

GEOMETRÍA HIDRÁULICA DE RÍOS DE LLANURA. ENFOQUES ANALÍTICOS CONSIDERANDO LA INFLUENCIA DE LAS MÁRGENES

Hector Daniel Farias

Instituto de Recursos Hídricos (IRHi-FCEyT-UNSE)

Av. Belgrano (S) 1912, (G4200ABT) Santiago del Estero, Argentina. E-mail: H.D.Farias@members.asce.org

Introducción

Las dimensiones y pendiente estables de un río aluvial, lo que comúnmente se denomina "geometría hidráulica", es un tema de indudable interés en hidráulica fluvial, con aplicaciones en el diseño de canales estables, obras de encauzamiento, restauración de cauces, etc.

Objetivos

El objetivo del presente estudio es el de revisar los enfoques analíticos para estimar la geometría hidráulica (hacia aguas abajo) de ríos de llanura, incorporando el efecto de las márgenes en los cálculos de ancho estable y los valores asociados de profundidad y pendiente de régimen.

Geometría Hidráulica de Ríos

La geometría hidráulica de un tramo de río habitualmente se expresa a través de un conjunto de ecuaciones que describen de manera global la forma y tamaño del cauce (representados a través del ancho B y profundidad H de la sección transversal y la pendiente longitudinal S , asumidas como variables dependientes) en función del caudal dominante Q . Es decir: $B, H, S = f_{B,H,S}(Q)$. Estas tres funciones habitualmente se presentan en forma potencial:

$$B = a_0 \cdot Q^{a_1}; H = b_0 \cdot Q^{b_1}; S = c_0 \cdot Q^{c_1}$$

donde a_i, b_i, c_i son coeficientes y exponentes ($i=1,2$) inicialmente obtenidos de forma empírica pero luego validados a través de criterios analíticos. A pesar de la gran complejidad implícita en los procesos morfológicos que determinan las dimensiones de régimen, los exponentes de las relaciones anteriores varían entre rangos relativamente estrechos para el caso de cauces de llanura ($0.46 < a_1 < 0.53$; $0.3 < b_1 < 0.4$; $-0.25 < c_1 < -0.15$, aprox.).

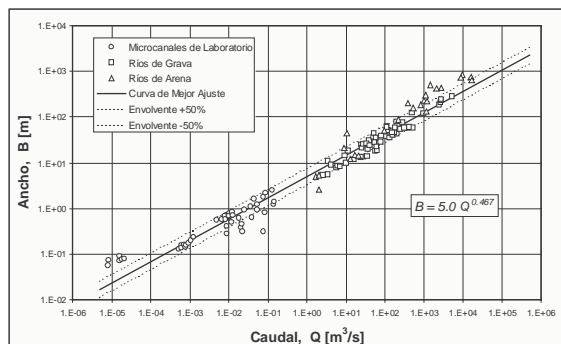


Fig. 1.- Relación entre ancho de régimen y caudal dominante.

Para ilustrar este comportamiento, en la Fig. 1 se presenta la relación observada entre el caudal dominante y el ancho de régimen, cubriendo 10 órdenes de magnitud para el caudal y 5 para el ancho. Los datos incluyen desde microcanales de laboratorio (Armstrong y Metivier, 2003) hasta grandes ríos de llanura (Parker, 2004). Un aspecto interesante que puede observarse en la Fig. 1 es que no obstante la aceptable correlación global, una ecuación en función solamente del caudal no es suficiente para explicar el comportamiento de los datos en todo el rango (se

pueden observar subestimaciones para los microcanales y para los grandes ríos, lo cual estaría indicando que a_0 no necesariamente es constante (suponiendo que a_1 si lo es), sino que depende de otras magnitudes. En la Fig. 2 se presenta la relación adimensional entre ancho y caudal, con lo que la correlación mejora indicando la importancia de considerar el tamaño del sedimento en este caso.

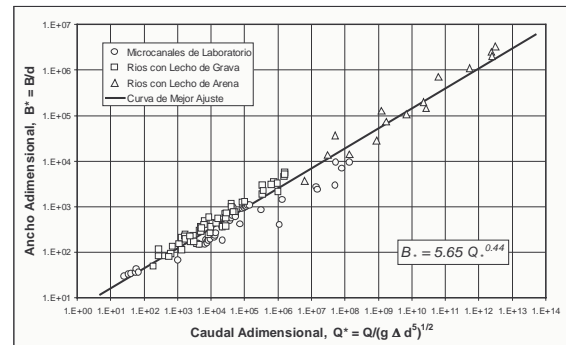


Fig. 2.- Relación adimensional ancho-caudal.

Teniendo en cuenta estas tendencias generales de comportamiento de los ríos, se revisan a continuación los enfoques existentes para la geometría hidráulica.

Teorías sobre Geometría Hidráulica

Existe una gran diversidad de teorías para explicar de alguna manera las tendencias observadas. Recientemente Singh (2003) ha presentado una exhaustiva compilación de métodos, incluyendo los criterios empíricos, semi-empíricos y racionales. Estos últimos pueden dividirse a su vez en enfoques mecanicistas y criterios basados en hipótesis de comportamiento extremo.

En el contexto de este estudio se tratan los denominados "métodos analíticos" que incluyen a las hipótesis de comportamiento extremo. En particular, se analiza el criterio de máxima eficiencia en el transporte sólido (METS) que se corresponde con el de minimización de la potencia de la corriente por unidad de longitud del cauce (Mengoni et al, 2004). El criterio METS, inicialmente puesto en práctica por White et al. y Chang a fines de la década del '70 y comienzos del '80 (Mengoni et al., 2004) fue inicialmente validado con datos de canales estables y pequeñas corrientes con lecho de grava. Verificaciones posteriores demostraron que en la forma en que estaban desarrollados los algoritmos computacionales y algunas hipótesis adoptadas conducían a predicciones que tienden sistemáticamente a subestimar el ancho en la mayoría de los casos de ríos naturales y también de micro-cauces experimentales (Eaton y Millar, 2004). Esta tendencia se debe a la carencia de una componente en el análisis que considere el efecto de las márgenes en el proceso de adquisición de un ancho estable en coincidencia con la minimización de la pendiente o la maximización de la capacidad de transporte sólido.

Efecto de las Márgenes

En el caso de ríos de llanura el efecto de las márgenes cobra importancia en una serie de componentes, a saber:

(a) propiedades texturales y geomecánicas de los materiales que componen la margen; (b) tipo y densidad de la vegetación en las márgenes; (c) geometría de la sección en la región de márgenes, que en rigor está relacionada con la geotecnia y la vegetación.

Con relación al primer punto, se han desarrollado estudios recientes que incluyen explícitamente esta componente (Eaton y Millar, 2004). Con respecto a la incidencia de la vegetación, prácticamente la única manera de incluirla es a través de una tipificación de casos posibles y la calibración de factores empíricos para cada uno de ellos (Anderson et al., 2004) aunque también es una solución elegante la consideración de este factor a través de su efecto directo en la resistencia a la erosión de las márgenes y por tanto se puede considerar corrigiendo los indicadores geotécnicos (Eaton y Millar, 2004).

Con respecto al punto (c), el mismo ya fue tenido en cuenta en estudios anteriores (Farias, 1993a,b) y en una investigación reciente se encontró que el método de Wallingford WBP mejora significativamente sus predicciones si se considera que el cauce estable posee márgenes curvilíneas en lugar de rectas (Mengoni et al., 2004).

Tabla 1. Ecuaciones Adimensionales de Régimen basadas en el criterio METS. $P_* = P/d$; $R_* = R/d$; $S_* = S/\Delta$; $Q_* = Q/(g\Delta d^5)^{1/2}$; $C_{S*} = Q_s/Q$; $d_* = [(g\Delta/v^2)^{1/3} \cdot d]$; $\Delta = (\rho_s/\rho - 1)$. P: perímetro mojado; R: radio hidráulico; S: pendiente. En ríos de llanura: $P \approx B$, $R \approx H$.

Código	Ecuaciones Teóricas de Régimen
E-H F&T: Engelund & Hansen	$P_* = 0.950 d_*^{0.068} C_{S*}^{-0.009} Q_*^{0.497}$ $R_* = 0.954 d_*^{-0.216} C_{S*}^{-0.022} Q_*^{0.399}$ $S_* = 9.766 d_*^{-0.040} C_{S*}^{0.666} Q_*^{-0.200}$
A-W F: White et al T: Ackers & White	$P_* = 0.076 d_*^{0.666} C_{S*}^{-0.023} Q_*^{0.555}$ $R_* = 1.213 d_*^{-0.432} C_{S*}^{-0.120} Q_*^{0.357}$ $S_* = 0.918 d_*^{0.419} C_{S*}^{0.521} Q_*^{-0.193}$
B-B F&T: Brownlie	$P_* = 0.202 d_*^{0.253} C_{S*}^{-0.067} Q_*^{0.524}$ $R_* = 0.624 d_*^{-0.141} C_{S*}^{-0.110} Q_*^{0.368}$ $S_* = 11.097 d_*^{-0.098} C_{S*}^{0.605} Q_*^{-0.225}$
V-R F&T: Van Rijn	$P_* = 0.584 d_*^{0.210} C_{S*}^{-0.050} Q_*^{0.492}$ $R_* = 0.203 d_*^{-0.085} C_{S*}^{-0.139} Q_*^{0.398}$ $S_* = 4.680 d_*^{-0.210} C_{S*}^{0.504} Q_*^{-0.233}$
P-P F&T: Peterson & Peterson	$P_* = 0.201 d_*^{0.199} C_{S*}^{-0.104} Q_*^{0.520}$ $R_* = 0.709 d_*^{-0.131} C_{S*}^{-0.077} Q_*^{0.375}$ $S_* = 23.342 d_*^{0.130} C_{S*}^{0.779} Q_*^{-0.213}$
K-K F&T: Karim & Kennedy	$P_* = 0.488 d_*^{0.213} C_{S*}^{-0.043} Q_*^{0.500}$ $R_* = 0.239 d_*^{-0.134} C_{S*}^{-0.172} Q_*^{0.381}$ $S_* = 8.467 d_*^{0.010} C_{S*}^{0.642} Q_*^{-0.221}$

En la Tabla 1 se presenta un menú de seis conjuntos de ecuaciones de régimen (adimensionales) para predecir la geometría hidráulica de cauces de llanura, obtenidas a partir de la implementación computacional del principio METS en combinación con seis pares de funciones de fricción aluvial y transporte de sedimentos de bondad comprobada para el caso de ríos de llanura. Estas

ecuaciones fueron obtenidas analíticamente (Farias, 1993a) para una sección transversal de geometría trapecial en la que la inclinación de los taludes (m) se estimó a partir de una fórmula empírica del tipo $m = k_0 d_*^{k_1} Q_*^{k_2}$ (donde k_0, k_1, k_2 son constantes) calibrada con datos de canales de riego excavados en material aluvial. El criterio fue el de lograr una geometría compensada teniendo en cuenta que las márgenes curvilíneas se pueden describir a través de una fórmula exponencial (Farias, 1993b).

Aplicación, Discusión y Conclusiones

La verificación de la bondad de las ecuaciones de geometría hidráulica se llevó a cabo mediante una comparación de las predicciones con datos de ríos de llanura. Asimismo, con la misma base de datos se evaluaron otras metodologías publicadas en la literatura. Como resultado de la contrastación con datos de campo se encontraron las siguientes características de comportamiento: (1) en la mayor parte de los casos, las ecuaciones de régimen racionales basadas en el principio METS producen mejores predicciones que las resultantes de los métodos empíricos y semi-empíricos. Sin embargo, debe destacarse que las ecuaciones originales de Lacey, que se calibraron con muy pocos datos, muestran exponentes del caudal muy cercanos a los teóricos; (2) de los grupos de ecuaciones basados en el principio METS, el grupo B-B presenta muy buenas estimaciones de la profundidad, lo que confirma las bondades del predictor de Brownlie para fricción en cauces arenosos; (3) la ecuación P-P se comporta satisfactoriamente para predecir el ancho en grandes ríos, aunque la mayoría tiende a subestimar el ancho y sobreestimar la pendiente, con lo que resulta necesario corregir los coeficientes en las ecuaciones de la Tabla 1. Para ello, se considera adecuado el criterio de Eaton y Millar (2004) para incluir los efectos de resistencia de márgenes (incorporando el clasificador de tipos de vegetación) sintetizados en el ángulo de fricción interna aparente (ϕ) del material.

Referencias Bibliográficas

- Anderson, R.J., Bledsoe, B.P. & Hession, W.C. (2004). "Width of Streams and Rivers in Response to Vegetation, Bank Material, and other factors". *Journal of the American Water Resources Association*, Paper No. 03104, October 2004, pp. 1159-1172.
- Armstrong L. and Métivier, F. (2003). "Scaling law for the equilibrium width". *EGS/AGU/EUG Joint Assembly*, Nice, France.
- Eaton, B.C., Millar, R.G. (2004). "Optimal alluvial channel width under a bank stability constraint". *Geomorphology*, Vol. 62, pp. 35-45.
- Farias, H.D. (1993a). "Menu de Ecuaciones de Diseño para Canales Arenosos en Régimen", *Revista Latinoamericana de Hidráulica*, IAHR, No. 6, pp. 1-12.
- Farias, H.D. (1993b). "Forma de la Sección Transversal en Canales Aluviales Estables", *Revista Latinoamericana de Hidráulica*, IAHR, No. 7, pp. 24-35.
- Mengoni, B., Paris, E. & Bettess, R. (2004). "Review of analytical approach to river regime cross-section". *Proceedings River Flow 2004*, Naples, Italy.
- Parker, G. (2004). *1D Sediment Transport Morphodynamics with Applications to Rivers and Turbidity Currents*. e-Book. [http://www.ce.umn.edu/~parker/morphodynamics_e-book.htm].
- Singh, V.P. (2003). "On the theories of hydraulic geometry". *International Journal of Sediment Research*, Vol. 18, No. 3, 2003, pp. 196-218.