

RESISTENCIA AL FLUJO EN UN RÍO DE PENDIENTE FUERTE EN BOLIVIA

Mauricio Romero y Edwin D. Rojas

Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón (LHUMSS)
Avenida Petrolera Km 4.2, Cochabamba, Bolivia, Tel/Fax: +591-4 - 421 7370
E-mail: mromero@abirh.org - Web: http://www.lh.umss.edu.bo

Introducción

El estudio de la hidráulica torrencial es uno de los temas más complejos y retadores en la ingeniería hidráulica, donde temas como ser la estabilidad de canales de gran pendiente, el transporte de sedimentos, las crecidas y la resistencia al flujo requieren de más investigación básica y aplicada.

Actualmente se cuenta con un gran número de ecuaciones de resistencia al flujo desarrolladas mayormente para ríos de pendiente baja con lechos de arena. Por otro lado, los estudios de resistencia al flujo para lechos compuestos de grava y peñones o bolones grandes son escasos debido a la complejidad de la interacción agua-contorno.

Una técnica muy común en la evaluación de una rugosidad representativa en un río de pendiente fuerte consiste en la comparación de los valores del coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach producidos por diversas fórmulas empíricas con los obtenidos por medio de mediciones de campo como se ilustra en Bathurst (1978, 1985), Aguirre-Pe & Fuentes (1990), Simons & Sentürk (1992), Ferro (1999) y Weichter (2006).

Objetivos

El presente trabajo tiene por objetivo la cuantificación del factor de fricción f de Darcy-Weisbach por medio de fórmulas empíricas de resistencia al flujo durante la época de estiaje y flujo uniforme en el río Taquiña, un río de alta montaña con pendiente fuerte localizado a 7 Km al norte de la ciudad de Cochabamba, Bolivia. Adicionalmente, en esta investigación se presenta la comparación entre las velocidades medias medidas y estimadas por medio de los modelos empíricos considerados en un tramo representativo del río estudiado.

Materiales y Métodos

La resistencia al flujo es una expresión usada en la hidráulica de ríos para describir la interacción dinámica entre el agua y el contorno en el cual ésta fluye. La inclusión apropiada de los factores que determinan dicha resistencia en una relación funcional, la cual incluya parámetros hidráulicos fácilmente medibles, además de un coeficiente de fricción, permite la predicción confiable de velocidades de flujo. Dichas relaciones se conocen con el nombre de ecuaciones de resistencia al flujo (Ferro, 1999).

La ecuación de velocidad de Darcy-Weisbach es ampliamente utilizada en estudios similares al presente, donde, para ríos con contornos rígidos tiene la forma de:

$$\frac{V}{\sqrt{gRS_f}} = \sqrt{\frac{8}{f_o}} \quad [1]$$

Donde V : velocidad media de flujo, en ms^{-1} , g : aceleración

debida a la gravedad, en ms^{-2} , R : radio hidráulico, en m, S_f : pendiente de la línea de energía, adimensional y f_o : coeficiente de rugosidad de Darcy-Weisbach observado, adimensional.

Se han aplicado inicialmente 14 modelos, donde las fórmulas de Bathurst (1978), Thompson & Campbell (1979), Jarret (1984), Bathurst (1985), Simons, Li & Asociados (1989) y Aguirre-Pe & Fuentes (1990) presentaron los resultados más consistentes y por consiguiente, se describen en la presente investigación.

El trabajo de campo se ha llevado a cabo en un tramo representativo del río Taquiña (ver Fig. 1). Para la correcta aplicación de los modelos, se seleccionó dicho tramo libre de vegetación formas del lecho como ser cascadas y peñones grandes. La longitud estudiada fue de 40 m con una pendiente promedio del 10 %. Durante el trabajo de campo, el transporte de sedimentos de fondo fue inexistente.

Se llevaron a cabo siete campañas de medición de caudales durante la época de estiaje (Febrero a Marzo). La velocidad de flujo fue medida por medio de un velocímetro acústico Doppler (ADV) Nortek AS. Un multímetro Eijelkamp 18.28 fue usado para medir la temperatura del agua y su salinidad, ambas necesarias para procesar los datos colectados por medio del software Collect V.

Durante las campañas de medición, se llevaron a cabo siete levantamientos topográficos a detalle de la zona de estudio para la determinación de elevaciones de agua promedio y la pendiente del río. Se seleccionaron además 4 secciones transversales para la obtención de valores promedio del perímetro mojado, áreas transversales de flujo, profundidades, anchos y velocidades promedio de flujo. Durante el trabajo de campo, se observó que no existieron variaciones en las formas de las secciones transversales



Figura 1.- Vista hacia aguas abajo del tramo de estudio en el río Taquiña

Se extrajeron dos muestras espacialmente distribuidas de acuerdo al método de Wolman (1954). Como resultado, se obtuvieron curvas granulométricas promedio con los siguientes valores: $D_{84} = 277.0$ mm, $D_{50} = 55.6$ mm, $D_{16} = 10.8$ mm y una desviación estándar geométrica $\sigma = 0.7$.

Evaluación de Resultados

Las figuras 2 y 3 presentan los resultados obtenidos para los factores de fricción de Darcy-Weisbach calculados y observados, así como para las velocidades respectivamente.

De ambas figuras, se estimó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe COE_x para cada modelo empírico. Adicionalmente, se calcularon los errores estándar de estimación promedio SE_x como (Bathurst, 1985; Hey, 1979; Jarret, 1984 y Aguirre-Pe & Fuentes, 1990):

$$SE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{X_{calci} - X_{obsi}}{X_{obsi}} \times 100\% \right)^2}{N-1}} \quad [2]$$

Donde X_{calc} : es la variable calculada (f o V), X_{obs} : es la variable medida (f_o o V_o) y N : es el número de datos.

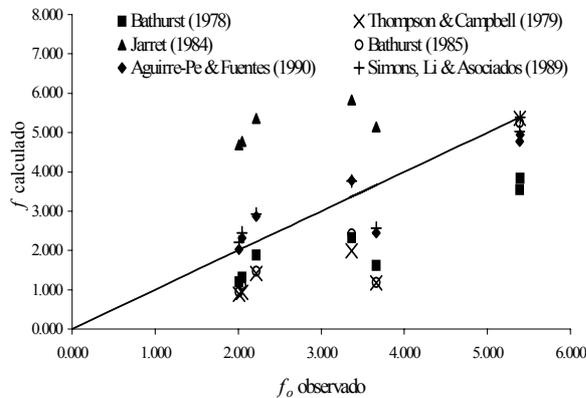


Figura 2.- Factores de fricción de Darcy-Weisbach calculados vs. observados para los modelo empíricos considerados

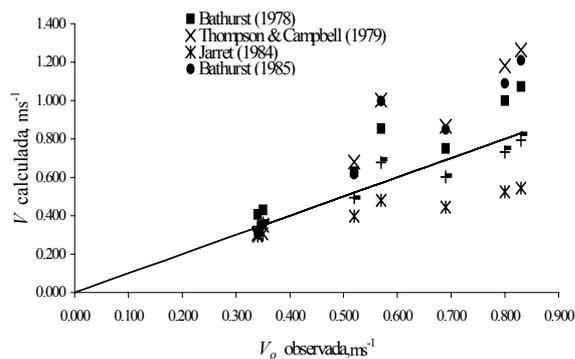


Figura 3.- Velocidades calculadas vs. observadas por medio de los modelos empíricos considerados

En general, se observa que los modelos aplicados producen resultados muy satisfactorios en la estimación de los factores de fricción de Darcy-Weisbach, con la excepción del modelo de Jarret (1984), en el cual se produce una sobrestimación de f muy grande ($SE_f = 104.16\%$) y por consiguiente, el valor de CEO_f es negativo. Los modelos de Simons, Li & Asociados (1989) y Aguirre-Pe & Fuentes (1990) presentaron los valores más grandes de CEO_f y CEO_V e inversamente, los valores más pequeños de SE_f y SE_V (ver Tabla 1), por lo cual son considerados los más precisos en la estimación de valores representativo de f y V para el tramo estudiado.

Tabla 1.- Valores de COE_x y SE_x para el tramo estudiado

Empirical Equation	COE_x		$SE_x (\%)$	
	$X=f$	$X=V$	$X=f$	$X=V$
Bathurst (1978)	0.9009	0.9431	39.18	30.03
Thompson & Campbell (1979)	0.7618	0.7916	49.02	45.75
Jarret (1984)	-0.8697	0.8789	104.16	28.44
Bathurst (1985)	0.8040	0.8594	44.72	41.00
Simons et al. (1989)	0.9460	0.9924	20.83	10.68
Aguirre-Pe & Fuentes (1990)	0.9626	0.9951	20.32	11.32

Conclusiones

Se probaron varios modelos empíricos para escalas grandes de rugosidad en un tramo de 40 m en el río Taquiña, un río de alta montaña de pendiente fuerte en Cochabamba, Bolivia. Se llevaron a cabo 7 campañas de medición de caudales y levantamientos topográficos, así como dos campañas de muestreo de sedimentos espaciales. El rango de los caudales aforados está muy próximo al caudal medio anual observado, y por lo tanto representativo del río Taquiña. Los valores calculados y observados de f y V fueron comparados. Los resultados muestran que los modelos de Simons, Li & Asociados (1989) y Aguirre-Pe & Fuentes (1990) son los más precisos en la estimación de f y V , con valores aceptables de COE_x y SE_x . La dispersión de los resultados es un indicador de que cada modelo cuantifica los procesos de resistencia de manera diferente. Por otra parte, los procedimientos para muestreo espacial de sedimentos no tendenciosos para la obtención de curvas granulométricas representativas aún tienen que ser mejorados (Weichert, 2006). A pesar de que los resultados presentados aquí son promisorios, se observa que dada la complejidad de los procesos de flujo, se necesitan más datos para evaluar la eficiencia de ambos modelos.

Referencias Bibliográficas

Aguirre-Pe, J. y Fuentes, R. (1990), "Resistance to Flow in Steep Rough Streams". *J. Hydr Div, ASCE*, Vol. 116, No. 11, pp. 1374-1387.

Bathurst J. C. (1978): "Flow Resistance of Large-Scale Roughness", *J. Hydr Div, ASCE*, Vol. 104, No. HY12, pp. 1587-1603.

Bathurst J. C. (1985): "Flow Resistance Estimation in Mountain Rivers", *J. Hydr Div, ASCE*, Vol. 111, No. 4, pp. 625-643.

Ferro V. (1999): "Friction Factor for Gravel-Bed Channel with High Boulder Concentration", *J. Hydr Div, ASCE*, Vol. 125, No. 7, pp. 771-778.

Jarret R. D. (1984): "Hydraulics of High-Gradient Streams", *J. Hydr Div, ASCE*, Vol. 110, No. 11, pp. 1519-1539.

Simons D. B. y Sentürk F. (1992): *Sediment Transport Technology*, Chapter 6: Resistance to Flow, Water Resources Publications, Colorado, U.S.A, pp. 352-362.

Weichert R. (2006): *Bed Morphology and Stability of Steep Open Channels*, Doctoral Dissertation, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie un Glaziologie der Eidgenössischen, Teschnischen Hochschule, Zürich, pp. 17-31, 57-71, 89.