

EROSIÓN GENERAL EN RÍOS CON LECHOS ARENOSOS

Hector Daniel Farias, María T. Pilán, Francisco J. Pece, Luis A. Olmos

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE), Av. Belgrano (S) 1912, Santiago del Estero, Argentina

E-mail: hfarias@bigfoot.com - Web: <http://irh-fce.unse.edu.ar/>

RESUMEN

Se presenta una revisión de algunos métodos de uso extendido para el cálculo de la erosión local por incremento del caudal en ríos arenosos. Asimismo, se formulan las bases teóricas para un enfoque generalizado del problema. Por su parte, se presenta una discusión del concepto de velocidad de equilibrio, teniendo en cuenta los criterios modernos basados en aspectos relativos al transporte de sedimentos y resistencia al flujo en el cauce cuando este alcanza una condición de cuasi-estabilidad dinámica o transporte generalizado de sedimentos en el instante de erosión máxima. A partir de la formulación generalizada, se presenta una metodología para estimar la socavación general en cauces arenosos, la cual se aplica a una serie de ejemplos prácticos.

ABSTRACT

A review of several methods for predicting the general scour in sand-bed channels is presented in this paper. Also, the theoretical basis for a generalized approach are introduced. Furthermore, the concept of equilibrium velocity is discussed, taking into account modern criteria based on the consideration of sediment transport and flow resistance along the channel when a final condition of quasi-equilibrium is attained at the maximum scour instance. From the generalized formulation, a method is presented for the estimation of general scour in sandy channels, which is illustrated with the application to several practical examples.

INTRODUCCIÓN

La estimación de las profundidades de erosión general en cauces naturales es un tema de gran importancia en ingeniería fluvial, especialmente útil para la toma de decisiones en el diseño de obras de cruce a través del cauce, tales como puentes, tuberías, túneles subfluviales, etc.. Los procedimientos clásicos se basan en variadas hipótesis, entre las cuales la más importante es la que sostiene la igualdad entre la velocidad media del flujo en la sección transversal de cauce considerada y la hipotética velocidad límite o de equilibrio para el movimiento de las partículas que forman parte del lecho fluvial.

En este estudio se realizó una revisión de algunos métodos usados en diversos países y se delinearon las bases teóricas para la formulación de un enfoque generalizado para el cálculo de las profundidades de erosión general en cauces arenosos. Por su parte, se presenta una discusión del concepto de velocidad de equilibrio, teniendo en cuenta los criterios modernos basados en aspectos relativos al transporte de sedimentos, resistencia al flujo y comportamiento de las propiedades energéticas del flujo en el cauce cuando este alcanza una condición de estabilidad dinámica o régimen (transporte generalizado de sedimentos). A partir de la formulación generalizada, se presenta una metodología para estimar la socavación general en cauces arenosos, la cual se aplica a una serie de ejemplos prácticos.

CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Se denomina erosión general al descenso que experimenta el lecho de un río cuando se produce un aumento en el caudal líquido que escurre por el mismo. La causa de su ocurrencia

se explica por la mayor capacidad de transporte de material sólido que adquiere la corriente al incrementarse el caudal y por consiguiente la “intensidad del flujo” expresada a través de la tensión de corte sobre el lecho (que es capaz de poner a las partículas en movimiento) y la velocidad media del agua (que mantiene a las mismas en transporte). Este proceso se desarrolla en una escala de tiempo de corto plazo (asociada a una creciente) y su magnitud depende de las características hidrológicas de la cuenca (tamaño y función de respuesta). Si el descenso del lecho fluvial se produce en una escala temporal de largo plazo (años o décadas) el proceso morfológico se denomina “degradación” y como ejemplo puede mencionarse al que ocurre aguas abajo de una presa de embalse, como consecuencia de la retención de sedimentos en el vaso.

Los métodos para la estimación de la erosión general pueden aplicarse tanto a nivel de la sección transversal global, o bien segmentando la misma en una serie de franjas verticales y aplicar el procedimiento de cálculo en forma desagregada.

Desde el punto de vista conceptual, una de las hipótesis fundamentales en que se basan varios métodos reside en la igualdad entre la velocidad media del flujo en una franja vertical (V_r) y la velocidad de equilibrio U_e para mantener un transporte sólido generalizado en el lecho, es decir, con un aporte de material desde aguas arriba que compense el volumen removido por la corriente. Por lo tanto, para aplicar la identidad $V_r=U_e$, es necesario encontrar expresiones generales tanto para V_r como para U_e . La literatura presenta dos trabajos recientes en los que se revisan las ventajas y limitaciones de las metodologías de uso más extendido (Bettess, 2002; Lauchlan y May, 2002). Las conclusiones de estos estudios indican que la generalidad de los métodos tradicionales resultan deficitarios, ya que incorporan muchos parámetros de estimación subjetiva y además no tienen en cuenta muchos aspectos de la dinámica fluvial, de modo tal que cuando se aplican a situaciones reales producen resultados muy disímiles entre ellos y además sus predicciones no son confiables.

ANÁLISIS DE RELACIONES EXISTENTES

Existen muchas relaciones para estimar la erosión general en un río aluvial ante un aumento del caudal, que se pueden aplicar tanto a la sección global como a la sección segmentada. A continuación se presentan algunas fórmulas para calcular la erosión general, discutiéndose algunas singularidades de las mismas y también las situaciones para las cuales fueron deducidas y sus rangos de aplicación.

Caso de ríos con lechos cohesivos

Según Farraday y Charlton (1983) la profundidad del flujo puede calcularse suponiendo que la erosión general ocurrirá hasta que la tensión tractiva sobre el lecho iguale a la tensión tractiva crítica. En estas condiciones, la ecuación propuesta es la siguiente (unidades SI):

$$h_s = 51.4 n^{0.86} q^{0.86} \tau_c^{-0.43} \quad (1)$$

donde h_s se expresa en metros, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, q es el caudal por unidad de ancho para la condición hidráulica analizada (m^2/s) y τ_c es la tensión tractiva crítica, expresada en N/m^2 .

Otra formulación de uso extendido en algunos países europeos es el Método de Mirtskhoulava (1967, 1991). Esta metodología es presentada por Lauchlan y May (2002) a través de la ecuación fundamental en que se basa el procedimiento de cálculo de la erosión general:

$$h_s = \left[\frac{1.25 q k_r^b}{e_c m_1 m_h v_n} \right]^{\frac{1}{b+1}} \quad (2)$$

donde h_s es la profundidad del flujo luego de la erosión general, e_c es un coeficiente que tiene en cuenta la contracción del flujo y el incremento en el caudal unitario, v_n es una velocidad no-erosiva en las proximidades del lecho a la altura de los elementos de rugosidad, q es el caudal específico, m_1 es el coeficiente de las condiciones de funcionamiento, m_h es un coeficiente que tiene en cuenta el nivel de agua en la planicie de inundación en cauces formados de materiales cohesivos o sedimentos finos (se recomienda adoptar $n=4$, según Lauchlan y May (2002)), k_r es la altura de los elementos de rugosidad (se recomienda adoptar: $k_r=0.75 d_{95}$), b es un parámetro que depende de la rugosidad relativa h/k_r . Para la estimación del parámetro b se propone la siguiente fórmula:

$$b = \frac{\log \left[\log \left(8.8 \frac{h}{d_{95}} \right) \right]}{\log \left(\frac{h}{0.7 d_{95}} \right)} \quad (3)$$

para el rango de valores de (h/d_{95}) entre 10 y 10^5 , típico de los cauces naturales, se encuentra mediante la aplicación de la ecuación anterior que b varía entre 0.25 y 0.15. Con ello, el caudal unitario q aparecería elevado a un exponente variable entre 0.80 y 0.87 en la expresión para la erosión general (Figura 1).

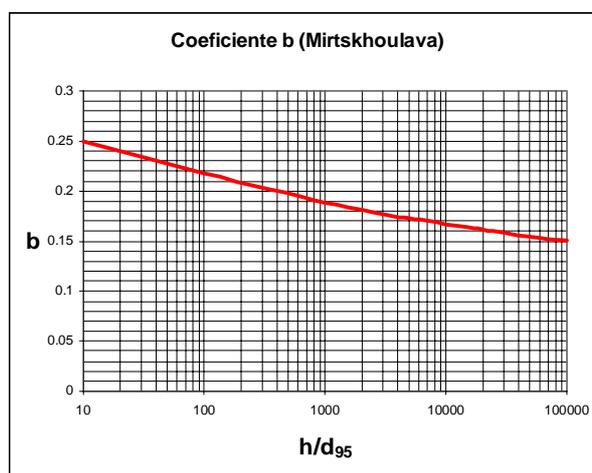


Figura 1.- Variación del coeficiente b de Mirtskhoulava

Para la velocidad v_n se propone la siguiente ecuación (recuérdese que se recomienda $n=4$):

$$v_n = 1.25 \sqrt{\frac{2}{0.44 \cdot \rho \cdot n}} [g(\rho_s - \rho)d_{50}] \quad (4)$$

Aplicando a esta ecuación los valores típicos de los sedimentos naturales, y adoptando $n=4$ como recomiendan Lauchlan y May, se obtiene para la velocidad característica la expresión:

$$v_n = 682 \cdot d_{50} \quad , \text{ donde para } d_{50} \text{ expresado en metros, } v_n \text{ resulta en m/s.}$$

Según el autor, estas relaciones también son aplicables a lechos arenosos. Por ejemplo, para $d_{50}=300$ micrones = 0.0003 m , se obtiene: $v_n = 0.205$ m/s (valor típico de las arenas).

Caso de ríos con lechos granulares

Con base en las investigaciones de Blench sobre cauces aluviales en régimen, Farraday y Charlton (1983) presentan la siguiente fórmula:

$$h_s = 0.38 \cdot q^{0.667} \cdot d_{50}^{-0.167} \quad (5)$$

Por su parte, la formulación de Maza Alvarez y Echavarría Alfaro (Melville y Coleman, 2000; Lauchlan y May, 2002) puede expresarse como:

$$h_s = 0.365 \cdot q^{0.784} \cdot d_{50}^{-0.157} \quad (6)$$

La fórmula de Kellerhals (Farraday y Charlton, 1983; Lauchlan y May, 2002), originalmente encontrada para cauces con lechos de grava, se puede escribir en la forma:

$$h_s = 0.47 \cdot q^{0.80} \cdot d_{90}^{-0.12} \quad (7)$$

Analizando este conjunto de ecuaciones, y también la compilación más completa presentada por Lauchlan y May (2002), inmediatamente se observa que gran parte de los métodos basados en criterios tipo régimen, puede reducirse a ecuaciones particulares de la relación genérica siguiente:

$$h_s = c_0 \cdot q^{c_1} / d^{c_2} \quad (8)$$

donde las constantes c_0 , c_1 y c_2 adquieren diferentes valores según sea el método considerado.

Por ejemplo, la ecuación de Lischvan & Lebediev para el rango de las arenas se reduce a:

$$h_s = 0.333 \cdot q^{0.710} \cdot d^{-0.199} \quad (9)$$

Considerando los rangos típicos de algunas variables en el caso de cauces fluviales con lechos arenosos, se pueden simplificar varias de las formulaciones existentes a una relación funcional genérica de la forma (Farias y Pilan, 2002):

$$h_s = c_0 q^{c_1} / d^{c_2} \quad (10)$$

donde h_s es la profundidad luego de producida la erosión, q es el caudal unitario y d es el tamaño del sedimento, siendo c_1 , c_2 y c_3 constantes numéricas. En la Tabla 1 se presentan los valores de esas constantes para varias ecuaciones de uso extendido.

Tabla 1.- Parámetros de la ecuación de erosión general

Formula	c_0	c_1	c_2
Lischtvan-Lebediev	0.333	0.710	0.199
Laursen	0.205	0.860	0.284
Blench	0.380	0.667	0.167
Maza A. - García F.	0.209	0.870	0.305
Maza A. - Echavarría A.	0.365	0.784	0.157
Kellerhals	0.470	0.800	0.120

Estas expresiones de la profundidad de la faja socavada (h_s) en función del caudal unitario, desde el punto de vista práctico resultan útiles cuando se puede conocer de alguna manera la distribución lateral de velocidades en la sección transversal. Este dato puede provenir de mediciones a través de aforos líquidos realizados en la sección de interés (Schreider et al., 2001) o mediante estimaciones resultantes de la aplicación de modelos numéricos, por ejemplo modelos bidimensionales (2D) integrados en la vertical. Existen algunos modelos que proveen algoritmos para estimar la distribución lateral de velocidades, como por ejemplo HEC-RAS. Sin embargo, resulta necesario conocer en detalle los métodos con los que los modelos realizan esos cálculos internamente para poder decidir adecuadamente su uso (ver Weber, 2003).

Aunque aparentemente no se observan variaciones significativas en estos parámetros, apreciablemente en el exponente de q (que varía entre 0.67 y 0.87) la aplicación de estas fórmulas a un río dado (es decir, con un sedimento establecido) producen resultados muy diferentes unas con respecto a otras, aspecto que ha sido también demostrado por Lauchlan y May (2002) en la aplicación a varios ríos naturales en el Reino Unido.

Con la finalidad de comparar el comportamiento de las fórmulas, en la Figura 2 se ha planteado seis ecuaciones para el rango típico de las arenas medias ($d = 0.3$ mm).

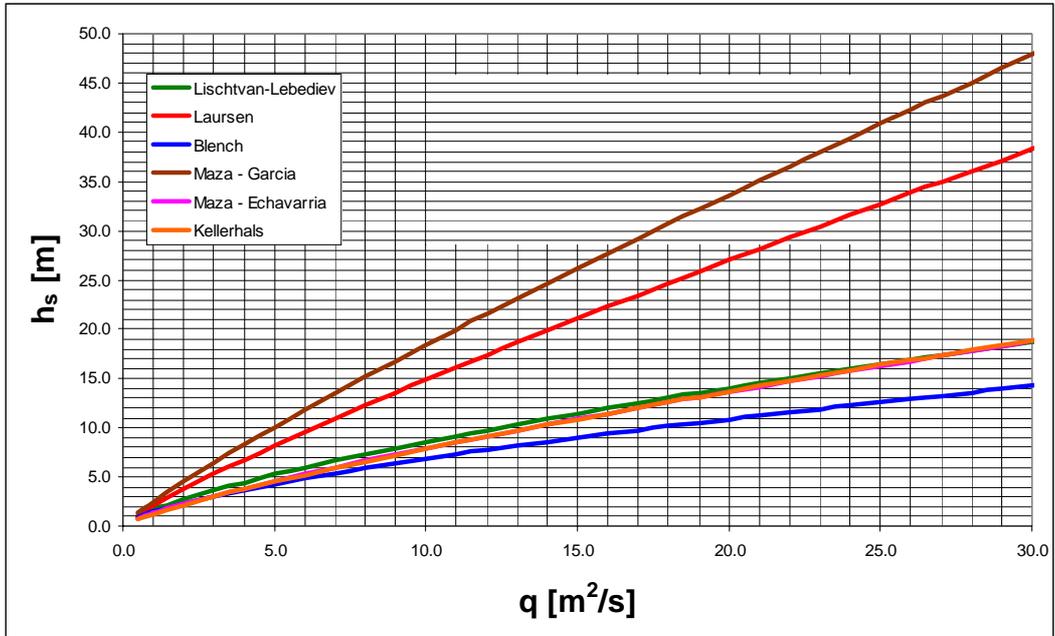


Figura 2.- Comparación de las distintas fórmulas para calcular h_s para $d = 0.3$ mm

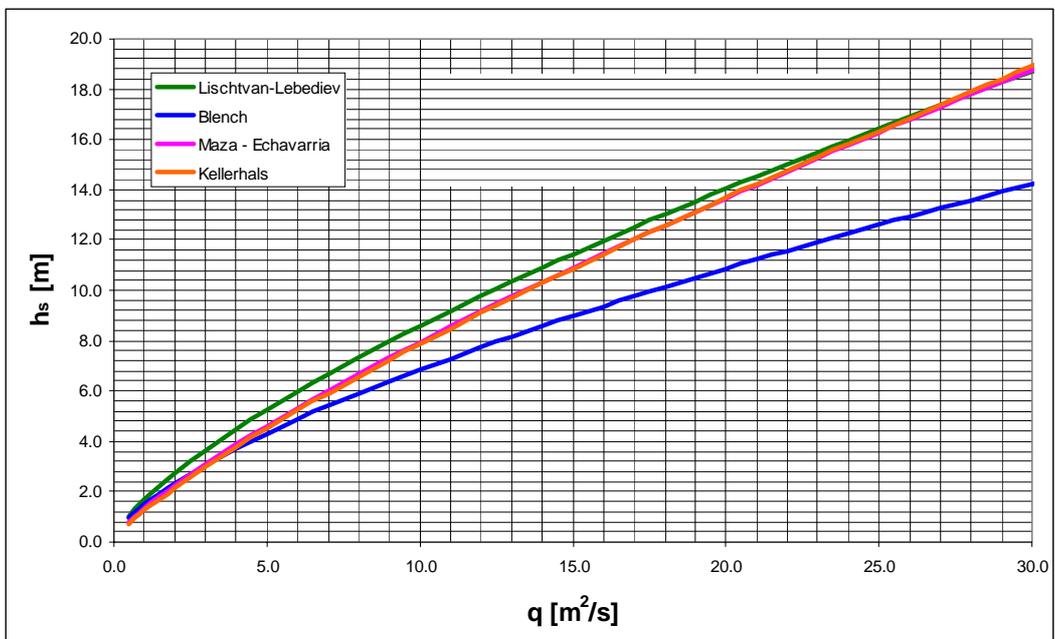


Figura 3.- Comparación de cuatro fórmulas para calcular h_s para $d = 0.3$ mm, en el rango de h_s hasta 20 m

Puede observarse en la Fig. 2 que las formulaciones de Laursen y de Maza-García, producen sobre-estimaciones significativas respecto a las otras fórmulas. Este aspecto se reitera para todo el rango de las arenas, por lo cual las siguientes comparaciones incluyen a las relaciones de Lischvan-Lebediev, Blench, Maza-Echavarría y Kellerhals.

La Fig. 3 muestra la comparación entre las cuatro fórmulas mencionadas previamente para el rango de profundidades (de la sección erosionada) hasta 20 m, lo cual incluye prácticamente a todos los casos prácticos de grandes ríos de llanura. En la Figura 4 se presenta el mismo análisis para el rango de profundidades de hasta 10 m.

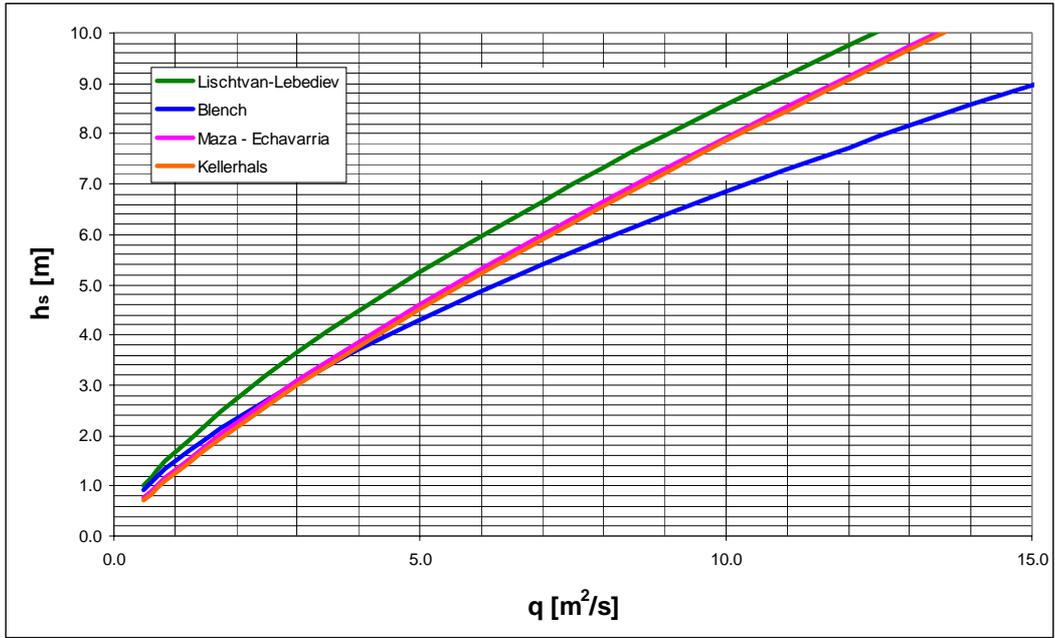


Figura 4.- Comparación de cuatro fórmulas para calcular h_s para $d = 0.3$ mm, en el rango de h_s hasta 10 m

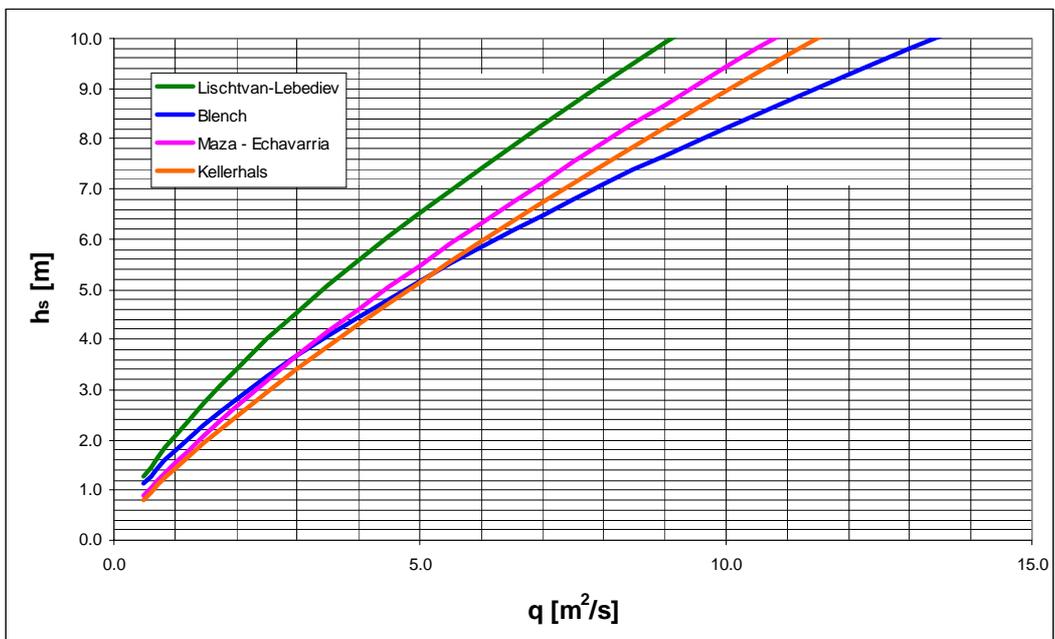


Figura 5.- Comparación de fórmulas para h_s (arena fina: $d = 0.1$ mm), en el rango de h_s hasta 10 m

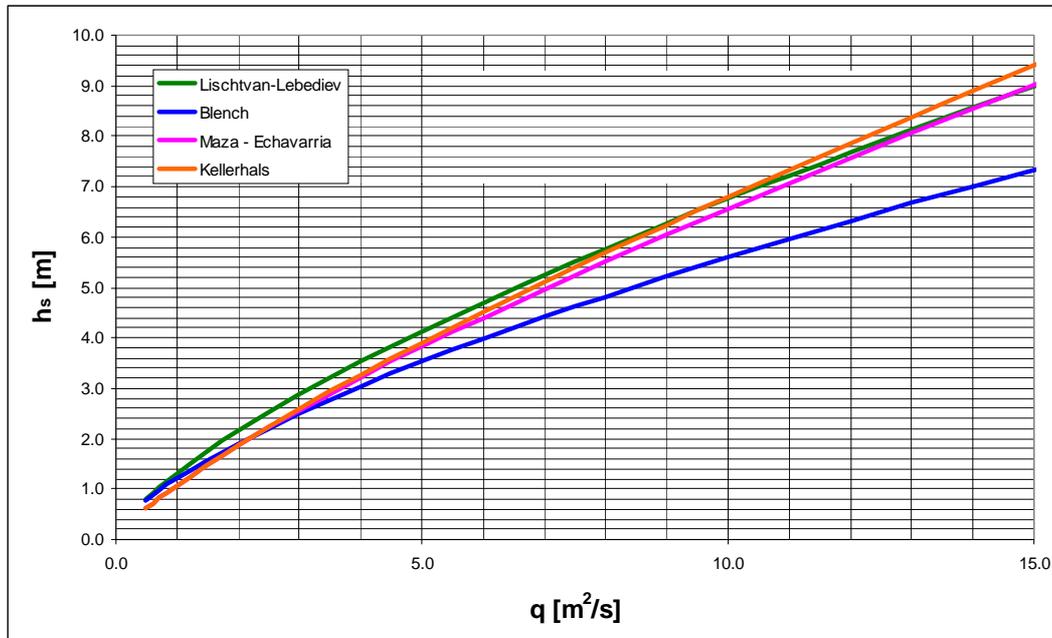


Figura 6.- Comparación de fórmulas para h_s (arena gruesa: $d = 1.0$ mm), en el rango de h_s hasta 10 m

Las Figs. 5 y 6 muestran las comparaciones haciendo variar el tamaño de sedimento. Es decir, la Fig. 5 se aplica al caso de sedimentos arenosos finos ($d = 0.1$ mm) mientras que la Fig. 6 es válida para arenas gruesas ($d = 1.0$ mm).

En general, para ríos arenosos las fórmulas de Maza-García y de Laursen sobre-estiman de manera muy apreciable la erosión general, mientras que la de Blench tiende a subestimarla. Los resultados más aceptables se obtienen con las fórmulas de Lischtvan-Lebediev, Maza-Echavarría y Kellerhals, aunque esta última fue inicialmente calibrada con datos de ríos con lechos de grava.

VELOCIDADES CRÍTICA Y DE EQUILIBRIO

La velocidad crítica (V_c) puede definirse como la velocidad media del flujo necesaria para poner en movimiento las partículas de sedimentos en la sección de interés (caso en que no existe aporte de material sólido desde el segmento de aguas arriba del cauce). La velocidad de equilibrio (U_c) se refiere al caso de transporte generalizado, siendo la velocidad necesaria para mantener un equilibrio entre la masa de sedimento erodada de la sección y el suministro de sólidos desde aguas arriba.

Para encontrar una expresión para la velocidad crítica de inicio de transporte, puede combinarse la fórmula de fricción de Manning-Strickler con el diagrama de Shields, del siguiente modo.

Para una franja vertical de flujo, la velocidad media del flujo se expresa de la siguiente manera:

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} S^{1/2}, \text{ con: } n = 26 \cdot d^{-1/6} \quad (11)$$

Por su parte, la función de Shields $\tau_{*c} = \Phi_\tau(d_*)$ puede emplearse una versión segmentada de curvas potenciales al estilo de las presentadas por van Rijn (1982), las que en forma genérica se pueden escribir como:

$$\tau_{*c} = k_\tau \cdot d_*^x, \text{ donde: } d_* = \left(\frac{g \cdot \Delta}{v^2} \right)^{1/3} \cdot d \quad \text{y} \quad \tau_* = \frac{h \cdot S}{d \cdot \Delta} \quad (12)$$

Combinando estas expresiones, luego de una manipulación algebraica, se obtiene para la velocidad crítica:

$$V_c = (26 \cdot k_\tau^{1/2} \cdot g^{x/6} \cdot \Delta^{(x+3)/6} \cdot v^{-x/3}) \cdot d^{(3x+2)/6} \cdot h^{1/6} \quad (13)$$

Para el segmento de las arenas medias, es decir, entre 0.4 mm y 0.8 mm, los valores de las constantes son (van Rijn, 1982): $k_\tau=0.04$; $x=-0.10$. Reemplazando estos valores en la ecuación anterior y haciendo uso de los valores típicos de g , Δ y v para condiciones normales, se obtiene:

$$V_c = 6.093 d^{0.2833} h^{0.1667} \quad (14)$$

Observando esta ecuación, puede advertirse inmediatamente su semejanza con la ecuación propuesta por la FHWA en la circular HEC-18, la cual se expresa como:

$$V_c = 6.19 d^{1/3} h^{1/6} \text{ (unidades SI)} \quad (15)$$

Análogamente, en los países de Europa oriental y los antiguos miembros de la ex Unión Soviética, se utiliza frecuentemente la fórmula de Shamov (Przedwosjski *et al.*, 1995, pag. 282), la que se escribe en unidades SI como: $V_c = 6 d_{50}^{1/3} h^{1/6}$.

Puede advertirse que para aquellas ecuaciones de la velocidad crítica basadas en la representación a través de una función potencial de un segmento de la curva de Shields y su combinación con la fórmula de Manning para la resistencia al flujo, la profundidad h aparece siempre elevada a la potencia (1/6), mientras que el tamaño del sedimento aparece elevado a una potencia cercana a 0.3 para el rango de las arenas.

Existen otras ecuaciones de tipo logarítmico, como la fórmula de Levi (1948; Goncharov, 1962) para materiales uniformes: $V_c = 1.4 (g d)^{0.5} \ln[R/(7d)]$, la cual es válida para $R/d > 60$.

Entre las fórmulas más recientes, puede incluirse a la de van Rijn (1984) en sus ecuaciones de transporte, la que varía en función del tamaño del sedimento:

$$V_c = 0.19 d_{50}^{0.1} \log[(12R)/(3d_{90})], \quad 0.1 \text{ mm} < d < 0.5 \text{ mm} \quad (16)$$

$$V_c = 8.50 d_{50}^{0.6} \log[(12R)/(3d_{90})], \quad 0.5 \text{ mm} < d < 2.0 \text{ mm} \quad (17)$$

Finalmente, se puede incluir en este conjunto a la fórmula de Lischvan & Lebediev para el rango de arenas (Schreider *et al.*, 2001): $V_c = 4.7 d^{0.281} h^{0.41}$.

Con la finalidad de simplificar el análisis, y restringir el mismo por ahora al caso de ríos arenosos, se realizó un ajuste de las ecuaciones logarítmicas a fórmulas potenciales, válidas para los rangos de granos de 0.1 mm a 1.5 mm y de profundidades de 0.5 m a 10.0 m, con errores máximos del orden del 5% (en el caso de las fórmulas de van Rijn, se supuso que el sedimento es arena fina con distribución granulométrica log-normal, con $\sigma_g=1.5$, $d_{90}\approx 1.68d_{50}$, con lo que resulta la fórmula simplificada:

$$V_c = 0.19 d^{0.1} \log(2.4 R/d) \quad (18)$$

la que a su vez se reduce a un formato potencial.

Desde el punto de vista práctico, la aplicación de uno u otro caso está asociada al tipo de curso fluvial de que se trate. En el contexto del presente análisis, se sostiene que la consideración de V_c tiene un sentido físico en el caso de ríos cuyos lechos están compuestos por material granular grueso (gravas y tamaños mayores), mientras que en el caso de ríos arenosos sería necesario definir adecuadamente el valor de U_e . En la Tabla 2 se presentan algunas fórmulas extraídas de la literatura, reducidas al formato general:

$$V_c = b_0 d^{b_1} h^{b_2} \quad (19)$$

Tabla 2.- Fórmulas para la velocidad crítica

Formula	b_0	b_1	b_2
Shamov	6.000	0.333	0.167
DoT-FHWA-HEC18	6.190	0.333	0.167
Maza A. - Echavarría A.	3.620	0.200	0.275
Levi (aprox. pot)	8.290	0.357	0.156
van Rijn (aprox. pot.)	0.340	0.004	0.100
Lischtvan-Lebediev	4.700	0.280	0.410
Shields-Manning	6.093	0.283	0.167

En la Fig. 7 se presenta una comparación de las distintas fórmulas para la velocidad crítica, encontrándose que la de Lischtvan-Lebediev (que en realidad es una formulación para la velocidad de equilibrio) es la que predice valores mayores de V_c (en realidad, U_e) para profundidades mayores de aproximadamente 2 m.

Debe tenerse en cuenta que en la hipótesis $V_r = U_e$ en la que se fundamentan los métodos de erosión general, las predicciones de valores altos de V_c (o U_e) se manifiestan en menores valores de h_s (profundidad en una vertical luego de producida la erosión general).

En este sentido, luego del análisis de la bibliografía que se realizó en este estudio, puede afirmarse que la única ecuación calibrada (aparentemente con datos de ríos de llanura) para la predicción de la velocidad de equilibrio U_e es la de Lischtvan-Lebediev, es decir, los valores con los que se calibraron sus coeficientes y exponentes estarían asociados a una condición de transporte generalizado de sedimentos en el lecho, mientras que todas las formulaciones restantes están basadas en una condición movimiento incipiente de las partículas del lecho (en

el instante de máxima erosión), lo cual obviamente en el caso de ríos de llanura conduce a estimaciones extremadamente conservadoras de las erosiones generales.

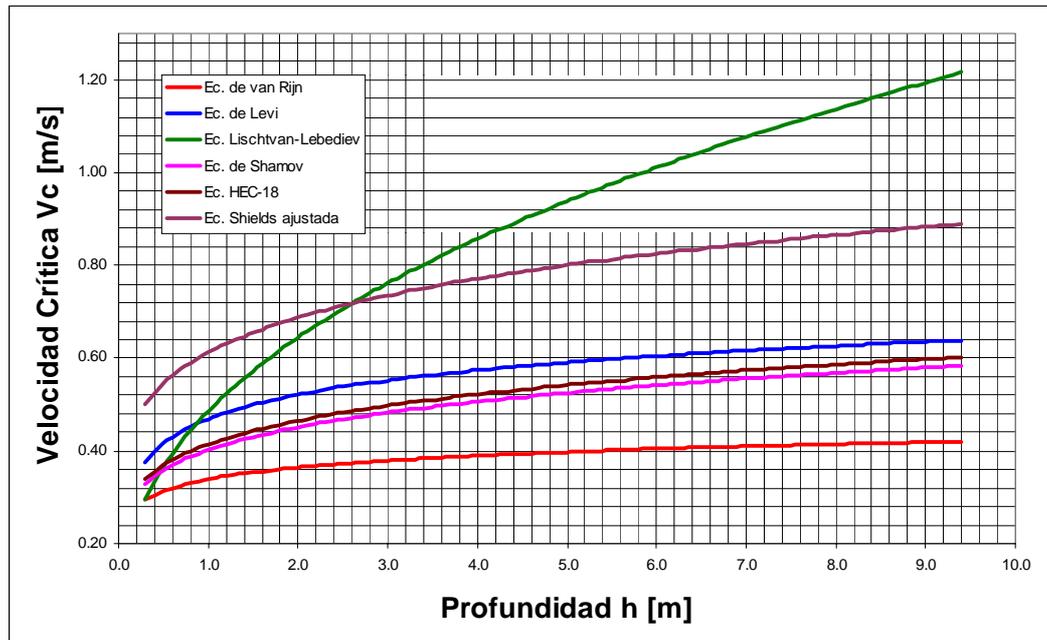


Figura 7.- Comparación de las distintas fórmulas para evaluar V_c para $d = 0.3$ mm

RESISTENCIA AL FLUJO

Existe en la literatura un gran número de ecuaciones para estimar las características friccionales de cauces aluviales. Las relaciones de resistencia de uso más extendido en el caso de cauces arenosos (en el rango de tamaños de partículas de 0.1 mm a 1.0 mm) pueden reducirse a un formato genérico en la forma de un producto de potencias (Farias y Pilán, 2000), tal como el siguiente:

$$V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3} \quad (20)$$

donde los valores de los coeficientes y exponentes a_i ($i = 0,1,2,3$) dependen de cada una de las ecuaciones publicadas en la literatura que se considere.

En un estudio reciente, Farias y Pilán (2000) analizaron alrededor de una decena de ecuaciones publicadas en la literatura para evaluar la velocidad media en canales arenosos, tipificando a cada una ellas en el formato simplificado dado por la ecuación 20. Se encontró que para la mayor parte de las ecuaciones los exponentes de la profundidad y de la pendiente varían dentro de rangos limitados, y el exponente que mayor incertidumbre presenta es el del tamaño del sedimento, aunque sus valores son relativamente pequeños (alrededor de 0.1), y posiblemente esa sea la causa fundamental de aquella variabilidad.

Los valores de las constantes numéricas para varias fórmulas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Formulas de resistencia al flujo

Formula	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃
Manning-Strickler	21.100	-0.167	0.667	0.500
Pavlovsky-Lacey	17.810	-0.133	0.736	0.515
Sugio	7.900	0.000	0.540	0.270
Chitale	7.340	0.000	0.646	0.293
Maza-Cruickshank	495.850	0.340	0.637	0.456
Brownlie	13.290	-0.029	0.529	0.389
Peterson-Peterson	7.546	0.017	0.437	0.276
Karim-Kennedy	18.190	-0.103	0.603	0.497
Camacho-Yen	97.930	0.216	0.636	0.401
Farias-Pilan	4.780	0.026	0.499	0.213

FORMULACIÓN GENERALIZADA

Las relaciones para U_e (o V_c) y V_r han sido combinadas para producir un criterio generalizado que permite estimar la erosión general en ríos arenosos escogiendo el par de fórmulas (a partir de las Tablas 2 y 3) que se considere apropiado.

Considerando las relaciones genéricas

$$V_r = a_0 d^{a_1} h^{a_2} S^{a_3} \quad \text{y} \quad U_e = b_0 d^{b_1} h^{b_2}$$

y concentrando algunos de los parámetros, se puede escribir:

$$\alpha_M = a_0 d^{a_1} S^{a_3}$$

con lo que la velocidad media puede expresarse como:

$$V_{r(i)} = \alpha_M h_i^{a_2}$$

Asimismo, por continuidad, se tiene: $\alpha_M = Q / [T \cdot h_m^{(a_2+1)}]$.

Finalmente:

$$h_{s_i} = \left[(\alpha_M / b_0) d^{-b_1} h_i^{(a_2+1)} \right]^{1/b_2+1} \quad (21)$$

Esta expresión se aplica a cada franja vertical en que se segmenta el cauce para estimar de esta manera la erosión general. Este método se ha aplicado a grandes ríos de llanura, encontrándose resultados satisfactorios para predecir la erosión general en el rango de profundidades de 2 m a 25 mts. Las aplicaciones se presentan en el párrafo siguiente.

EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA GENERALIZADA

Luego de inspeccionar la Ec. 2 (de la cual la Ec. 1 es un caso particular), puede advertirse que la profundidad de socavación resulta en definitiva una función de los datos básicos (es decir, caudal de diseño, tamaño del sedimento, sección inicial del cauce, etc.) y de las constantes a_i y b_j que dependen del par de ecuaciones adoptadas para la velocidad media del flujo y la velocidad de equilibrio. Más aún, para un río dado, la profundidad en una vertical de una sección erosionada resulta una función potencial del tirante inicial:

$$h_{si} = k_0 h_i^{k_1}$$

donde:

$$\begin{aligned} k_0 &= m_0 d^{m_1} \\ k_1 &= (a_2+1)/(b_2+1) \\ m_0 &= [\alpha_M/b_0]^{1/(b_2+1)} \\ m_1 &= -b_1/(b_2+1) \end{aligned}$$

La evaluación del comportamiento de la metodología generalizada (ecuación 21) usando una serie de combinaciones de fórmulas de fricción y velocidad de equilibrio se realizó mediante una aplicación a un caso particular. Para ello, se consideraron datos globales (estimativos) correspondientes a una sección del Río Dulce frente a la ciudad de Santiago del Estero, Argentina, en una situación de crecida de marzo del 2000. Los datos usados fueron: caudal $Q=1500\text{m}^3/\text{s}$, ancho superficial $T=250\text{m}$, tamaño del sedimento: $d=0.3\text{mm}$ y tirante medio $h_m=3.50\text{m}$. Además, se analizaron sondeos realizados por personal técnico del Consejo Provincial de Vialidad (CPV) a la altura del puente San Francisco Solano sobre la autopista Santiago-La Banda. El análisis de las secciones relevadas indica que para las condiciones hidráulicas presentes durante la crecida se registraron profundidades totales de la sección erosionada del orden los 7 metros en verticales con valores iniciales del orden de los 4 metros.

Las ecuaciones de fricción usadas fueron: Manning-Strickler, Brownlie, Karim & Kennedy, Peterson & Peterson y Farias & Pilán, en combinación con las fórmulas de Shamov, DoT-FHWA, Maza & Echavarría, Levi, van Rijn y Lischvan & Lebediev (Farias y Pilán, 2002). En la Tabla 4 se presentan los resultados de las aplicaciones justamente para un tirante inicial de 4.0 m, observándose que los mejores resultados se obtienen cuando se combina la ecuación para U_e de Lischvan & Lebediev con cualquiera de las fórmulas de fricción. Le sigue la fórmula de Maza y Echavarría, aunque la misma tiende a sub-estimar levemente las socavaciones observadas. Las restantes fórmulas (recordando que las mismas eran para predecir V_c) (Shamov, Levi, DoT-FHWA y van Rijn) tienden sistemáticamente a sobreestimar las socavaciones, aspecto que era previsible, ya que un río de las características del Dulce exhibe un patrón de comportamiento con transporte generalizado de material del lecho durante las crecidas, y nunca llega a alcanzar una condición de transporte asimilable a un estable de movimiento incipiente en todo el contorno de la sección para caudales altos.

Este último aspecto evidentemente se explica por el hecho que estas ecuaciones se basan en la predicción de la velocidad media para una condición de movimiento incipiente y no de transporte generalizado como la que ocurre en el río del ejemplo analizado.

Tabla 4.- Resultados de la aplicación del método generalizado para varias combinaciones de fórmulas de fricción y de velocidad crítica. En este caso se ha analizado una franja con tirante inicial de 4.0 m para el Río Dulce en Santiago del Estero [Datos: $Q=1500\text{m}^3/\text{s}$, $T=250\text{m}$, $d=0.3\text{mm}$, $h_m=3.50\text{m}$].

Formula Vc	Formula Ue	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	b ₀	b ₁	b ₂	α_M	m ₀	m ₁	k ₀	k ₁	h _s
Manning-Strickler	Shamov	21.1	-0.167	0.667	0.5	6.00	0.333	0.167	0.74	0.17	-0.29	1.69	1.43	12.28
Manning-Strickler	DoT-FHWA-HEC#17	21.1	-0.167	0.667	0.5	6.19	0.333	0.167	0.74	0.16	-0.29	1.65	1.43	11.96
Manning-Strickler	Maza-Echavarría	21.1	-0.167	0.667	0.5	3.62	0.200	0.275	0.74	0.29	-0.16	1.03	1.31	6.32
Manning-Strickler	Levi (aprox. pot.)	21.1	-0.167	0.667	0.5	8.29	0.357	0.156	0.74	0.12	-0.31	1.52	1.44	11.22
Manning-Strickler	van Rijn (aprox. pot.)	21.1	-0.167	0.667	0.5	0.34	0.004	0.100	0.74	2.03	0.00	2.09	1.52	17.11
Manning-Strickler	Litschvan-Lebediev	21.1	-0.167	0.667	0.5	4.70	0.280	0.410	0.74	0.27	-0.20	1.35	1.18	6.97
Brownlie	Shamov	13.29	-0.029	0.529	0.389	6.00	0.333	0.167	0.88	0.19	-0.29	1.97	1.31	12.09
Brownlie	DoT-FHWA-HEC#17	13.29	-0.029	0.529	0.389	6.19	0.333	0.167	0.88	0.19	-0.29	1.91	1.31	11.77
Brownlie	Maza-Echavarría	13.29	-0.029	0.529	0.389	3.62	0.200	0.275	0.88	0.33	-0.16	1.18	1.20	6.23
Brownlie	Levi (aprox. pot.)	13.29	-0.029	0.529	0.389	8.29	0.357	0.156	0.88	0.14	-0.31	1.77	1.32	11.05
Brownlie	van Rijn (aprox. pot.)	13.29	-0.029	0.529	0.389	0.34	0.004	0.100	0.88	2.38	0.00	2.45	1.39	16.83
Brownlie	Litschvan-Lebediev	13.29	-0.029	0.529	0.389	4.70	0.280	0.410	0.88	0.31	-0.20	1.53	1.08	6.88
Karim & Kennedy	Shamov	18.19	-0.103	0.603	0.497	6.00	0.333	0.167	0.81	0.18	-0.29	1.82	1.37	12.19
Karim & Kennedy	DoT-FHWA-HEC#17	18.19	-0.103	0.603	0.497	6.19	0.333	0.167	0.81	0.17	-0.29	1.77	1.37	11.87
Karim & Kennedy	Maza-Echavarría	18.19	-0.103	0.603	0.497	3.62	0.200	0.275	0.81	0.31	-0.16	1.10	1.26	6.28
Karim & Kennedy	Levi (aprox. pot.)	18.19	-0.103	0.603	0.497	8.29	0.357	0.156	0.81	0.13	-0.31	1.63	1.39	11.14
Karim & Kennedy	van Rijn (aprox. pot.)	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.34	0.004	0.100	0.81	2.19	0.00	2.25	1.46	16.98
Karim & Kennedy	Litschvan-Lebediev	18.19	-0.103	0.603	0.497	4.70	0.280	0.410	0.81	0.29	-0.20	1.43	1.14	6.93
Peterson & Peterson	Shamov	7.546	0.017	0.437	0.276	6.00	0.333	0.167	0.99	0.21	-0.29	2.17	1.23	11.96
Peterson & Peterson	DoT-FHWA-HEC#17	7.546	0.017	0.437	0.276	6.19	0.333	0.167	0.99	0.21	-0.29	2.11	1.23	11.65
Peterson & Peterson	Maza-Echavarría	7.546	0.017	0.437	0.276	3.62	0.200	0.275	0.99	0.36	-0.16	1.29	1.13	6.17
Peterson & Peterson	Levi (aprox. pot.)	7.546	0.017	0.437	0.276	8.29	0.357	0.156	0.99	0.16	-0.31	1.95	1.24	10.93
Peterson & Peterson	van Rijn (aprox. pot.)	7.546	0.017	0.437	0.276	0.34	0.004	0.100	0.99	2.64	0.00	2.72	1.31	16.64
Peterson & Peterson	Litschvan-Lebediev	7.546	0.017	0.437	0.276	4.70	0.280	0.410	0.99	0.33	-0.20	1.66	1.02	6.82
Farias & Pílan	Shamov	4.78	0.026	0.499	0.213	6.00	0.333	0.167	0.92	0.20	-0.29	2.03	1.28	12.05
Farias & Pílan	DoT-FHWA-HEC#17	4.78	0.026	0.499	0.213	6.19	0.333	0.167	0.92	0.19	-0.29	1.98	1.28	11.73
Farias & Pílan	Maza-Echavarría	4.78	0.026	0.499	0.213	3.62	0.200	0.275	0.92	0.34	-0.16	1.22	1.18	6.21
Farias & Pílan	Levi (aprox. pot.)	4.78	0.026	0.499	0.213	8.29	0.357	0.156	0.92	0.15	-0.31	1.82	1.30	11.01
Farias & Pílan	van Rijn (aprox. pot.)	4.78	0.026	0.499	0.213	0.34	0.004	0.100	0.92	2.46	0.00	2.54	1.36	16.77
Farias & Pílan	Litschvan-Lebediev	4.78	0.026	0.499	0.213	4.70	0.280	0.410	0.92	0.31	-0.20	1.57	1.06	6.86

Otros ejemplos analizados corresponden a condiciones típicas presentes en grandes ríos de llanura, como el Río Paraná y el Arroyo Leyes (Schreider *et al.*, 2001) en la provincia de Santa Fe. En el Río Paraná se analizó el comportamiento de una sección transversal de sumo interés práctico, ya que es la que se localiza en proximidades de la transecta de cruce del Túnel Sub-Fluvial Hernandarias, que une las ciudades de Paraná y Santa Fe. Las secciones observadas y calculadas (luego de la erosión general) se presentan en la Figura 8. Puede observarse el muy buen comportamiento del método generalizado como herramienta de predicción de las erosiones generales en este río, y también la marcada supremacía sobre el método tradicional, el cual tiende a sobre-estimar las profundidades de erosión. Asimismo, las mejores predicciones se obtienen mediante una combinación de la ecuación de fricción de Farias y Pílan para V_r con la ecuación de Lischtvan y Lebediev para U_e . Esta combinación se denominará FP-LL (Farias *et al.*, 2003). Otras combinaciones de ecuaciones de fricción (e.g., Brownlie, Karim-Kennedy, Peterson-Peterson) con la fórmula para la velocidad de equilibrio de Lischtvan y Lebediev también produce predicciones razonables para el Río Paraná.

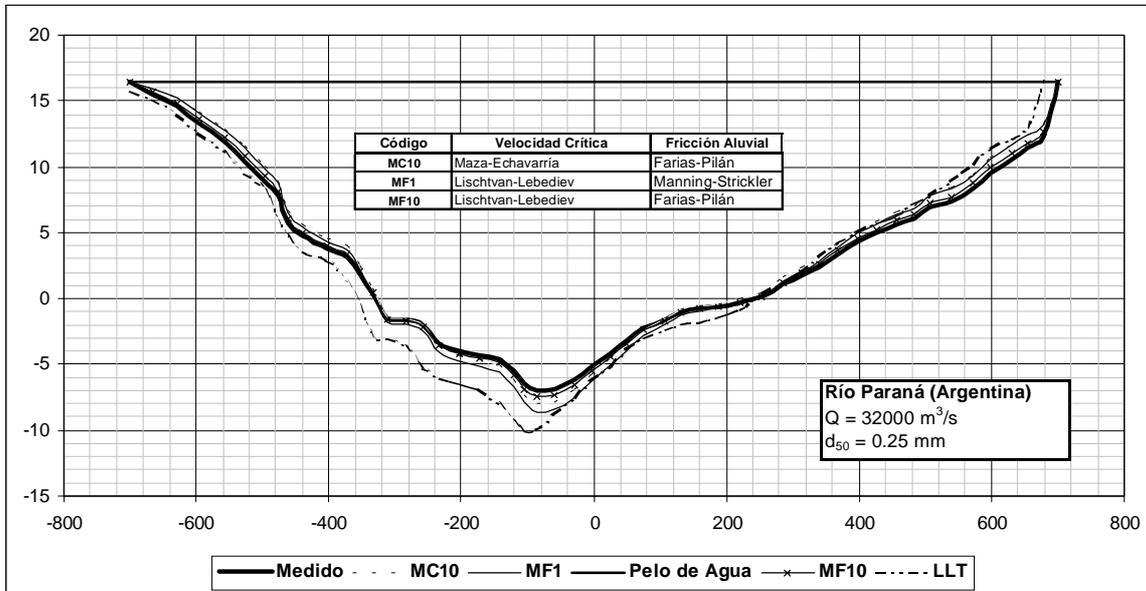


Figura 8.- Aplicación del método generalizado a una sección del Río Paraná.

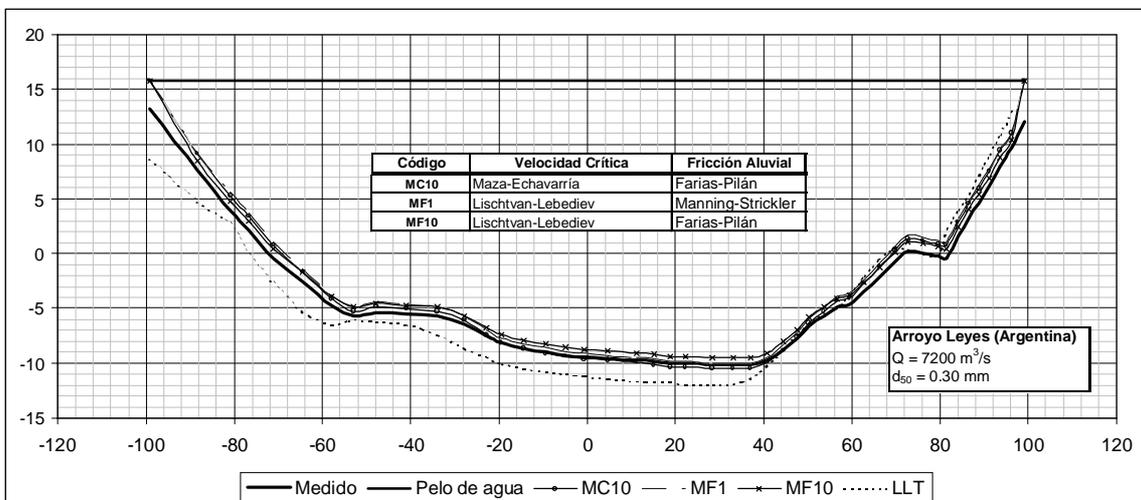


Figura 9.- Aplicación del método generalizado a una sección del Arroyo Leyes.

Las aplicaciones al Arroyo Leyes arrojaron resultados comparables a los obtenidos para el Río Paraná. Nuevamente, las mejores predicciones se obtienen con el método generalizado usando la combinación FP-LL, mientras que el método tradicional también exhibe una marcada tendencia a sobre-estimar las profundidades de erosión. Los resultados de la aplicación de los métodos a una sección transversal del Arroyo Leyes se presentan en la Figura 9.

Un aspecto que también se analizó con la finalidad de evaluar el comportamiento predictivo de la metodología generalizada es el de la distribución lateral de las erosiones. Una simple inspección visual de las Figuras 8 y 9, muestra que las mejores predicciones (menor discrepancia entre valores calculados y observados) se obtienen para las regiones centrales de los cauces, es decir, en las zonas de mayor profundidad del flujo. Para visualizar mejor este indicio de comportamiento, se plotearon las profundidades calculadas versus las observadas en ambos ríos.

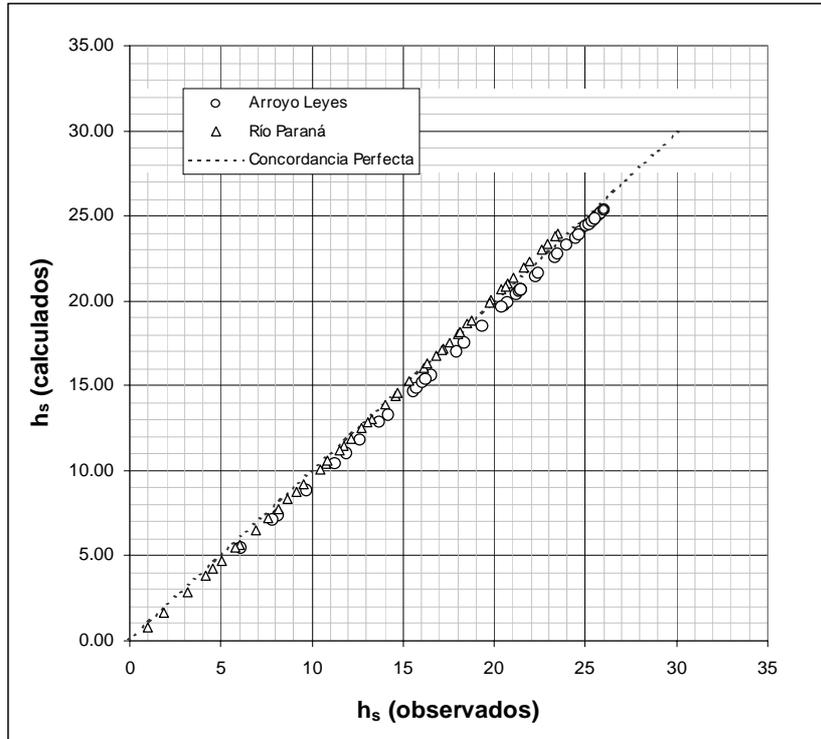


Figura 10.- Comportamiento predictivo del método generalizado en dos grandes ríos de llanura (Leyes y Paraná).

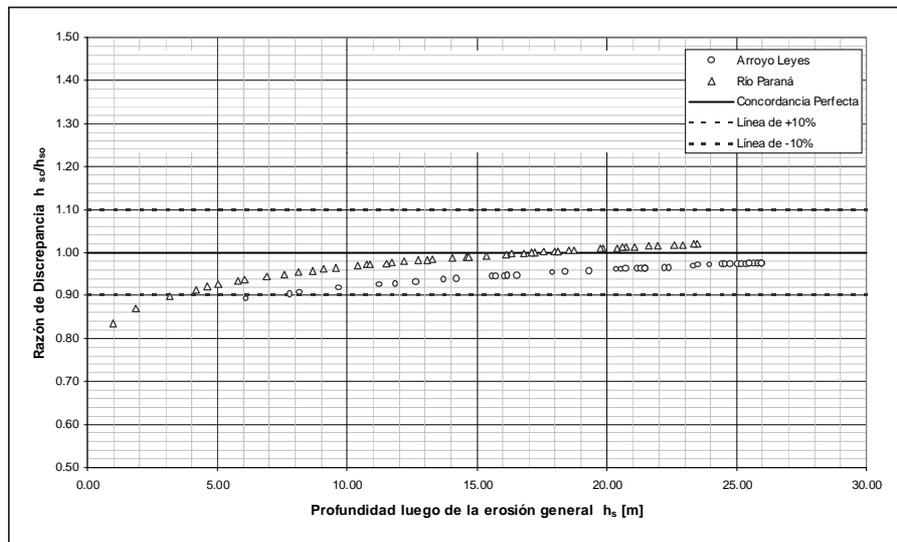


Figura 11.- Sensitividad de las predicciones de h_s con la profundidad del flujo.

Los resultados para la metodología generalizada con la combinación FP-LL se indican en la Figura 10, en la que a pesar de que se observa una buena coincidencia entre valores calculados y observados para todo el rango de profundidades, desde 1 metro hasta 26 metros, pueden advertirse algunas desviaciones para las profundidades más pequeñas. Un análisis más refinado se presenta en la Figura 11, en la que se plotea la razón de discrepancia (definida como la profundidad calculada sobre la observada) versus la profundidad observada. Allí se observa lo antes comentado, aunque para el rango de interés práctico (es decir, las profundidades

máximas de erosión general) la razón de discrepancia se aproxima a la unidad para ambos ríos, mostrando un comportamiento predictivo confiable, teniendo en cuenta las discrepancias típicas que se observan en Hidráulica Fluvial. Por su parte, debe mencionarse que para el rango de profundidades entre 5 metros y 25 metros, todas las predicciones se sitúan en la banda de + - 10%, mientras que para el rango de 15 metros a 25 metros, las predicciones se localizan en la franja de + - 5%, lo cual evidencia la bondad del método propuesto para grandes ríos aluviales en ambientes de llanura.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una revisión del concepto de erosión general en cauces naturales y los métodos para su estimación. Asimismo, luego de analizar los conceptos de velocidad crítica y de equilibrio, se propone una formulación generalizada para calcular la erosión general en ríos con lechos arenosos, que permite seleccionar las ecuaciones de fricción aluvial y velocidad de equilibrio que se consideren adecuadas, en función de los rangos de aplicabilidad de cada una de ellas al caso particular que se esté tratando.

Se ha ilustrado la aplicación práctica de la formulación generalizada a ejemplos de diseño, en los que se muestran las discrepancias que se pueden obtener entre las profundidades de socavación calculadas y medidas según se aplique uno u otro par de fórmulas para V_r y U_e . En ese sentido, para el caso de ríos arenosos de llanura con tirantes máximos del orden de los 5 a 25 metros, las fórmulas que mejores predicciones mostraron fueron las de Lischvan & Levediev y, en menor grado, la de Maza y Echavarría, en combinación con las ecuaciones de fricción de Manning-Strickler, Brownlie, Karim & Kennedy, Peterson & Peterson y Farias & Pilán.

Sobre la base de los resultados obtenidos hasta el presente, se considera oportuno continuar las investigaciones en lo que se refiere a la obtención de ecuaciones más precisas para U_e y V_c , de manera de poder definir mejor los rangos de aplicabilidad de cada una, ya sea para ríos con lecho de arena o de grava, respectivamente, y así precisar los rangos de profundidades válidas para cada una de ellas.

Agradecimiento. Parte de las investigaciones que se presentan en este trabajo han sido financiadas por el Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (CICYT-UNSE) a través de fondos de subsidios y por el CONICET. Los autores también desean expresar su gratitud a Roger Bettess y Christine Lauchlan de HR Wallingford, quienes gentilmente facilitaron documentos usados en esta investigación.

LISTA DE SÍMBOLOS

- A: área de la sección transversal
- B: ancho del cauce
- b: exponente en el método de Mirtskhoulava
- d: tamaño mediano de las partículas de sedimento ($=d_{50}$)
- d_* : parámetro de partícula ($=d \cdot (g \cdot \Delta / v^2)^{1/3}$)

e_c :	coeficiente en el método de Mirtskhoulava
g :	aceleración de la gravedad
h :	profundidad del flujo
h_s :	profundidad del flujo luego de producida la erosión general
k_r :	altura de los elementos de rugosidad (método de Mirtskhoulava)
m_l :	coeficiente en el método de Mirtskhoulava
m_h :	coeficiente en el método de Mirtskhoulava
n :	coeficiente de rugosidad de Manning
Q :	caudal líquido
q :	caudal líquido por unidad de ancho
S :	pendiente longitudinal del cauce
T :	ancho del cauce a nivel de la superficie libre
V :	velocidad media de la corriente
V_c :	velocidad crítica para el inicio del movimiento del material lecho
v_n :	velocidad no-erosiva en las proximidades del lecho
U_e :	velocidad de equilibrio para mantener un transporte generalizado
α :	coeficiente en el método de Lischtvan-Lebediev
β :	coeficiente en el método de Lischtvan-Lebediev
Δ :	densidad relativa del sedimento sumergido
ρ :	densidad del agua
ρ_s :	densidad del sedimento
τ :	tensión de corte en el lecho
τ_* :	tensión adimensional de Shields

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre Pe, J.** (1980). *Hidráulica de Sedimentos*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Bettess, R.** (2002). "A review of predictive methods for general scour". *First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1*. Texas A&M University, College Station, Texas, USA.
- Farias, H. D. y Pilán, M. T.** (2000). "Análisis de Fórmulas de Fricción Aplicables a Canales Arenosos en Régimen". *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 511-520.
- Farias, H.D. & Pilán, M.T.** (2002). "Cálculo de las Profundidades de Socavación General en Cauces Aluviales. Aspectos Teóricos y Aplicaciones". *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, La Habana, Cuba.
- Farraday, R.V. & Charlton, F.G.** (1983). *Hydraulic Factors in Bridge Design*. Hydraulics Research Stations Ltd., Wallingford, Oxfordshire, U.K.
- Franceschi, L.E.** (1984). *Drenaje Vial*. Ed. Fundación J. J. Aguerrevere, Fondo Editorial del Colegio de Ingenieros de Venezuela, Caracas, Venezuela.

Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A. (1984). *Mecánica de Suelos, Tomo III, Flujo de Agua en Suelos*, Editorial Limusa, México, 414 p.

Lauchlan, C. & May, R. (2002). "Comparison of general scour prediction equations for river crossings". *First International Conference on Scour of Foundations, ICSF-1*. Texas A&M University, College Station, Texas, USA, pp. 184-197.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., and Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Co., San Francisco, USA, 522 pp.

Maza Alvarez, J. A. (2000). "Erosión General en Cauces con Material Granular". *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 319-328.

Maza Alvarez, J. A. y Grajales, J. A. (2000). "Velocidades Medias de Inicio de Erosión". *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina. Tomo I, pp. 471-480.

Melville, B. W. & Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications LLC, Littleton, Colorado, USA.

Moreno, C. y Fuentes, R. (1998). "Socavación generalizada; método de cálculo de Lischtván Lebediev y Maza. Verificación experimental". *XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, V 2 pp 149-154. Oaxaca, México.

Przedwojski, B., Blazejewski, R., Pilarczyk, K.W. (1995). *River Training Techniques: Fundamentals, techniques and applications*. A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands.

Schreider, M. I., Scacchi, G., Franco, F., Fuentes, R. y Moreno, C. (2001). "Aplicación del Método de Lischtván y Lebediev al Cálculo de la Erosión General". *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XVI, N°1, pp. 15-26.

U.S. Department of Transportation (1993). *Evaluating Scour at Bridges*. Hydraulic Engineering Circular No. 18, report FHWA-IP-90-017, Federal Highway Administration. Washington, DC, USA.

Weber, J. F. (2003). *Modelación integrada uni y bidimensional de flujo en planicies de inundación*. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos, Fac. de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.