

CALIBRACIÓN DE FUNCIONES PARA DESAGREGAR EN VERTICAL VELOCIDAD Y CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN EL RÍO PARANÁ

Pedro A. Basile⁽¹⁾, Marina L. García⁽¹⁾ y Gerardo A. Riccardi^{(1), (2)}

⁽¹⁾ Departamento de Hidráulica – EIC y CURIHAM (FCEIA – UNR)

⁽²⁾ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Sta Fe. Argentina. E-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

Introducción

La ley logarítmica de distribución de la velocidad en vertical es ampliamente aceptada debido a que puede ser justificada con ciertos argumentos teóricos, como por ejemplo, la hipótesis de longitud de mezcla de Prandtl, el razonamiento dimensional de von Karman o el análisis asintótico de Millikan.

Nezu y Nakagawa (1993) sostienen que la ley logarítmica es válida sólo en la región de la pared o capa interna y que las desviaciones a dicha ley deben ser tenidas en cuenta considerando una función de estela, tal como la propuesta por Coles (1956).

En la mayoría de las aplicaciones prácticas se supone que la ley logarítmica describe la distribución de la velocidad en toda la profundidad de flujo. Por otra parte, aún cuando la ley potencial sea considerada empírica, en muchos trabajos se reporta que los perfiles de velocidad medidos en canales abiertos anchos son adecuadamente representados por dicha ley.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la capacidad de la ley logarítmica de distribución de velocidades en vertical para representar mediciones realizadas en el río Paraná y, además, calibrar la ley potencial utilizando tales mediciones. Asimismo, se plantea como objetivo específico desarrollar relaciones funcionales entre el exponente de la ley potencial y distintos coeficientes de resistencia al flujo, tales como, el coeficiente de Chezy adimensional, el coeficiente de rugosidad de Manning y el factor de fricción de Darcy-Weisbach. Por otra parte, a partir de mediciones de concentración media en vertical de sedimentos en suspensión del material del lecho, se propone calibrar la función de distribución de sedimentos de Rouse-Van Rijn.

Las relaciones funcionales entre el exponente de la ley potencial y los coeficientes de resistencia al flujo, conjuntamente con la ley potencial, pueden ser utilizadas para obtener expeditivamente información sobre la distribución vertical de la velocidad a partir de conocer la velocidad media (o eventualmente la velocidad máxima), la profundidad de flujo y el coeficiente de rugosidad.

Las funciones $u(z)$ y $c_s(z)$ calibradas son de utilidad en modelos 2DH completos o Cuasi-2DH para desagregar en la vertical velocidad y concentración de sedimentos en suspensión, conservando el valor medio de velocidad y el transporte de sedimentos en suspensión, calculados por el modelo en cada celda del dominio modelado.

Mediciones de campo en el Río Paraná

Los datos utilizados en el presente estudio se corresponden con las mediciones realizadas por la empresa EVARSA en el cauce principal del río Paraná, a la altura del tramo Km 449 - 455 de la ruta de navegación.

Se realizó el relevamiento batimétrico del tramo utilizando

GPS Geodésico monofrecuencia ASHTECH - DIMENSION, mediante el método estático diferencial, GPS navegador GARMIN 45, y Ecosonda RAYTHEON DE 719 B.

Se realizaron mediciones de velocidades en cuatro secciones transversales dentro del tramo utilizando correntómetro OTT con contrapeso. En las secciones transversales se midieron perfiles de velocidades en un total de 47 verticales. En cada vertical se midieron velocidades cerca de la superficie, 0.2 h, 0.6 h, 0.8 h y cerca del fondo (profundidades medidas desde la superficie libre). Las profundidades totales en cada vertical se midieron con un cable conductor graduado, desde la superficie de agua hasta la base del contrapeso, una vez que éste tocó el fondo. Para el conjunto de mediciones, la profundidad de flujo h varió entre 3.3 m y 18.2 m, mientras que, la velocidad media en vertical U varió entre 0.468 m/s y 1.256 m/s.

En forma simultánea con las mediciones de los perfiles de velocidad se extrajeron muestras de sedimentos en suspensión integradas en la vertical utilizando un captador integrador en la vertical tipo USD 77. Las extracciones se efectuaron en 5 verticales comunes a algunas de las verticales donde se midieron los perfiles de velocidad en cada sección.

Las extracciones de muestras de material del lecho se realizaron en coincidencia con las mismas verticales donde se extrajeron las muestras de sedimentos en suspensión. A tales fines se utilizaron como captadores conos de arrastre y draga de mordazas tipo Tamura, ambos equipos fueron accionados desde la embarcación.

Para todas las muestras de sedimentos en suspensión (60 en total, correspondientes a 3 extracciones de 5 verticales en 4 secciones) se determinaron en laboratorio las concentraciones de sedimentos, separando la carga de lavado o finos (pasante tamiz 230) de las arenas. Para el conjunto de mediciones, la concentración media asociada al material del lecho C_s de sedimentos en suspensión varió entre 5.6 y 51.6 ppm en peso, mientras que, la concentración de carga de lavado varió entre 96.9 y 138.2 ppm en peso.

En el caso del material del lecho, se realizó para cada muestra (20 en total) un análisis granulométrico en laboratorio de sedimentología. El procedimiento empleado fue la separación de fracciones mediante tamizado por vía seca. Para la fracción arenas, de las muestras de sedimento en suspensión, se efectuó también un análisis granulométrico. El d_{50} correspondiente al material del lecho varió entre 0.26 mm y 0.30 mm, mientras que, el d_{50} correspondiente al sedimento en suspensión del material del lecho varió entre 0.08 mm y 0.12 mm aproximadamente.

Metodología de cálculo implementada

Las distribuciones de velocidades observadas en cada

vertical se compararon con la ley logarítmica y con la ley potencial. En primer lugar, la velocidad de corte (u_*) y la altura de rugosidad equivalente de Nikuradse (k_s) fueron estimadas ajustando a los datos medidos la ley logarítmica: $u(z)=c_1 \log z + c_2$, mediante regresiones lineales.

Además, para cada vertical se estimaron los parámetros β y m de la ley potencial: $u(z)/u_*=\beta(z/z_0)^m$, minimizando la función objetivo, definida mediante la suma del valor absoluto de los desvíos entre velocidad calculada y observada en cada perfil, y planteando como restricción la condición de total similitud entre la ley logarítmica y la ley potencial determinada por Chen (1991).

Para estimar una distribución de velocidades a partir de conocer la velocidad media en vertical, la profundidad y la rugosidad global, es más práctico aplicar la ley potencial: $u(z)/U=(m+1)(z/h)^m$, expresando al exponente m en función de algún coeficiente de rugosidad global. Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos, se desarrollaron tres relaciones funcionales que vincularon el exponente m con: (i) el coeficiente de Chezy adimensional, C_f (ii) el coeficiente de rugosidad de Manning, n y (iii) el factor de fricción de Darcy-Weisbach, f .

Se calibró la función de distribución de concentración de sedimentos de Rouse: $c_s(z)/c_{sa}=\left(\frac{h-z}{z}\right)\cdot\left(\frac{a}{h-a}\right)^\alpha$. El procedimiento consistió en ajustar la concentración en correspondencia con el nivel de referencia a , c_{sa} , de manera tal que al realizar la integración vertical del producto $u(z)c_s(z)$ se obtuviera el valor del transporte en suspensión observado. La concentración de referencia fue estimada mediante la ecuación de Van Rijn (1984a), la cual se calibró variando el coeficiente de proporcionalidad α_a . El nivel de referencia a se especificó como: $a=0.5 \Delta$, donde la altura de duna Δ se calculó con el predictor de resistencia de lecho móvil de Van Rijn (1984b).

Resultados

El coeficiente β estimado de la ley potencial, para cada vertical, varió entre 5.15 y 8.99, mientras que, el exponente m varió entre 1/6 y 1/9 aproximadamente. Es decir, el rango de variación del exponente m es bastante estrecho y se ubica dentro de los valores límites, físicamente plausibles, reportados en la literatura. En efecto, una ecuación de resistencia al flujo puede ser derivada a partir de una expresión de la velocidad media y el mismo exponente puede ser utilizado para representar la resistencia al flujo en la forma de una función potencial de distribución de la velocidad. Por ejemplo, la conocida ecuación de Manning implica que la velocidad media es proporcional a la potencia 1/6 de la profundidad de flujo y el mismo exponente puede ser utilizado en una función potencial de distribución de velocidades. El valor de $m=1/6$ es recomendado por Chen (1991) para la mayoría de las situaciones prácticas. Por otra parte, otros valores de m variando entre 1/4 y 1/12 han sido reportados en la literatura (Chen, 1991). En condiciones de rugosidades elevadas del lecho, tales como cantos rodados grandes, el valor de m puede incrementarse hasta 1/4 o 1/2 (Bray y Davar, 1987; Smart et al., 2002).

Los valores estimados de los coeficientes C_f , n y f son consistentes con las condiciones morfológicas, sedimentológicas e hidráulicas locales reinantes en cada vertical. Las tres relaciones funcionales que vincularon el exponente m con los diferentes coeficientes de resistencia

al flujo pueden expresarse como:

$$m=1.1605 C_f^{-0.7522} \quad [1]$$

$$m=0.9874 n^{0.5392} \quad [2]$$

$$m=0.5308 f^{0.3761} \quad [3]$$

Los coeficientes de determinación obtenidos en las tres regresiones son todos superiores a 0.8 y, en los tres casos, más del 94% de los datos están comprendidos entre $\pm 10\%$ de variación de la ecuación de mejor ajuste.

Sustentando la validez de las ecuaciones derivadas, se señala que, Hinze (1975) propuso una expresión donde se relaciona empíricamente el exponente m con el factor de fricción f , mediante: $m=r f^{0.5}$, con $r=0.8-1$. La misma relación, pero con $r=0.88$, ha sido precedentemente utilizada por Zimmermann y Kennedy (1978) para estimar el perfil de velocidades en ríos aluviales.

Respecto a la función de distribución de concentración de sedimentos en suspensión, se observa que el histograma de frecuencia relativa, de la relación entre el coeficiente α_a ajustado y el originalmente propuesto por Van Rijn, muestra que tal relación varía entre 0.5 y 1.5 para el 86 % de los casos analizados.

Conclusiones

Los valores locales estimados de velocidad de corte y altura de rugosidad equivalente, mediante el método de una ecuación, resultan satisfactorios. Los resultados indican que tanto la ley logarítmica como la ley potencial representan adecuadamente la distribución vertical de la velocidad para la totalidad de la profundidad de flujo.

Los valores determinados de los parámetros de la ley potencial β y m , se ubican dentro de los valores límites, físicamente plausibles, reportados en la literatura. En particular, el rango de variación del exponente m es bastante estrecho, los valores estimados varían aproximadamente entre 1/6 - 1/9.

Teniendo en cuenta la variabilidad y complejidad del proceso de transporte de sedimentos, puede concluirse que, los valores obtenidos del coeficiente ajustado de la ecuación de Van Rijn, que brinda la concentración en el nivel de referencia a , son aceptables.

Las funciones $u(z)$ y $c_s(z)$ calibradas pueden ser aplicadas en modelos 2DH completos o Cuasi-2DH para desagregar en la vertical velocidad y concentración de sedimentos en suspensión.

Referencias Bibliográficas

- Chen, C.L. (1991). "Unified theory on power laws for flow resistance". *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(3), 371-389.
- Nezu, I. y H. Nakagawa (1993). *Turbulence in open channel flows*. Balkema publishers, Rotterdam, Holanda.
- Van Rijn, L.C. (1984a). "Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport". *Journal of Hydraulic Engineering*, 110 (11), 1613-1641.