

# ANÁLISIS CONCEPTUAL Y CUANTIFICACIÓN DE LA RELACIÓN DE LANE PARA PREDECIR TENDENCIAS EVOLUTIVAS DE CAUCES FLUVIALES

Hector Daniel Farias , Lucas G. Domínguez Ruben

Instituto de Recursos Hídricos, FCEyT-UNSE, Santiago del Estero, Argentina.

hector.daniel.farias.1@gmail.com ; ldominguezruben@gmail.com

## Introducción

La relación propuesta por Lane se ha usado en hidráulica fluvial a lo largo de las seis últimas décadas como una herramienta conceptual para inferir tendencias de comportamiento y eventuales respuestas de los ríos ante cambios en algunas variables de control, por ejemplo, en el caso de construcción de obras hidráulicas en los cursos fluviales. La formulación, de carácter cualitativo, expresa una relación funcional entre el caudal, la pendiente, la carga sólida y el tamaño del sedimento, en la forma de un balance que resume el efecto combinado de las variables hidráulicas y sedimentológicas (Dust & Wohl, 2012).

## Análisis del Criterio de Lane

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:

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

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” (ilustración 1) entre las variables hidráulicas y sedimentológicas en un río (en realidad, un tramo de curso fluvial) en una condición de “equilibrio dinámico”.

En virtud de ello, la misma se interpreta a través de la “metáfora de la balanza” (ilustración 1) (introducida por Borland, y generalizada por muchos otros autores).

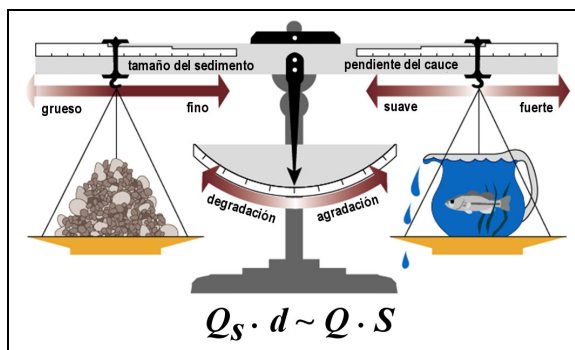


Ilustración 1. Metáfora de la Balanza de Lane (según Borland)

Como se trata de una “relación cualitativa” existen varios enfoques que intentan una “cuantificación” usando los

conceptos modernos de la mecánica del transporte de sedimentos y la estabilidad de cauces fluviales.

## Cuantificación de la Relación de Lane

Se pueden formular diferentes enfoques para acometer la cuantificación de la relación funcional previamente presentada. Por ejemplo, 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 de la siguiente manera:

$$Q \cdot S \propto Q_s \cdot d \Rightarrow Q^k S^{k_2} = k_0 Q_s^{k_3} d^{k_4}$$

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 expresión para la pendiente S.

$$S = (k_0 d^{k_4} Q_s^{k_3} Q^{-k_1})^{1/k_2} = k_0^{1/k_2} d^{k_4/k_2} Q_s^{k_3/k_2} Q^{-k_1/k_2}$$

O bien:

$$S = c_0 d^{c_1} Q_s^{c_2} Q^{-c_3}$$

donde:  $c_0 = k_0^{1/k_2}$ ;  $c_1 = k_4/k_2$ ;  $c_2 = k_3/k_2$ ;  $c_3 = k_1/k_2$

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 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.).

Entre las relaciones de régimen disponibles en la literatura se destacan las de Julien. Entre varias de las versiones presentadas, en el libro “River Mechanics” (2002, pp 176), se presentan las siguientes:

$$B = 1.33 d^{-0.11} S^{-0.22} Q^{0.44}$$

$$h = 0.20 d^{0.17} S^{-0.17} Q^{0.33}$$

$$V = 3.76 d^{-0.05} S^{0.39} Q^{0.22}$$

$$\tau_* = 0.121 d^{-0.83} S^{0.83} Q^{0.33}$$

A partir de esta última ecuación, y considerando la fórmula de transporte siguiente:

$$q_s \approx 18 g^{1/2} d^{3/2} \tau_*^2$$

(en la que  $q_s$  se expresa en  $m^2/s$ ,  $g$  en  $m/s^2$  y  $d$  en m) se puede encontrar una versión cuantitativa similar a la relación de Lane.

Combinando esta última expresión con la primera de las ecuaciones de régimen del conjunto de Julien [ $B = f(Q, d, S)$ ] se obtiene:

$$Q_s \cdot d^{0.28} \approx Q^{1.11} \cdot S^{1.44}$$

Esta última expresión (en la que  $Q$  y  $Q_s$  se expresan en  $m^3/s$  y  $d$  en metros) podría interpretarse como una suerte de "cuantificación de la relación de Lane".

En el análisis de la teoría del régimen aplicada a canales aluviales estables, Farias (1995) aplicó en forma combinada relaciones de resistencia al flujo, transporte de sedimentos y estabilidad lateral de márgenes para obtener ternas de ecuaciones para el ancho, profundidad y pendiente de cauces en régimen, del tipo:  $B, H, S = f_{B,H,S}(d, C_s, Q)$ . En particular, las ecuaciones para la pendiente se expresan (en unidades SI):

$$S = 14.65 d^{0.541} C_s^{0.605} Q^{-0.224} \quad [\text{BBC}]$$

$$S = 16.04 d^{0.555} C_s^{0.630} Q^{-0.192} \quad [\text{KKM}]$$

$$S = 11.50 d^{0.643} C_s^{0.497} Q^{-0.292} \quad [\text{PLG}]$$

La codificación de las mismas indica la combinación de funciones de fricción, transporte y estabilidad lateral usadas para su obtención. En las ecuaciones  $d$  debe expresarse en metros,  $Q$  en  $m^3/s$  y  $C_s$  es la concentración volumétrica total de material sólido en transporte (adimensional).

Tal como se ha expresado previamente, cada una de estas ecuaciones resume en sí misma una versión cuantitativa de la relación de Lane. En el caso de las fórmulas de régimen, debe mencionarse que su ámbito de aplicación corresponde a ríos de llanura con lechos arenosos.

### Aplicación de Principios Energéticos

Para la caracterización de la estabilidad morfológica de cauces fluviales, varios de los criterios existentes se basan en la consideración de conceptos energéticos, esencialmente en distintas maneras de expresar la "potencia de la corriente".

La potencia del flujo (o "stream power") es una magnitud de importancia trascendente en la caracterización de los procesos fluvio-morfológicos. La misma ha sido usada como factor altamente influyente en estudios de transporte de sedimentos, fundamentalmente a partir de los trabajos de Bagnold y posteriormente Yang (Yalin & da Silva, 2001) y también en morfología fluvial, especialmente por parte de Chang (1988).

Este concepto se aplica de diferentes maneras a un tramo de curso fluvial, de modo que según el autor de que se trate la potencia aparece presentada en varias versiones posibles. En

un principio se pueden presentar las siguientes:

Potencia Total del Flujo en un tramo de Longitud  $L$  (Chang, 1988):

$$\Omega_T = \int_L \rho \cdot g \cdot Q \cdot S \cdot dx \approx \rho \cdot g \cdot Q \cdot S \cdot L$$

Potencia del Flujo por unidad de longitud (Chang, 1988):

$$\Omega_L = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S$$

Potencia Unitaria del Flujo (por unidad de peso del fluido) (Yang):

$$\Omega_U = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot S \cdot L) / (\rho \cdot g \cdot A \cdot L) = V \cdot S$$

Potencia del Flujo por unidad de área del lecho (Bagnold):

$$\Omega_A = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot S \cdot L) / (P \cdot L) = (\rho \cdot g \cdot A \cdot V \cdot S \cdot L) / (P \cdot L) = \rho \cdot g \cdot R \cdot S \cdot V = \tau \cdot V$$

Potencia del Flujo por unidad de ancho del lecho (van den Berg):

$$\Omega_B = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot S \cdot L) / B$$

Debe tenerse especial cuidado con la utilización de estos conceptos cuando se aplican al estudio de la geometría hidráulica de cauces aluviales, ya que el uso de una u otra versión de la "potencia de la corriente" puede derivar en resultados diferentes. A continuación se presentan aplicaciones de estos principios como herramientas para cuantificar la relación de Lane.

En un análisis tendiente a la "Cuantificación de la Relación de Lane", H. H. Chang (1988, pp 284-285) presentó un diagrama (Ilustración 2) que relaciona las variables  $Q, S, d, B, h$  a partir del cual puede calcularse la descarga de sedimentos  $Q_s$ .

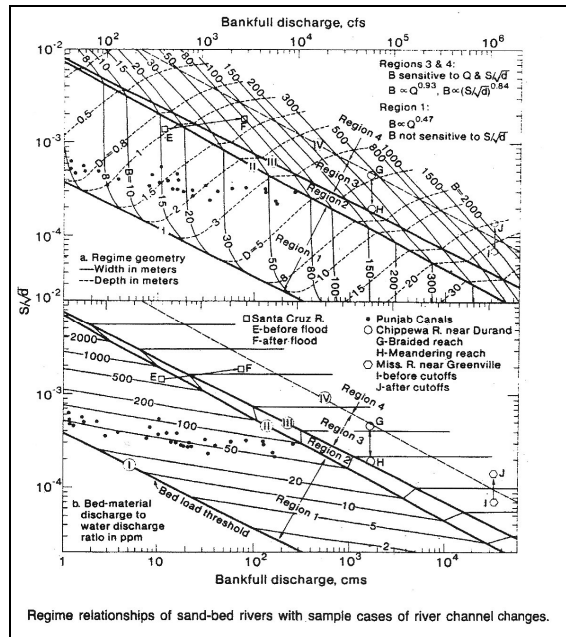


Ilustración 2. Diagrama de estabilidad de Chang (1988)

En el diagrama, la Región 1 corresponde a la siguiente ecuación (en unidades SI):

$$S/d^{1/2} = 5.27 \times 10^{-5} C_s^{0.58} Q^{-0.17}$$

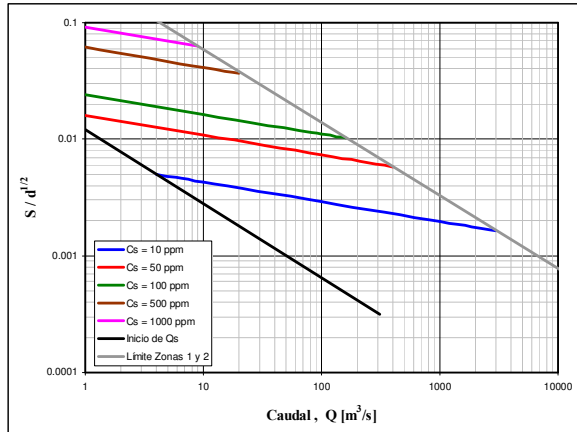
En ella,  $d$  se expresa en mm,  $C_s$  en ppm en peso y  $Q$  en  $m^3/s$ .

Si en esta ecuación se expresa  $d$  en metros y  $C_s$  en forma adimensional en volumen (es decir,  $C_s = Q_s/Q$  expresando ambos caudales en  $m^3/s$ ), la ecuación anterior puede escribirse como sigue:

$$S = 8.86 d^{0.50} C_s^{0.58} Q^{-0.17}$$

Esta es una típica ecuación al estilo “Teoría del Régimen” y en definitiva, permite ser usada como una versión cuantitativa de la Relación de Lane.

Debe mencionarse que el diagrama (reproducido de la publicación original) presenta algunas inconsistencias por errores en la conversión de unidades del sistema inglés al SI. En la gráfica siguiente se presenta una versión (de los autores) corregida del diagrama.



**Ilustración 3.** Diagrama de Chang (revisado)

Otro de los enfoques energéticos al problema ha sido formulado por Yang (1996). De acuerdo a este autor, el transporte de partículas sólidas, tanto en suspensión como en carga de lecho, es el factor de mayor peso en los procesos morfológicos que suceden en ríos aluviales. Su cuantificación resulta dificultosa debido a la gran cantidad de variables que gobiernan el fenómeno. En su primer análisis podría plantearse una relación funcional que describa el proceso de la siguiente manera:

$$C_{ST} = \varphi_1(V \cdot S, g, h, \nu, W, d_s)$$

en la que  $C_{ST}$  es la concentración total de sedimentos,  $V \cdot S$  es la potencia unitaria de la corriente,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $h$  la profundidad media del agua o radio hidráulico,  $\nu$  la viscosidad cinemática del agua,  $W$  la velocidad media de sedimentación en agua tranquila de las partículas sólidas, y  $d_s$  el tamaño medio de los granos de sedimento.

Aplicando el teorema “ $\Pi$ ” de Buckingham se puede llegar a la expresión:

$$C_{ST} = \varphi_2(V \cdot S/W, U_* / W, W d_s / \nu)$$

en la que  $U_* = (g \cdot h \cdot S)^{1/2}$  es la velocidad de cizallamiento sobre el lecho del cauce.

Utilizando esta ecuación y mediante un análisis de regresión múltiple sobre un gran volumen de datos (tanto de canales de laboratorio como de ríos reales), Yang (1996) encontró que el transporte de sedimentos (cuantificado a través de su concentración total) podía expresarse como una función potencial simple de la potencia unitaria adimensionalizada, es decir:

$$C_{ST} = \alpha (V \cdot S/W)^\beta$$

donde  $\alpha = f_\alpha(U_* / W, W d_s / \nu)$  y  $\beta = f_\beta(U_* / W, W d_s / \nu)$  son los coeficientes de la ecuación.

La ecuación deducida por Yang es:

$$\log C_{ST} = [5,165 - 0,153 \log(W d_s / \nu) - 0,297 \log(U_* / W)] + [1,780 - 0,360 \log(W d_s / \nu) - 0,480 \log(U_* / W)] \cdot \log(VS/W)$$

la que puede escribirse sintéticamente como:

$$\log C_{ST} = \tilde{\alpha} + \tilde{\beta} \cdot \log\left(\frac{VS}{W}\right)$$

con:

$$\tilde{\alpha} = 5,165 - 0,153 \log(W d_s / \nu) - 0,297 \log(U_* / W)$$

$$\tilde{\beta} = 1,780 - 0,360 \log(W d_s / \nu) - 0,480 \log(U_* / W)$$

Estas ecuaciones pueden manipularse algebraicamente para posteriormente ser utilizadas con la finalidad de explicar y predecir los ajustes dinámicos de un río aluvial sometido a un esquema de alteraciones dado. De esta manera, utilizando las identidades:  $C_{ST} = Q_s/Q$  y  $V = Q/(B \cdot h)$ , la ecuación de transporte se escribe como:

$$\frac{Q_s}{Q} = \alpha \left( \frac{Q \cdot S}{B \cdot h \cdot W} \right)^\beta$$

donde  $Q$  es el caudal líquido,  $Q_s$  la carga de sedimentos y  $B$  el ancho del cauce.

En ríos naturales, cuando  $C_{ST}$  se expresa en ppm, el coeficiente  $\alpha$  varía entre 16000 y 500000 aproximadamente, y  $\beta$  oscila entre 0.8 y 1.5 con una media cercana a la unidad. La ecuación anterior representa una versión cuantitativa de la relación funcional de Lane. Si se consideran aceptables las relaciones:  $B \sim Q^{1/2}$ ;  $h \sim Q^{1/3}$  (ecuaciones de geometría hidráulica);  $W \sim d^{1/2}$ , para  $\beta = 1.5$  se obtiene:

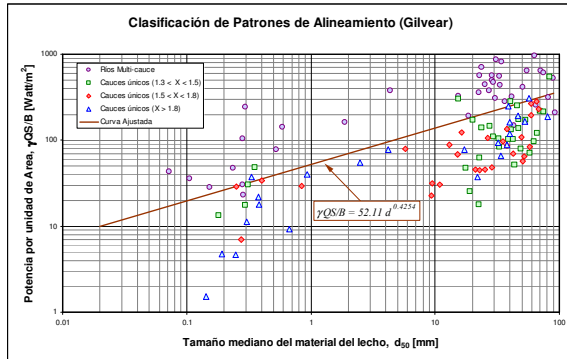
$$S \sim d^{1/2} C_s^{2/3} Q^{-1/6}$$

Esta ecuación se compara con:  $S \sim d^{0.555} C_s^{0.630} Q^{-0.192}$  (ecuación de régimen KKM, Farias 1995).

Recordando que la potencia de la corriente por unidad de longitud del cauce se expresa como  $\gamma \cdot Q \cdot S$  (donde  $\gamma$  es el peso específico del fluido, que se puede considerar constante,  $S$  es la pendiente y  $Q$  el caudal), es factible asumir que el producto  $Q \cdot S$  es un indicador de la potencia de la corriente. Entonces, el discriminador de tipos de alineamiento en planta de ríos, basado en la relación  $S = f(Q)$  lleva implícito una consideración energética.

Por ejemplo, el clasificador de van den Berg (1995) (Ilustración 4) se basa en la relación entre la potencia de la corriente por unidad de ancho del lecho ( $\gamma \cdot Q \cdot S/B$ ) y el tamaño

característico del sedimento ( $d$ ), para discriminar entre cauces únicos (con sinuosidad  $X$  variable) y cauces de brazos múltiples.



**Ilustración 4.** Criterio de van den Berg para forma en planta de ríos

### Cuantificación con base en la Mecánica del Transporte de Sedimentos

Wilcock (2004) analizó la relación de Lane con base en ideas desarrolladas previamente por Henderson (1966), quien consideró la ecuación de Chezy y la fórmula de transporte de sedimentos de Einstein-Brown.

$$q_s = c_1 \tau_*^3, \text{ o bien: } q_s / (g \Delta d^3)^{1/2} = c_1 [\tau / (\rho g \Delta d)]^3 \text{ Entonces, como: } \tau = \gamma R S: q_s \propto (RS)^3 / d^{3/2}. \text{ A su vez: } V = C(RS)^{1/2}, q \approx V R \Rightarrow q \propto R^{3/2} S^{1/2} \therefore R^3 \propto q^2 / S$$

$$\text{Reemplazando en la ecuación de transporte: } q_s \propto q^2 S^2 / d^{3/2} \Rightarrow q_s / q \propto q S^2 / d^{3/2}.$$

De donde:  $q S \propto q_s^{1/2} d^{3/4}$ . Según Wilcock, esta relación representa el criterio de Lane.

$$\text{Si se multiplican ambos miembros por el ancho del cauce (B): } Q S \sim Q_s^{1/2} d^{3/4} B^{1/2}$$

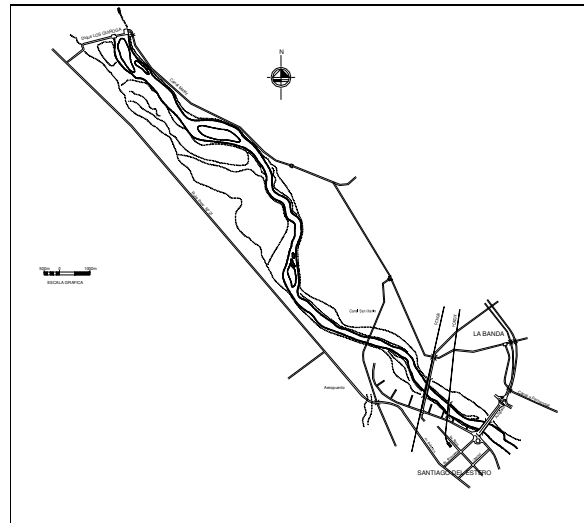
Finalmente, admitiendo que  $B \sim Q^{1/2}$  (ecuaciones de geometría hidráulica y teoría del régimen), se obtiene:  $Q^{3/4} S \sim Q_s^{1/2} d^{3/4}$  (versión de la relación de Lane).

Resolviendo para la pendiente:  $S \sim d^{3/4} Q_s^{1/2} Q^{3/4}$ , o bien:

$$S \sim d^{0.75} C_s^{0.5} Q^{-0.25} \text{ (donde } C_s \text{ es la concentración total de sedimentos). Esta ecuación puede compararse con la ecuación de régimen: } S \sim d^{0.643} C_s^{0.497} Q^{-0.292} \text{ (Farias, 1995).}$$

### Ejemplo de Análisis para un Río de Llanura

En esta sección se propone un esquema de análisis tendiente a cuantificar de alguna manera los procesos morfológicos generados por alteraciones en el régimen fluvial natural de un río. Mediante el estudio de un caso particular (Río Dulce en Santiago del Estero, Argentina; Ilustración 1) se presenta un análisis conceptual, con criterios cualitativos y cuantitativos, para poder predecir algunas respuestas morfológicas típicas de ríos aluviales afectados por actividades humanas tales como la regulación de caudales y el confinamiento de su planicie de inundación por expansión urbana.



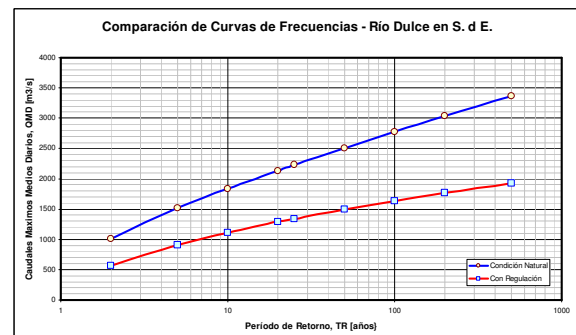
**Ilustración 5.** Planimetría del tramo del Río Dulce entre el Dique Los Quiroga y la Ciudad de Santiago del Estero

El segmento de curso fluvial en estudio, 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 58 km aguas arriba del tramo considerado, la cual comenzó a operar en el año 1967. En virtud de ello, en el marco del presente estudio se analizaron dos series de caudales, a saber:

Una primera serie caudales para la “condición natural del río”, que corresponde a los relevamientos hidrométricos realizados en la estación de aforos emplazada en la localidad de “El Sauce”, la cual se ubica aproximada a unos 15 km aguas arriba del actual 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.

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 siguientes funciones de frecuencia.



**Ilustración 6.** Comparación de las funciones de frecuencias medias para los dos escenarios (natural y regulado)

En la Ilustración 6 se presentan ambas curvas en forma conjunta, lo cual permite apreciar claramente las diferencias entre una situación y otra. No obstante haberse producido un incremento del gasto medio anual del río del orden del 47% en el período 1968-2005 con respecto al 1924-1968 (es decir, 124 m<sup>3</sup>/s contra 84 m<sup>3</sup>/s), los picos de caudales con idénticas recurrencias tienen en promedio valores del orden del 40% menos. En efecto, el promedio del cociente entre los valores posteriores y previos a la regulación produce un valor promedio de aproximadamente 0.6 para el rango de recurrencias de 5 a 100 años.

Para poder caracterizar hidráulicamente el tramo se llevó a cabo una modelación con HEC-RAS, y a partir de esa simulación se calculó la función de transporte de sedimentos (usando la fórmula de Engelund & Hansen).

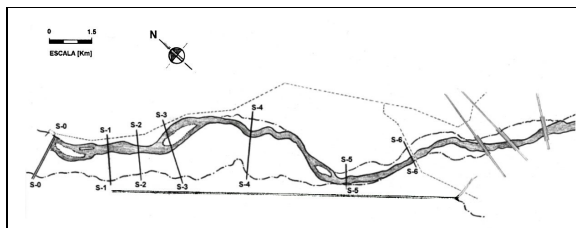


Ilustración 7. Tramo modelado del Río Dulce

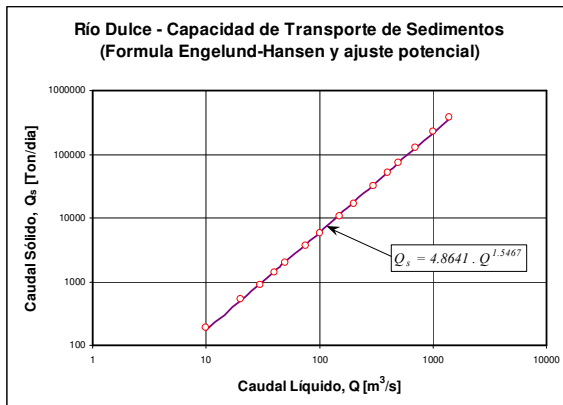


Ilustración 8. Curva Q-Qs del tramo del Río Dulce (modelo HEC-RAS y ec. de Engelund y Hansen).

Para la determinación de los caudales dominantes (antes y después de la regulación) se aplicaron los métodos morfológicos de Schaffernak y Komura. Para ambos se trabajó con una serie de caudales líquidos diarios de 60 años de longitud y la función  $Q_s = f_{Q_s}(Q)$  se ajustó con las ecuaciones de transporte disponibles en el programa HEC-RAS, ya que de esta manera se facilitan los cálculos usando directamente las secciones naturales del tramo y las granulometrías del material de lecho. Para el caso del método de Schaffernak se realizó un análisis de sensibilidad en función de la cantidad de intervalos de clase, encontrándose que  $N=20$  producía valores razonables, y de esta manera se estimó  $Q_D=280$  m<sup>3</sup>/s. Este valor está asociado a una recurrencia menor de un año. Por su parte, se implementó una variante del método de Komura, trabajando con un hidrograma anual promedio y se realizó un análisis de sensibilidad en función del exponente  $b$  de la función de transporte  $Q_s = a \cdot Q^b$ . Para el caso analizado (Río Dulce en Santiago del Estero) se encontró que para una variación de  $b$

entre 1.2 y 2.0 (valores típicos para el conjunto de funciones de transporte habitualmente usadas en ríos aluviales) el valor de caudal dominante calculado experimentó una variación del orden del 30% encontrándose que  $Q_D \sim b^{0.6}$  aproximadamente. En estas condiciones, los valores encontrados se sitúan aproximadamente en forma coincidente con los indicados por Goodwin en sus funciones analíticas para estimar el caudal dominante. En efecto, Goodwin (2004) encontró que para el caso en que la serie cronológica de caudales observados se ajuste a una distribución normal, resulta  $Q_D \sim b^{0.5}$ , mientras que para el caso de una distribución log-normal de dos parámetros  $Q_D \sim e^b$ . Para otras distribuciones de probabilidad las funciones son más complicadas, pero dependen esencialmente de  $b$  y de los estadísticos de la serie (en rigor, de los momentos de orden 1, 2 y 3, es decir, media, varianza y asimetría ya sea de los valores de  $Q$  o de  $\log(Q)$ ).

La relación de Lane puede utilizarse para evaluar el comportamiento del río Dulce frente a la ciudad de Santiago del Estero. 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 un dique longitudinal de defensa sobre la margen derecha sobre el cual en la actualidad se encuentra la actual 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 una batería 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 los materiales sólidos arrastrados por el río (Ilustración 9). El funcionamiento de esta obra ha sido exitoso y el objetivo ha sido cumplido al punto tal que en la actualidad los depósitos sedimentarios han sido ocupados por caminos, paseos, campos recreativos, etc. (Ilustración 10). Pero su efecto también ha producido una serie de consecuencias indeseadas sobre otras obras, las cuales serán brevemente explicadas en lo que sigue.



Ilustración 9. Obras de Control en la Margen Derecha del Río

La rigidez estructural de los espigones (construidos en hormigón armado) ha obligado 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 FCNGM y la autopista Santiago - La Banda. Este alineamiento casi recto del río en este tramo presenta algunas condiciones 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 hará variar 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 particular que se trata, el mismo indica que, si un río estable debe tener capacidad de adaptación a condiciones hidráulicas y sedimentológicas variables, un curso con alineamiento meandriforme a caudales bajos debería desplazar lateralmente su thalweg e incrementar la longitud real del escurrimiento.



**Ilustración 10.** Río Dulce (año 2015). Desarrollo de obras de infraestructura sobre la planicie aluvial

Consecuentemente se reduciría la pendiente, lo cual es consistente con la condición [ $\gamma QS \rightarrow \text{mín}$ ]. Además, puesto que la capacidad de transporte de sedimentos del río es aproximadamente proporcional al cuadrado del caudal, durante los flujos bajos se produciría una depositación 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 satisface 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. En el tramo estudiado, el río Dulce, que formaba barras alternadas en estiaje, no alcanzaba a depositar una cantidad suficiente de material sólido que satisficiera las demandas durante las crecidas precisamente por la imposibilidad de desplazar lateralmente su curso de flujo para aproximarse la condición [ $\gamma QS \rightarrow \text{mín}$ ] sujeto a [ $Q_s = Q\alpha(VS/\omega)^\beta$ ] el puente sobre la autopista Santiago - La Banda se construyó con una luz libre aún inferior al ancho del cauce activo limitado por la restricción antes descrita. Este hecho ocasionó el fenómeno que, de acuerdo con la magnitud de las crecidas, el río (en la sección del puente) concentrará su escurrimiento en alguno de los tramos extremos erodando el material allí disponible y produciendo serios trastornos sobre los estribos del puente. Este proceso, que se compatibiliza con

$$[\gamma QS \rightarrow \text{mín}] \text{ y } [Q_s = Q\alpha(VS/\omega)^\beta]$$

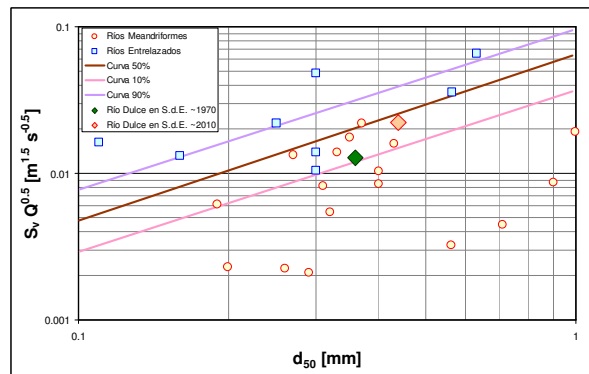
hace suponer que la longitud del puente debería haberse determinado en función del ancho del cinturón de desarrollo de barras alternadas, el cual se podría haber calculado con un conjunto cronológico de fotografías aéreas o bien analíticamente a través de un modelo morfológico, calibrando sus parámetros con valores observados.

Con la finalidad de poner de manifiesto el impacto sobre del río de el confinamiento lateral impuesto por los terraplenes de control de inundaciones, se realizó la aplicación de diferentes criterios para predecir la forma en planta del río.



**Ilustración 11.** Tramo urbano del Río Dulce. Imagen año 1998

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. Hacia finales del siglo XX (Ilustración 11) el curso presentaba una sinuosidad de 1.08 y un trazado de curvas alternadas suaves, ya que no alcanza a desarrollar un patrón meandriforme completamente definido en virtud de las restricciones al desarrollo de procesos de erosión de márgenes y migración lateral impuesto por las obras ejecutadas en la planicie de inundación, sumado a una disminución del caudal dominante por efecto de la regulación de caudales. Los relevamientos de campo han indicado 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.



**Ilustración 12.** Análisis de regresión logística de los datos originales de van den Berg. Ríos con lechos arenosos (Bledsoe & Watson, 2001). Se indica la posición correspondiente al tramo urbano del Río Dulce.

En la Ilustración 12 se presentan las situaciones antes mencionadas en el diagrama de Bledsoe & Watson (2001), donde  $S_v$  indica la pendiente regional del valle fluvial. Este clasificador de formas en planta está basado en el principio energético-sedimentológico, expresado a través de una

regresión logística sobre datos experimentales publicados inicialmente por van den Berg.

Se puede observar una marcada tendencia del río a evolucionar de un patrón de alineamiento meandriforme hacia uno caracterizado por un patrón curvilíneo suave, con un incipiente grado de entrelazamiento, desarrollando barras elongadas de sedimento arenoso grueso, que progresivamente está siendo colonizado por la vegetación (aspecto que ya se había observado en 1998, Ilustración 11).

## Conclusiones

Se ha presentado un análisis de la relación de Lane, la cual expresa una relación funcional entre el caudal ( $Q$ ), la pendiente ( $S$ ), la carga sólida ( $Q_s$ ) y el tamaño del sedimento ( $d$ ), en la forma de un balance que resume el efecto combinado de las variables hidráulicas y sedimentológicas. Para ello, se han tenido en cuenta avances recientes en el estudio de la mecánica del transporte de sedimentos y la geomorfología fluvial, procurando identificar las variables y parámetros involucrados en la caracterización de la condición de equilibrio dinámico de ríos aluviales.

Se han analizado las contribuciones de diversos autores, llegándose a cuantificar la relación a partir de un enfoque basado en criterios energéticos, y otros tales como criterios mecanicistas y elementos de la teoría del régimen para cauces aluviales en equilibrio dinámico.

Finalmente, se han presentado algunos ejemplos de aplicación de la formulación propuesta en la evaluación cuantitativa de tendencias evolutivas de cauces fluviales ante alteraciones de la condición de equilibrio impuestas por acciones antropogénicas.

## Referencias

- BLEDSE, B.P & WATSON, C.C. "Logistic analysis of channel pattern thresholds: meandering, braiding, and incising". *Geomorphology*, Vol. 38, pp. 281–300. 2001
- CHANG, H.H. *Fluvial Processes in River Engineering*. Wiley Interscience, 432 pp. 1988.
- CHURCH, M. "Bed material transport and the morphology of alluvial river channels". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. Vol. 34, pp 325-354. 2006.
- DUST, D. & WOHL, E. "Conceptual model for complex river responses using an expanded Lane's relation". *Geomorphology*, 139-140 (2012), pp 109–121. 2012.
- FARIAS, H. D. "Fórmulas Prácticas para el Diseño de Canales sin Revestir en Terrenos Aluviales", *Ingeniería del Agua*, [ISSN: 1134-2196], Valencia, España, Vol. 2, No. 3, pp. 53-68, Septiembre 1995.
- GOODWIN, P. "Analytical Solutions for Estimating Effective Discharge". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 130, No. 8, August 2004, pp. 729–738. 2004
- JULIEN, P. Y. *River Mechanics*. Cambridge University Press, 2002. 456 p.
- HUANG, H. Q., & NANSON, G. C. "A stability criterion inherent in laws governing alluvial channel flow." *Earth Surf. Processes & Landforms*, Vol 27, 929–944. 2002.

WILCOCK, P. R. Lecture Notes - Sediment Transport – Incorporating Water & Sediment Supply. 2004. [<http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/wilcock/WilcockSTLecture6.pdf>]

YALIN, M.S. & FERREIRA DA SILVA, A.M. *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, The Netherlands. 2001.

YANG, C.T.. *Sediment Transport: Theory and Practice*. Mc Graw-Hill Book Co., NY, USA. 1996.