

ANÁLISIS DE PROCESOS MORFOLÓGICOS DE LARGO PLAZO EN UN RÍO ALUVIAL AFECTADO POR ACCIONES ANTROPOGÉNICAS

Hector Daniel Farias¹, Lucas G. Domínguez Ruben² y Jorge Prieto Villarroya¹

¹Instituto de Recursos Hídricos FCEyT-UNSE, Argentina

²CONICET-FICH-UNL, Argentina

E-mail: h.daniel.farias.1@gmail.com, ldominguezruben@gmail.com, jorgeprietovillarroya@yahoo.com.ar

Introducción

La evaluación del desarrollo y evolución los procesos morfológicos potenciales ante cambios (naturales o artificiales) en las variables de control en ríos de llanura es un aspecto de singular importancia en la planificación y proyecto de obras en ambientes fluviales. Por ejemplo, la construcción de una presa genera un embalse que regula los caudales derivados aguas abajo, modificando los gastos dominantes que controlan la estabilidad dinámica de cauces aluviales, y generando respuestas geomorfológicas diversas.

Objetivos

En este trabajo se presenta un criterio de análisis, basado en una cuantificación de la relación cualitativa de Lane, que posibilita el análisis conceptual de los procesos morfológicos ante variaciones de las variables de control, y se expone un ejemplo concreto de aplicación, con implicancias en la planificación de obras en ríos de llanura.

Materiales y métodos

La formulación de Lane (1955) establece una relación funcional “cualitativa” entre las variables de control en un río aluvial. La misma puede escribirse como sigue (Dust & Wohl, 2012):

$$Q \cdot S \propto Q_s \cdot d$$

donde: Q : caudal líquido (gasto dominante); S : pendiente; Q_s : carga de sedimentos; d : tamaño del material de fondo ($= d_{50}$). En la relación anterior Q y S representan las “variables hidráulicas”, mientras que Q_s y d son las “variables sedimentológicas”. La relación especifica un “balance” entre las variables hidráulicas y sedimentológicas en un tramo de curso fluvial en una condición de “equilibrio dinámico”.

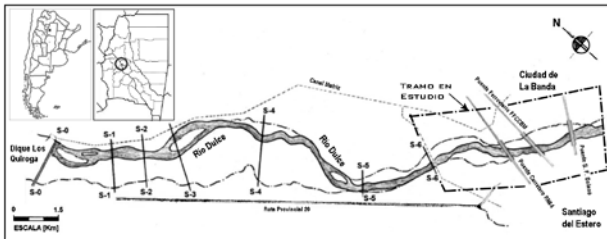


Figura 1.- Ubicación del área de estudio.

El segmento de curso fluvial en estudio (Fig.1), que se denomina en este contexto “tramo urbano del Río Dulce”, exhibe un funcionamiento hidrológico claramente diferenciado a partir de la construcción de la presa de embalse de Río Hondo, ubicada 68 km aguas arriba del tramo considerado, la cual comenzó a operar en el año 1967. En virtud de ello, se analizaron dos series de caudales: (1) Una primera serie para la “condición natural del río”, que comprende aforos en la estación “El Sauce”, unos 15 km aguas arriba del emplazamiento del Dique Derivador de Los Quiroga. Esta serie comprende valores de caudales máximos medios diarios (QMD) colectados desde el año hidrológico 1926-1927 hasta el 1963-1964. Es decir, totaliza 38 años de registro. (2) La segunda serie corresponde a los caudales derivados desde el inicio de operaciones del embalse de Río Hondo hasta la actualidad. Los años cubiertos son desde 1968 hasta el 2005, totalizando una longitud de

registro también de 38 años. El análisis estadístico de las series produjo las funciones de frecuencia que se presentan en la Fig.2.

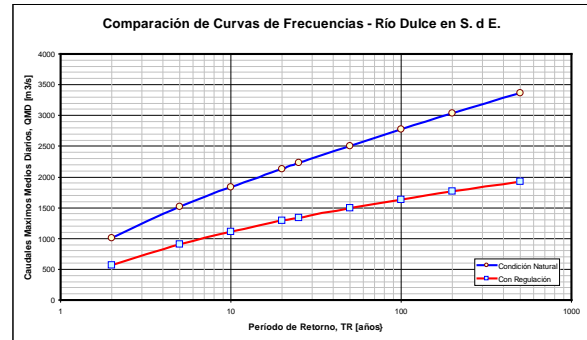


Figura 2.- Funciones de frecuencia (condición natural y perturbada).

Para la cuantificación de la relación funcional de Lane, uno de los enfoques se deriva a partir de los fundamentos de la “Teoría del Régimen” (e.g., Chang, 1988) y los estudios asociados a la “Geometría Hidráulica” (Julien, 2002) de cauces fluviales. En efecto, en Geomorfología Fluvial es práctica común aceptar relaciones tipo potenciales (“power-law”) entre las variables involucradas. De esta manera, la relación puede expresarse:

$$Q \cdot S \propto Q_s \cdot d \Rightarrow Q^k S^{k_1} = k_0 Q_s^{k_2} d^{k_3}$$

donde los exponentes k_i ($i = 1, 2, 3, 4$) son constantes numéricas (positivas y adimensionales). En particular, el coeficiente k_0 depende del sistema de unidades usado para expresar Q , Q_s y d . A partir de esta expresión se puede obtener una ecuación para la pendiente S , en la forma:

$$S = \left(k_0 d^{k_3} Q_s^{k_2} Q^{-k_1} \right)^{1/k_2} = k_0^{1/k_2} d^{k_3/k_2} Q_s^{k_2/k_2} Q^{-k_1/k_2}$$

O bien:

$$S = c_0 d^{a_1} Q_s^{a_2} Q^{-a_3}$$

donde: $c_0 = k_0^{1/k_2}$; $c_1 = k_3/k_2$; $c_2 = k_2/k_2$; $c_3 = k_1/k_2$

Como puede observarse, la última tiene la forma de una ecuación del tipo “teoría del régimen” para la pendiente. Escribiendo la concentración volumétrica total de sedimentos como $C_s = Q_s/Q$, la ecuación puede reescribirse como sigue:

$$S = a_0 d^{a_1} C_s^{a_2} Q^{-a_3}$$

(donde $a_0 = c_0$, $a_1 = c_1$, $a_2 = c_2$, $a_3 = c_3 - c_2$).

Muchas ecuaciones publicadas en la literatura pueden expresarse en este formato (“Lane cuantitativa”) y el mismo puede servir para inferir tendencias evolutivas (a mediano y largo plazo) de ríos alterados en su condición natural de equilibrio dinámico por acciones antropogénicas (e.g., construcción de presas, encauzamientos, canalizaciones, etc.).

Análisis de resultados

La relación de Lane modificada puede utilizarse para evaluar el comportamiento del río Dulce frente a la ciudad de Santiago del Estero, Argentina (Fig.1). En ese tramo, y con el fin de proteger a la ciudad (emplazada en la paleo-planicie inundable del río) de las inundaciones producidas por desbordamiento en el cauce, se construyó (en 1945) un dique longitudinal de defensa sobre la

margen derecha, sobre el cual en la actualidad se encuentra la avenida Costanera Nuñez del Prado. A su vez, y con el objeto de mantener el cauce lo suficientemente alejado del terraplén de defensa, se construyó un conjunto de espigones transversales espaciados entre sí una distancia calculada para producir zonas de escurrimiento inactivo en el espacio inter-espigón que fuesen rellenadas por la deposición de sólidos transportados por el río (Fig.3). El funcionamiento de la obra fue satisfactorio al punto tal que en la actualidad los depósitos sedimentarios han sido ocupados por caminos, paseos, campos recreativos, etc. (Figura 4). Pero su efecto también ha producido una serie de consecuencias en el sistema fluvial.



Figura 3.- Obras de Control en la Margen Derecha del Río.

La rigidez de los espigones indujo al río a adoptar como contorno de su cauce activo sobre margen derecha a la línea definida por los extremos libres de los espigones, especialmente en el tramo comprendido entre el puente ferroviario del FCBM y la autopista Santiago - La Banda. Este alineamiento casi recto del río en este tramo exhibe rasgos de inestabilidad morfológica presumiblemente generadas por las limitaciones que posee el cauce para hacer variar la posición de su "thalweg" (línea de máxima profundidad) con el fin de ajustarse a los cambios en los caudales. En efecto, la teoría de mínima tasa de disipación de energía [$\gamma QS \rightarrow \text{mín}$] establece que, para alcanzar un estado de cuasi-equilibrio dinámico, un río cambiará su rugosidad, transporte de sedimentos, geometría del cauce, configuración planimétrica y perfil longitudinal del lecho con el único objetivo de minimizar su tasa de disipación de energía, y este valor mínimo es compatible con las restricciones aplicadas al río. Aplicando este concepto al caso en estudio, el mismo indica que, si un río estable debe tener capacidad de adaptación a condiciones hidro-sedimentológicas variables, un curso meandriforme, para caudales bajos, debería desplazar lateralmente su thalweg e incrementar la longitud real del flujo. Con ello se reduciría la pendiente, lo cual es consistente con la condición [$\gamma QS \rightarrow \text{mín}$]. Además, ya que la capacidad de

transporte es proporcional al caudal elevado a una potencia >1 , durante los flujos bajos se produciría deposición de materiales sólidos y formación de bancos alternados. Este fenómeno se verifica totalmente en el tramo del río Dulce bajo estudio. En crecida el thalweg tiende a rectificarse y los bancos de sedimentos son erosionados hasta que el flujo satisfice su capacidad de transporte correspondiente a ese caudal. En cambio, un alineamiento recto no permite este funcionamiento flexible y el río debe buscar otros medios para equilibrar la potencia del flujo con la capacidad de carga, por ejemplo erodando el lecho y las márgenes, y también formando islas.

En este segmento, antes de las obras de regulación de 1967, el río exhibía un patrón meandriforme suave, con una sinuosidad del orden de 1.25. Actualmente, el curso presenta una sinuosidad de 1.08 y un trazado de curvas alternadas suaves, ya que no alcanza a desarrollar meandros definidos (está evolucionando hacia un patr) en virtud de las restricciones a la erosión de márgenes impuestas por las obras laterales, y una disminución del caudal dominante (del orden del 40%) por efecto de la regulación de caudales. Ello genera un incremento de la pendiente de entre un 5% y un 11%, dependiendo de la ecuación de régimen que se aplique. Los relevamientos de campo indicaron también un incremento en el tamaño del sedimento entre 1970 y 2010 de 0.36 mm a 0.44 mm, con un aumento de la potencia por unidad de ancho. Si se tiene en cuenta esta situación, la pendiente se incrementa entre un 16% a 22%. Téngase en cuenta que la disminución observada de la sinuosidad fue del 16%, lo cual demuestra claramente a efectividad del análisis basado en la relación de Lane, en su versión cuantitativa.

Conclusiones

Se desarrolló una versión cuantitativa de la clásica relación de Lane, incorporando criterios de estabilidad basados en la mecánica del transporte de sedimentos y la geomorfología fluvial. El enfoque basado en criterios energéticos, y elementos de la teoría del régimen para cauces aluviales en equilibrio dinámico, permite el análisis de tendencias evolutivas de cauces fluviales ante cambios en las variables de control. La formulación propuesta se aplicó en un caso para evaluar la respuesta de un segmento de río ante alteraciones de la condición de equilibrio impuestas por acciones antropogénicas, encontrándose resultados altamente satisfactorios..

Referencias bibliográficas

- Chang, H.H. (1988). *Fluvial Processes in River Engineering*. Wiley Interscience, 432.
- Dust, D. & Wohl, E. (2012). "Conceptual model for complex river responses using an expanded Lane's relation". *Geomorphology*, 139-140, pp 109-121.
- Julien, P. Y. (2002) *River Mechanics*. Cambridge Univ Press, 456 p.



Figura 4.- Diversidad de Obras de Infraestructura proyectadas en la planicie aluvial del tramo urbano del Río Dulce.