

# MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL FLUJO EN GRANDES RÍOS

A. Bateman, R. Sosa y B. Marín-Esteve

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos GITS-UPC. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.  
Universidad Politécnica de Cataluña. Jordi Girona 31-34 Barcelona-639217557  
E-mail: allen.bateman@upc.edu.

## Resumen

Para la modelación de un cauce se requiere el conocimiento del coeficiente de resistencia al flujo. Este coeficiente permite conocer la relación existente entre la velocidad media y el caudal. Además, permite conocer el estado turbulento del flujo y por lo tanto conocer el transporte de sedimentos, tanto de fondo como de suspensión. Se presenta la metodología y resultados de la valoración del coeficiente de resistencia al flujo en varios ríos colombianos. Esta idea se comenzó a implantar hace 10 años en el río Patía situado en el sur occidente de Colombia, pero luego se ha aplicado al río Meta (centro-este colombiano) y río Magdalena (centro de Colombia).

## Introducción

Normalmente los valores del coeficiente de resistencia al flujo se extraen de tablas, fotos, y algunas sugerencias de autores o por el conocimiento que pasa de boca en boca. Muchas veces los informes de estudios de ingeniería tratan este tema bastante a la ligera y le dan algunas breves páginas para la estimación del mismo. Sin embargo, la importancia del coeficiente de resistencia al flujo, como el conocido coeficiente de Manning, es de gran relevancia para entender el flujo en el río, calibrar un modelo hidráulico, como también valorar la capacidad de transporte sólido de un flujo. Todos elementos están interrelacionados entre sí, si uno fija mal el valor del coeficiente el resto de cálculos quedan completamente desfasados de la realidad. Utilizando algunas formulaciones básicas se puede determinar con bastante precisión este valor del Manning, pero también junto con él, se estima la pendiente motriz y una estimación de la rugosidad absoluta.

## Metodología

En un flujo de un cauce se puede suponer que la distribución de velocidad en una vertical en la zona media del cauce sigue aproximadamente una distribución logarítmica o distribución de Von Karman.

$$\frac{u}{u^*} = \frac{1}{k} \ln \left( 30 \frac{z}{k_s} \right) \quad [1]$$

En donde  $u$  es la velocidad a la altura  $z$  del fondo,  $k_s$  la rugosidad equivalente,  $k$  la constante universal de Karman Prandtl e igual 0.41. Esta ley está provocada por una distribución de tensiones de Reynolds lineal y que se puede escribir de la forma siguiente:

$$\tau_b = \gamma R_h S = \gamma h S_f \quad [2]$$

En donde  $\gamma$  es el peso específico del agua,  $h$  la profundidad de flujo y  $S_f$  la pendiente motriz. A su vez la tensión  $\tau_o$  queda definida por la denominada velocidad de corte  $u^*$ , expresada como:

$$\tau_b = \rho u_*^2 \quad [3]$$

En una sección de un cauce se toma un perfil de velocidades, por cualquier método, se obtiene un perfil experimental de las mismas. Mediante el análisis de las diferencias entre las velocidades medidas y las obtenidas teóricamente por la función [1], mediante un análisis de mínimos cuadrados se puede obtener un valor optimizado de los parámetros que intervienen en la función de optimización siguiente para,  $U^*$  y  $K_s$ :

$$F(u^*, k_s) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i}{u^*} - \frac{1}{k} \ln \left( 30 \frac{z_i}{k_s} \right) \right)^2 (\forall z_i, u_i) \quad [4]$$

Una vez minimizada la función [4] y obtenidos la velocidad de corte y la altura de fricción,  $U^*$  y  $K_s$ , respectivamente. Es posible establecer el valor de la pendiente motriz, ya que la tensión de fondo se establece por la ecuación [3], conocida la profundidad de agua  $h$ . El coeficiente de Manning se puede establecer a través de Manning Strickler o bien la ecuación de Keulegan. El valor de  $K_s$  depende directamente de las formas de fondo, así el coeficiente de Manning vendrá determinado por estas formas de fondo y por supuesto por la fricción de piel. Esto implica que el coeficiente de Manning cambiará bastante con el caudal líquido ya que para cada caudal líquido establecido existen unas formas de fondo de tamaño definido. A través de esta sencilla metodología se puede llegar a conocer en una zona del cauce y para un determinado caudal y a todo lo largo del mismo el coeficiente de Manning y poder así calibrar un modelo numérico.

## Zona de estudio

La zona de estudio se observa en la Figura 1. Todos los cauces pertenecen a Colombia, se incluye también los resultados de la Bahía de Buenaventura ya que se consideran relevantes.

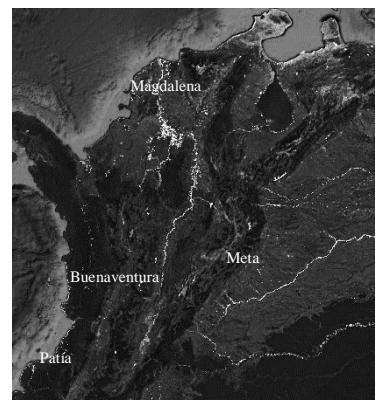


Figura 1. -Situación de las zonas de estudio en Colombia.

## Descripción breve de los cauces

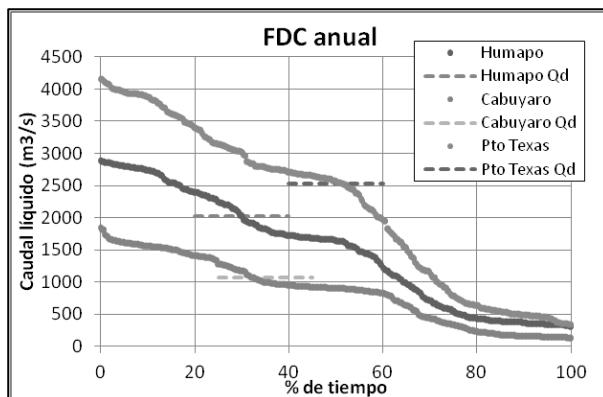
*El río Patía.* Es un cauce sinuoso de arenas con un caudal de  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$  de valor medio, en su tramo final tiene un diámetro de grano fino del orden de  $D_{50} = 1.5 \text{ mm}$ . Las formulaciones convencionales dan para este cauce un coeficiente de Manning de 0.028, pero realmente debido a la formación de dunas para

un caudal de 1800 m<sup>3</sup>/s la calibración de los perfiles pondera un valor de 0.037. Valor más acorde con la situación de este y otros cauces similares.



**Figura 2.-** Río Patía, rico en manglares en sus márgenes.

**El río Meta.** En la zona de estudio es un cauce semi trenzado con una hidrología bimodal, caudales altos de 3000 m<sup>3</sup>/s y bajos de 400 m<sup>3</sup>/s. Se analizó el coeficiente de Manning a lo largo de 100 km junto con las pendientes motrices dando unos resultados adecuados a las mediciones de cotas realizadas.



En este caso se utilizó la división de las tensiones de Einstein-Barbarossa para determinar el coeficiente de Manning adecuado a cada caudal. Esto permitió además confirmar la relación caudal-calado en tres secciones de aforo diferentes.



**Figura 2.-** Río Meta, con grandes acumulaciones de arena fina.

**El río Magdalena.** El estudio del río Magdalena abarca los últimos 40 km antes de la desembocadura, estudio que actualmente está en ejecución, pero ya se tienen los primeros valores del coeficiente de Manning. Además, en este caso se tiene una batimetría de alta calidad en la que se pueden medir las alturas y longitudes de dunas y correlacionarlas con los coeficientes de Manning registrados.

**Bahía Buenaventura.** En la Bahía de Buenaventura se valoraron los coeficientes de Manning, en este caso se obtuvo un resultado de gran interés. La Bahía de Buenaventura está sometida a mareas de gran barido, es decir del máximo al mínimo se da un recorrido de al menos 4m. El resultado es que el coeficiente de

Manning para pleamar es menor que el coeficiente para bajamar. Este resultado permitió constatar que el transporte sólido es mayor en bajamar que en pleamar, lo cual corrobora la hipótesis que mayor coeficiente de rugosidad mayor transporte sólido en igualdad de condiciones.

## Resultados obtenidos

En la tabla 1, se observan los resultados obtenidos en las diferentes secciones de los diferentes cauces.

**Tabla 1.-**

	Q (m <sup>3</sup> /s)	h <sub>ma</sub> (m)	U (m/s)	K <sub>s</sub> (m)	τ <sub>0</sub> (N/m <sup>2</sup> )	S <sub>f</sub> (-)	n(s <sup>-m(1/3)</sup> )
Patía	1240	4.40	0.110	0.180	12.3	2.85·1 <sub>0</sub> <sup>-4</sup>	0.036
Meta, Cabuyaro	450	5.3	0.080 <sub>7</sub>	0.50-	6.51	1.9·10 <sub>-4</sub>	0.030
Meta, Cabuyaro	1500	12.0	0.09	0.51	8.09	1.7·10 <sub>-4</sub>	0.034
Meta, Humapo	1000	6.5	0.08	0.36	6.47	3.8·10 <sub>-4</sub>	0.032
Meta, Humapo	2000	7.9	0.13	1.17	16.8	3.5·10 <sub>-4</sub>	0.034
Meta, Puerto Texas	1000	5.9	0.084	0.08	7.10	1.5·10 <sub>-4</sub>	0.028
Meta, Puerto Texas	3000	9.8	0.089	0.49	7.88	2.1·10 <sub>-4</sub>	0.032
Magdalena	7300	7.72	0.13	1.15	15.58	2.05·1 <sub>0</sub> <sup>-4</sup>	0.042
Buenaventura	Bajando	9.66	-	3.83	4.04	1.95·1 <sub>0</sub> <sup>-5</sup>	0.054
1.08Buenaventura	Subiendo	11.18	-	0.07	0.84	7.62·1 <sub>0</sub> <sup>-6</sup>	0.028

## Conclusiones

De la experiencia evaluando los coeficientes de resistencia al flujo, se puede indicar que el resultado es alentador. Pues se han resuelto varias problemáticas, como valorar el flujo de sedimentos neto en la Bahía de Buenaventura, las pendientes motrices en el cauce del meta y la calibración de las estaciones de aforo, la valoración de la bifurcación de agua en el cauce del Patía. Todos estos ejemplos han sido resueltos gracias a la valoración más representativa del coeficiente de resistencia al flujo. La siguiente acción es correlacionar las formas de fondo en el cauce del Magdalena con la medición de los coeficientes de resistencia al flujo.

## Referencias

- Bateman, A.** 2017. Asesoría para la modelación numérica de la Bahía de Buenaventura en Colombia. Realizada para HMV.
- Bateman, A.** 2015. Monitoreo del río meta (136 km desde Cabuyaro hasta bocas del Manacacías). Weg Ingeniería.
- Bateman, A.** 2008. Estudio en el Río Patía para Solucionar la Problemática Generada por el Cambio de Curso del Río Patía Ocasionado por la Construcción del Canal Naranjo. Proyecto realizado para Universidad del Pacífico.
- Bateman, A.** Aforo del 4 de Agosto del Canal de la Margen Derecha del Delta del Ebro. Para la COMUNITAT GENERAL DE REGANTS DEL CANAL DE LA DRETA DE L'EBRE.
- Pope, Stephen.** 2000. Turbulent Flows. Cambridge University Press
- Nezu, I; Nakagawa,H.** 1991. Turbulence in Open Channel Flows. Balkema.