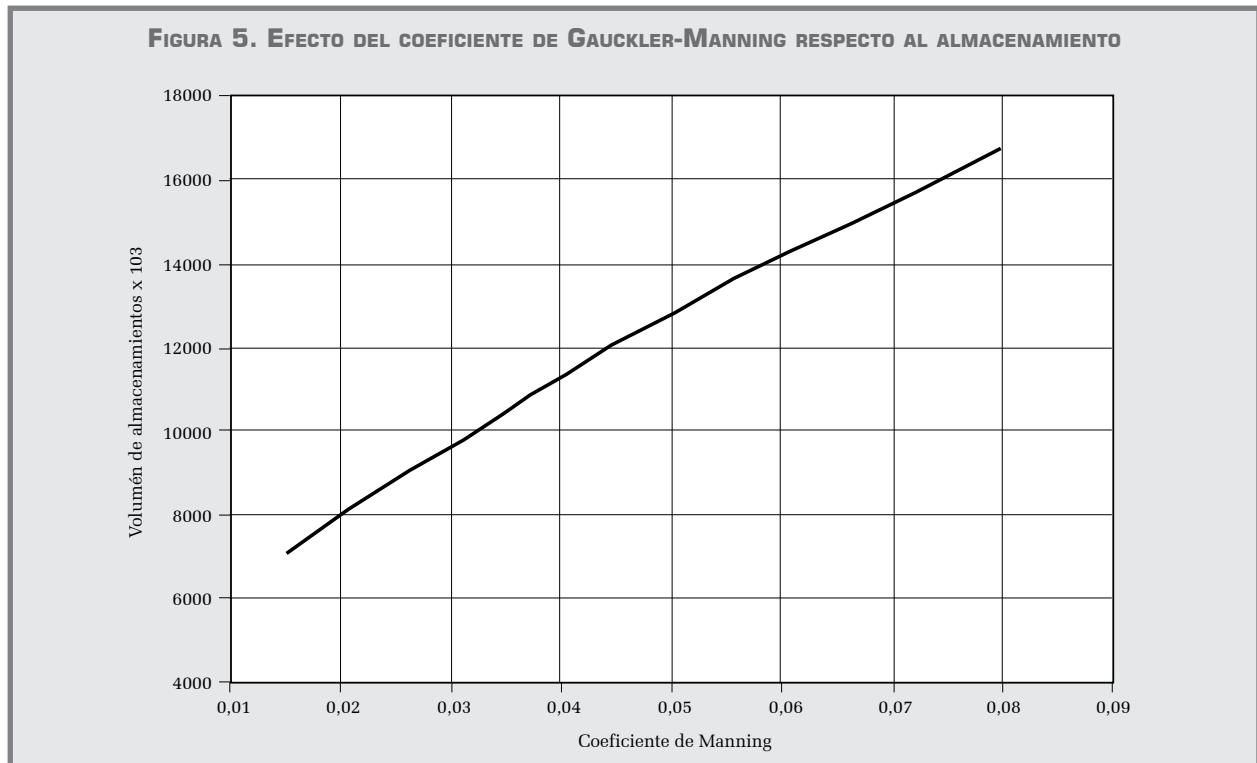
La rugosidad de un canal definido por el coeficiente de rugosidad de Gauckler-Manning es un parámetro que influye fuertemente en la capacidad de amortiguamiento de una onda de creciente en sistemas de drenaje de baja pendiente. Por tal motivo, al momento de conceptualizar proyectos de intervención de sistemas de drenaje es importante definir el efecto en el transporte de caudales aguas abajo de la zona intervenida, aún más cuando la intervención contempla la rectificación de canales y generación de nuevas superficies en sistemas de baja pendiente.

Cualquiera que sea el modelo aplicado necesita ser calibrado, verificado y analizado continuamente con información de campo. En este sentido, entre los diferentes parámetros posibles a calibrar, el valor del coeficiente de rugosidad de Gauckler-Manning en el canal principal es un aspecto definitivo para permitir a los modelos una mayor representatividad y aproximación a la realidad. Sobre este particular, es importante destacar que la rugosidad de un sistema



de drenaje puede variar con el tiempo y puede no ser uniforme en toda la longitud de un tramo de observación debido a la dinámica propia de los sistemas

de drenaje, por tanto, las labores de calibración y verificación deben ser continuas.



Si bien existen otras variables involucradas en el amortiguamiento de una onda de creciente, las rugosidades altas del canal principal contribuyen de manera importante en el amortiguamiento de los picos de caudal de las crecientes y en los retrasos de los tiempos de arribo de las mismas aguas abajo (DW) de un punto de observación. De igual forma, variaciones del coeficiente de Gauckler-Manning generan cambios notables en el comportamiento hidráulico de una onda de creciente en toda la longitud del sistema de drenaje, entre los cuales se destacan los loops en el punto de control HW, la capacidad de almacenamiento y los perfiles de flujo: pendientes hidráulicas, velocidades, profundidades y regímenes del flujo.

En cuanto a los modelos matemáticos es necesario conocer las simplificaciones y requerimientos de cada modelo, las variables involucradas, la información necesaria para simular e identificar posibles inestabilidades no reconocidas por el sistema de calidad. En este sentido, al ser un modelo matemático una aproximación de las condiciones que se dan lugar tras un fenómeno en la naturaleza, es imprescindible que un usuario sea consciente de las limitantes a la hora de ser implementados y entregar resultados. En este sentido, el diseño de canales para construcción de sistemas de drenaje o para rectificación y adecuación de éstos debe desarrollarse necesariamente un análisis para condiciones de flujo no permanente que permitan definir las condiciones operativas reales de un drenaje y los efectos aguas abajo de las zonas de intervención.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chanson, H. *Hidráulica del Flujo en Canales Abiertos*. Australia: McGraw Hill, 2002.
- Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw Hill, 1998.
- Izbash and Khaldre. *Hydraulics of river channel closure*. Inglaterra. 1970.
- Saldarriaga, J. *Notas Modelación en hidráulica*. Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.
- USACE. HECRAS 3.1.3®. US. 2005.
- Velandia, E. *Marco Metodológico para la Modelación Hidráulica e Hidrológica de Crecientes en Ríos*. Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.
- Bray, D. "Estimating average velocity in gravel-bed rivers". *Journal the Hydraulics Division* 105. 9. (1979): 1103 - 1122.
- Scobey, F. "The Flow of Water in Irrigation and Similar Canals". *Technical Bulletin* 652. 1939.
- HMV. "Diseño de obras para la protección contra inundaciones del Río Bogotá, sector Alicachín – La Conejera". Bogotá: HMV Ingenieros, 2003.