

# ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ESTRUCTURA DEL FLUJO Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS SOBRE DUNAS DE DISTINTA ESCALA

Francisco Latosinski<sup>1</sup>, Ana Heredia<sup>2</sup>, José Diaz Lozano<sup>2</sup>, Ricardo Szupiany<sup>1</sup>, M. Amsler<sup>3</sup>  
Carlos García<sup>2</sup> y Marcelo García<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CONICET y Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) - UNL, Ruta Nacional 168, Ciudad Universitaria, Santa Fe, 342-4575245/6

<sup>2</sup>CONICET y Centro de Estudios y Tecnología del Agua - FCEfyN-UNC, Córdoba.

<sup>3</sup>CONICET (Instituto Nacional de Limnología) y FICH-UNL, Ruta Nacional 168 - Ciudad Universitaria -Santa Fe.

<sup>4</sup>Ven Te Chow Hydrosystem Laboratory, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois, USA.

E-mail: franlatos@gmail.com

## Introducción

Es sabido que las formas de fondo, en particular las dunas, presentes en cauces naturales, constituyen componentes importantes en las modificaciones de la resistencia al flujo y el transporte de sedimentos. Sin embargo, los procesos físicos implícitos en esa dinámica, no están aún del todo comprendidos. Existe una abundante bibliografía sobre esta temática, surgida de experimentos tanto de laboratorio (Van Rijn 1993), como de mediciones de campo (Trento et al., 1990) y, en menor medida, de las simulaciones numéricas. En esos antecedentes, son escasas las investigaciones focalizadas en la influencia de las distintas escalas espaciales de los cauces naturales sobre los fenómenos enunciados, específicamente, el transporte de sedimentos tanto de fondo como en suspensión. Las dificultades vinculadas con la medición de estas variables en corrientes naturales explican, en parte, aquella escasez.

El presente trabajo es una actualización de investigaciones previas (Latosinski et al. 2017b) y tiene el objetivo de realizar una comparación, basada en datos medidos, entre los fenómenos hidráulico/sedimentológicos que ocurren en dunas de ríos de diferentes escalas. Para ello, se estudiaron formas de fondo de los ríos Paraná y Tercero (Córdoba, Argentina), cuantificando sobre ellas, con tecnología acústica, la estructura del flujo y transporte de sedimentos.

## Zona de estudio y metodología

Se investigaron un tramo del río Tercero, cercano a la ciudad de Villa María (Córdoba) y tres tramos del cauce principal del Río Paraná, próximos a las ciudades de Lavalle (Corrientes), Paraná (Entre Ríos) y Santa Fe (Santa Fe).

El río Tercero tiene un caudal medio de 27 m<sup>3</sup>/s y está fuertemente regulado por la presa ubicada aguas arriba de Villa María. Las tareas de campo fueron realizadas en 2016 sobre el puente Alberdi en cuatro estados hidrométricos. Los registros batimétricos, de velocidad del flujo y velocidad de las partículas del fondo se realizaron con un ADCP YSI/SonTek de 3000 kHz (S5) conectado a un GPS.

El río Paraná, posee un caudal medio de 18000 m<sup>3</sup>/s. Los trabajos de campo se realizaron sobre el cauce principal en mayo de 2011 en Lavalle, en abril de 2012 en Aguas Corrientes y en Julio de 2012 en Bajada Grande. Se utilizó un ADCP de 1200 kHz (Teledyne RDI) conectado a un DGPS de precisión con corrección a tiempo real (RTK). La profundidad se obtuvo con ecosonda Raytheon de haz simple de 200 Hz conectada al DGPS-RTK. Todos estos instrumentos se montaron sobre una embarcación hidrográfica. La característica común en los tres sitios es la presencia de dunas con formas de fondo superpuestas.

Se llevaron a cabo dos tipos de mediciones: con embarcación en movimiento y anclada. Las primeras (o dinámicas) se utilizaron para obtener perfiles de velocidad promediados espacialmente sobre una duna seleccionada, por un lado, y la carga de fondo por el método clásico de seguimiento de dunas, por el otro. Los registros comprendieron dos recorridos longitudinales sobre una serie de dunas, desde aguas abajo hacia aguas arriba, con un

intervalo de tiempo suficiente como para observar adecuadamente sus desplazamientos.

Las mediciones con embarcación anclada (o estáticas), se efectuaron sobre dunas identificadas previamente en los recorridos longitudinales. Consistieron en registrar perfiles de velocidad del flujo y concentración de arenas en suspensión, promediados en el tiempo, la velocidad promedio de las partículas del fondo y la carga de fondo en dunas del río Tercero. El intervalo de medición fue de entre 2 a 3 horas en dunas de este último (con ello se logra el paso completo de la forma) y de 15 minutos en el Paraná para cada posición medida, i.e. cresta, lomo y valle. La metodología de medición de la velocidad de las partículas del fondo ( $v_b$ ) con tecnología acústica se presenta en detalle en Latosinski et al. (2017a).

## Resultados

En Tabla 1 se presentan los valores medios de caudal, longitud ( $\lambda_d$ ) y altura de duna ( $H_d$ ), ángulo de la cara de aguas abajo ( $\beta$ ), profundidad ( $h$ ), velocidad ( $u$ ) medias del flujo sobre la duna, su velocidad de avance ( $u_d$ ) y la tasa de transporte de fondo deducida con el procedimiento de desplazamiento de dunas. Por cuestiones de espacio, se presentan sólo valores correspondientes a una campaña en cada uno de los ríos seleccionados.

**Tabla 1.-** Propiedades del flujo y características de las formas de fondo.

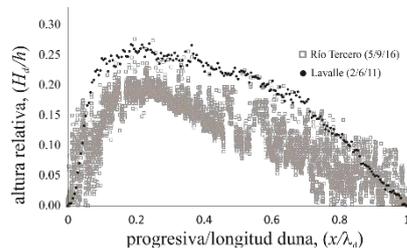
Lugar y Fecha	Caudal m <sup>3</sup> /s	$\lambda_d$ m	$H_d$ m	$\beta$ °	$h$ m	$u$ m/s	$u_d$ m/día	$g_{sf}$ kg/ms
Río Tercero 5/9/16	25	1.9	0.20	22	1.14	0.70	25.9	0.06
Lavalle 2/6/11	17100	185	2.35	8	8.71	1.05	2.8	0.09

Como puede observarse, más allá de la notable diferencia en los valores de velocidad de avance de dunas, la carga de fondo por unidad de ancho varía en ambos ríos dentro de los mismos órdenes de magnitud.

Analizando las dunas correspondientes al río Tercero (5/9/16) y el Paraná (2/6/11) se observa una altura relativa de duna ( $H_d/h$ ) levemente mayor para el río Paraná (0.26) respecto del Tercero (0.18), valores que se ajustan a los informados para ríos aluviales con fondo de arena. La forma es la típica asimétrica para ambos casos (Figura 1). El empinamiento ( $H_d/\lambda_d$ ) presenta en términos promedio, valores de 0.01 y 0.1 en el Paraná y en el Tercero, respectivamente. Sobre las dunas del Paraná, se observaron dunas superpuestas, con longitudes y alturas que van de 4 a 8 m y de 0.20 a 0.40 m, respectivamente.

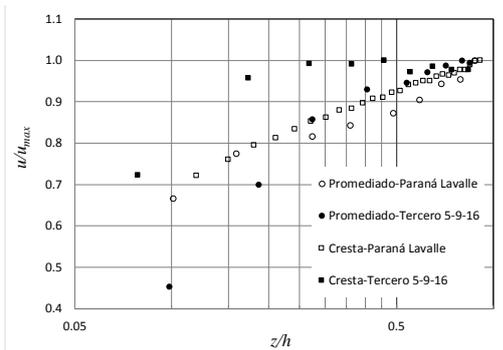
La velocidad de las partículas del fondo,  $v_b$ , obtenida mediante la función bottom track que poseen los ADCPs, arrojó los siguientes valores para las distintas posiciones sobre cada duna: 0.045, 0.009 y 0.009 m/s en cresta, lomo y valle, respectivamente, en el Tercero, y 0.045, 0.027 y 0.006 m/s en cresta, lomo y valle, respectivamente, en Lavalle. En el caso del río Tercero, los datos para cada posición fueron extraídos de las fracciones correspondientes de un mismo registro continuo para toda la duna. Estos valores de velocidad han sido utilizados en un modelo cinemático (Van Rijn, 1993) para estimar la carga de

fondo unitaria con muy buena performance en el río Paraná (Latosinski et al. 2017a). En ambos ríos se corrobora el incremento del transporte de fondo, desde el valle hacia la cresta en acuerdo con el aumento de  $v_B$  en esa dirección.



**Figura 1.-** Formas de fondo registradas en los ríos Tercero (5/09/16) y Paraná (2/06/11). Representación adimensional.

En Figura 2 se presentan los perfiles de velocidad promediados espacialmente sobre la duna y temporalmente sobre la cresta. Se ha demostrado (para las dunas del río Paraná), que el ajuste de los perfiles de velocidad suele ser rectilíneo sobre la mitad superior de la cara de aguas arriba de la duna (Trento et al. 1990). También en trabajos previos (Latosinski et al. 2017b), y en acuerdo con esos autores, se han presentado resultados de perfiles de velocidad a partir de mediciones estáticas, en base a los cuales se comprueba la dificultad o invalidez de esos perfiles para determinar tensiones de corte de fondo cuando son registrados en las zonas de los valles de las formas de fondo. Ello se debe a que en esos sitios no se cumplen las condiciones bajo las cuales han sido deducidas las expresiones semi logarítmicas de un perfil de velocidades, i.e. ausencia de cambios bruscos en el gradiente de presiones.



**Figura 2.-** Perfiles de velocidad promediados sobre las dunas de los ríos Paraná y Tercero. Se incluyen los perfiles estáticos sobre cresta de ambas dunas.

El promedio espacial se realizó conservando el caudal específico a lo largo de la duna entre fracciones de las sucesivas verticales de medición. La uni-direccionalidad y bi-dimensionalidad aproximadas del flujo, fue comprobada debido a la constancia del caudal específico a lo largo de la duna, calculado sobre cresta, lomo y valle.

El ajuste de una recta a los datos surgidos de los promedios espaciales en Figura 2 es muy bueno según se aprecia en Tabla 3 (en el río Tercero se excluyó el dato a  $z/h = 0.1$  debido a la divergencia de los haces acústicos del ADCP que promedia valores cerca del fondo en un área que cubre prácticamente la mitad de la longitud de la duna). En Tabla 3 se incluyen los valores de velocidades de corte y alturas de rugosidad obtenidos del ajuste mencionado (Schlichting 1979). Se presentan también las tensiones de corte medias sobre la duna,  $\tau_0$ , su valor adimensional,  $\tau_*$ , el Reynolds de la partícula,  $R_{ep}$ , y el coeficiente de Manning,  $n$ .

**Tabla 3.-** Parámetros obtenidos del ajuste de los perfiles de velocidad surgidos de promedios espaciales a lo largo de las dunas.

Lugar y Fecha	$u_*$ m/s	$k_s$ m	$r^2$	$\tau_0$ kg/m <sup>2</sup>	$D_{50}$ mm	$\tau_*$	$R_{ep}$	$n$
R. Tercero 5/9/16	0.059	0.09	0.91	0.36	1.95	0.11	49	0.03
Lavelle 6/2/11	0.067	0.16	0.97	0.46	0.31	0.90	8	0.02

La velocidad de corte es del mismo orden de magnitud en ambos ríos. La altura de rugosidad equivalente de arena escala con la altura de las dunas en el caso del Tercero, mientras en el Paraná, lo hace con la de las dunas superimpuestas. La tensión de corte adimensional en el Paraná supera el límite previsto en diagramas como el de Shields-Parker para que exista transporte en suspensión, mientras que en el Tercero, no, en coincidencia con lo observado. Finalmente, el coeficiente de Manning es un 50% superior para el río de menor escala.

## Conclusiones

En el presente trabajo se comparan características del flujo y el transporte de sedimentos sobre dunas en dos ríos de diferentes escalas. Para ello se utilizaron datos obtenidos con ADCPs. Se observan diferencias significativas en cuanto al empinamiento de las dunas, pero no en sus alturas relativas. Los valores de velocidad de las partículas de fondo en ambos ríos se ajustan a lo esperado, con tasas crecientes de transporte de fondo a lo largo de la duna, i.e., un aumento desde el valle hacia la cresta. Las tensiones de corte de fondo determinadas de los perfiles de velocidad promediados sobre la duna, fueron similares en ambos casos, no así sus valores adimensionales (mas de 8 veces mayor en el Paraná), debido a las marcadas diferencias en el tamaño del sedimento de fondo (más de 6 veces menor en el río Paraná). Ello determina la presencia de sedimento en suspensión en este último (ausente en el Tercero), lo cual explicaría los bajos empinamientos y ángulos de aguas abajo de las dunas en el Paraná (Amsler y Schreider 1998). Finalmente, se corroboró que la altura de rugosidad equivalente de arena en el caso de las grandes dunas del Paraná escala con las pequeñas dunas superimpuestas, mientras que en el Tercero, lo hace con las dunas presentes en el mismo. En términos del  $n$  de Manning, el río más pequeño posee una resistencia al flujo 50% mayor que en el Paraná.

## Referencias bibliográficas

- Amsler, M., y Schreider, M. (1998) "Dunes Height Prediction at Floods in the Paraná River (Argentina)", Seventh International Symposium on River Sedimentation, Hong Kong
- Latosinski, F., Szupiany, R., Guerrero, M., Amsler, M., and Vionnet, C. (2017a). "The ADCP's bottom track capability for bedload prediction: Evidence on method reliability from sandy river applications." *Flow. Meas. Instrum.*, 54, 124-135
- Latosinski, F., Heredia, A., Diaz Lozano, J., Szupiany, R., García, C. y Amsler, M. (2017b) "Estructura del flujo y transporte de sedimento sobre dunas en ríos de distinta escala", VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. 8-10/Noviembre de 2017, Córdoba, Argentina
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-layer Theory*. McGraw-Hill Book Co, New York, USA, p. 817.
- Trento, A., Amsler, M. and Pujol, M. (1990). "Perfiles observados de velocidad en un tramo del río Paraná-Análisis teórico", XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay.
- Van Rijn, L. (1993). "Bed material suspension and transport in steady uniform currents", Chapter 7 in *Principles of sediment transport in river, estuaries and coastal seas*, Aqua Publications, Amsterdam, The Netherlands, (7.1-7.105).