

Efecto de la relación ancho/profundidad en cauces meandriiformes

Lucas Dominguez Ruben^{1,2}, Ricardo Szupiany^{1,2}, Francisco Latosinski^{1,2}, Alfredo Trento¹ y Jorge Abad³

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

² CONICET Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

³ Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Pittsburgh, USA.

E-mail: ldominguezruben@gmail.com & ldominguezruben@fich1.unl.edu.ar

RESUMEN: Pocas veces los cauces aluviales presentan tipologías de canales rectos, en general desarrollan conformaciones planimétricas de tipos entrelazadas o meandriiformes en respuesta a la producción de sedimentos a nivel de cuenca, la pendiente del lecho a escala regional, la composición del cauce, a los procesos de erosión y deposición del lecho y de las márgenes a escala local. Un completo entendimiento de todos los aspectos morfodinámicos del río requiere de un conocimiento preciso sobre una gran variedad de escalas espaciales y temporales que caracterizan cada proceso individual.

Si bien existe una importante cantidad de trabajos que analizan la estructura del flujo en curvas, la mayoría de ellos corresponden a modelaciones numéricas, canales de laboratorios y, en menor medida, a cauces naturales, en general con bajas relaciones ancho/profundidad (i.e. $A/P < 20$).

El presente trabajo pretende analizar, mediante mediciones realizadas en campo, la dinámica de la estructura de flujo, morfología y transporte de sedimento en suspensión de dos cauces con escalas dispares, bajo situaciones hidrométricas similares (nivel de desborde). Ambos escenarios se encuentran en la región del Litoral (cerca de la ciudad de Santa Fe, Argentina) uno como tributario (Rio Salado, $A/P=18$) y otro como cauce secundario (Río Colastiné, $A/P=58$) del Sistema Paraná.

De los resultados preliminares se destacan características distintivas en cuanto: i) la celda secundaria central definida, ii) efectos inerciales del sedimento y iii) morfología de fondo cuasi planares.

INTRODUCCION

La conformación planimétrica de ríos meandriiformes aparece en la naturaleza como una de las más comunes. Esta característica fisiográfica se alcanza a través de un proceso de erosión de la margen externa (región cóncava) y deposición de material sólido en la interna (región convexa). Estos procesos derivan en el desarrollo de migraciones laterales y longitudinales del curso fluvial describiendo una suerte de barrido a través de la planicie aluvial. Esta compleja dinámica, ha llevado a científicos e ingenieros a buscar un entendimiento preciso de los fenómenos actuantes a fin de dar respuestas a los actores humanos, socioeconómicos y ambientales involucrados.

El flujo en curvas se encuentra sujeto a un patrón de tipo helicoidal, conformado con una celda central que ocupa gran parte de la sección la cual redistribuye el momento que porta el flujo en la transversal. Una celda de menor tamaño y rotación opuesta se presenta en la margen superior izquierda la cual reduce la capacidad erosiva del cauce, desplazando las líneas de corriente hacia el interior del cauce.

Aunque este patrón de flujo ha sido conocido durante más de un siglo (Thomson, 1887), todavía hay mucho por entender. A través de los años muchos estudios han llevado a cabo cuantificaciones de la influencia que tienen los parámetros geométricos de estos cauces en la estructura de flujo. Investigaciones recientes (Yalin y da Silva, 2001) demuestran que la circulación secundaria y su efecto no pueden ser analizadas independientemente de la relación A/P. Por ejemplo, estudios tales como Yen et al. (1972), indican que a medida que crece la relación A/P (>12) disminuye el gradiente de presión y por lo tanto la celda central decrece en intensidad. Hooke (1975) destaca que, sobre canales de laboratorio de baja sinuosidad y trabajando con relaciones A/P menores a 20, la intensidad del flujo secundario (movimiento helicoidal) se incrementa con la disminución de A/P. Además, el aumento de la relación de aspecto provoca un mayor desplazamiento de dicho movimiento del flujo hacia la margen externa. Dietrich (1983) describe como este comportamiento produce un banco interno casi horizontal y de gran longitud, influyendo así en la concentración de las líneas de corriente sobre la margen externa.

Si bien existe una importante cantidad de trabajos que analizan la dinámica de las variables hidro-sedimentológicas y morfológica en curvas, la mayoría de ellos corresponden a modelaciones numéricas o canales de laboratorios en general con geometrías simples (secciones rectangulares y/o fondo no deformables) y, en menor medida, a cauces naturales. Todos estos en general con relaciones ancho/profundidad (A/P) menores a 20 (Termini y Piraino, 2011). Además, justamente debido a la complejidad numérica y de laboratorio, el comportamiento del transporte de sedimentos en este tipo de ríos presenta un limitado conocimiento.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar una primera descripción, análisis y discusión sobre la influencia de la condición geométrica del cauce en la estructura de flujo y dinámica del sedimento en suspensión en cauces con relación A/P variada comparando con aquellos estudiados hasta el presente.

ZONA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

Los trabajos de campo fueron realizados sobre dos tramos, uno de aproximadamente 6 km de longitud del río Colastiné (brazo secundario del Río Paraná en su tramo medio, Argentina), y el otro en el río Salado (en cercanías de la ciudad de Esperanza, Santa Fe, Argentina) con una longitud de 1,5 km. El estado hidrométrico al momento de las mediciones fue de crecida para ambos (nivel de desborde).

En la Tabla 1 se presentan las características fluviomorfológicas de los cauces, notar las relaciones A/P para el Colastiné, de un valor medio de 58 y para el Salado de 19. Para la caracterización del flujo y sedimento se definieron secciones transversales (secciones R, Figura 1 y 2) que coinciden con el ápice, ingreso, salida de las curvas y los tramos rectos entre estas.

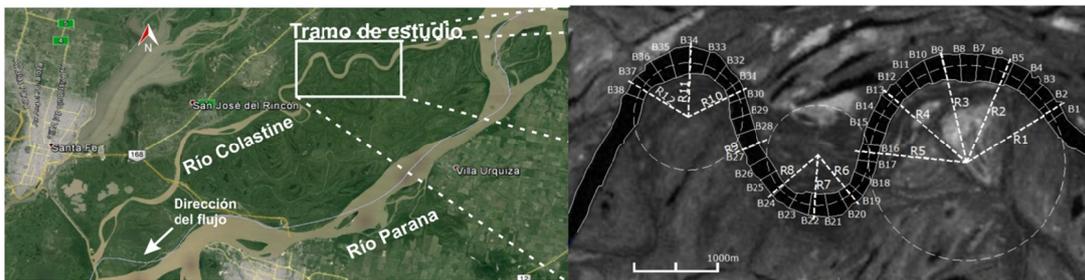


Figura 1.- Ubicación de tramo de estudio y secciones relevadas sobre el río Colastiné. Secciones R corresponden a aquellas relevadas con ADCP, las denominadas B se utilizaron para el relevamiento batimétrico con sonda ecógrafa.



Figura 2.- Ubicación de tramo de estudio y secciones relevadas sobre el río Salado. Secciones R corresponden a aquellas relevadas con ADCP.

Para cada sección transversal (R) se realizaron 4 recorridos con un perfilador acústico Doppler (ADCP) Teledyne RD Instrument Río Grande de 1200 kHz de frecuencia, acoplado a un sistema de posicionamiento global en forma diferencial y a tiempo real (RTK-DGPS). El mismo provee el posicionamiento de la embarcación con errores del orden de ± 2 cm en la horizontal. Durante las mediciones el ADCP se configuró con Modo 1 (WM1, Teledyne RD Instruments, 2007) y se trabajó con celdas de 0.25 m de altura e intervalos de medición de aproximadamente 0.70 seg. Dado el característico transporte de fondo que presentan estos ríos, se utilizó al DGPS como sistema de referencia para el cálculo de la velocidad de la embarcación.

Tabla 1.- Parámetros característicos en sección correspondiente al ápice de cada curva (ver Figuras 1 y 2 para ubicación de secciones)

Variables	Sección ápice				
	Río Colastiné			Río Salado	
	R 3	R 7	R 11	R 2	R4
Velocidad media[m/s]	0.95	1.06	1.02	0.69	0.73
Ancho [m]	402	354	384	78	77.36
Profundidad media [m]	6.4	6.6	6.4	4.21	3.69
Caudal [m ³ /s]	2401	2358	2283	199.67	19 0.78
Radio de curvatura [m]	1180	610	652	82	118
Ancho/Profundidad	62.81	53.63	60	18.52	21.18
Radio de curvatura/Ancho	2.93	1.72	1.69	1.05	1.51

Para la batimetría general del tramo correspondiente al Colastiné se usó la ecosonda, recorriendo secciones transversales cada 200 m (secciones B en Figura 1). En el caso del Salado y debido a la imposibilidad estructural del bote se tomaron los datos batimétricos provistos por el equipo ADCP (el mismo utilizado para las transectas).

La distribución de las concentraciones de sedimento de fondo en suspensión se obtuvo a través de calibraciones que relaciona la intensidad de la señal acústica de retorno medida por el ADCP y concentraciones de este material (ver metodología en Latosinski et al., 2014), cabe aclarar que esta metodología solo fue aplicable al río Colastiné. Para el procesamiento de las velocidades obtenidas con ADCP y descomposición de las velocidades primarias y secundarias se siguió el procedimiento recomendado por Szupiany et al. (2007b) utilizando el software VMT (Parsons et al., 2013).

RESULTADOS

A continuación se presentarán los resultados de ambos trabajos de campo.

Río Colastiné

Morfología

En Figura 3 se presenta el resultado de los relevamientos batimétricos sobre el tramo de estudio correspondiente al Colastiné. Se destacan ciertas características distintivas como ser:

- i) Gran desarrollo del banco interno y de forma aproximadamente plana, extendiéndose hacia aguas abajo hasta el cruce del thalweg de margen a margen. Notar que este cruce se produce inmediatamente aguas arriba del comienzo de la siguiente curva.
- ii) Diferencias entre la curvatura del cauce (tomando las márgenes como referencia) con la correspondiente a su morfología. Siguiendo la línea del thalweg se observa un incremento brusco de la curvatura inmediatamente al comienzo de la curva (y en donde se produce el cruce del thalweg). Esta curvatura va disminuyendo hacia aguas abajo extendiéndose hasta la zona donde se produce el siguiente cruce.
- iii) Concentración bien definida de las isolíneas de máximas profundidades. El ancho de thalweg presenta valores menores del 50 % del ancho total, menores en zona de ápice. Perfiles transversales de forma semi-rectangular solo se observa en tramos cortos en la zona de cruce del thalweg, entre secciones R1-R2, R5-R6 y R9-R10.

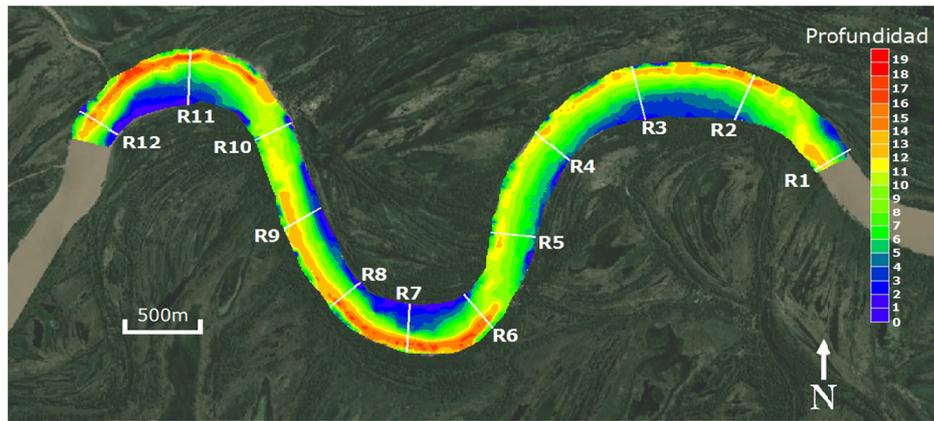


Figura 3.- Morfología de la zona de estudio y ubicación de secciones relevadas con ADCP.

iv) En secciones transversales sobre las curvas, se observa un quiebre bien definido entre la finalización del banco interno y la zona de máxima profundidad. En Figura 4 se presenta el comportamiento de la forma de las secciones transversales sobre el ápice (Colastiné y Salado), comparándolos con los observados por Hooke (1975) sobre modelos de laboratorio con menores relaciones A/P (<30). Se puede observar que los grandes meandros en estudio presentan profundidades relativas similares en la zona del banco interno (mayor recrecimiento del mismo) provocando (o a causa de) una mayor concentración del flujo sobre la margen externa. Sobre esta última se observa una mayor profundización relativa en la zona del thalweg para los de mayor curvatura (R7 y R11). Además de la mayor concentración del flujo, esta última profundización se debería a las diferentes capacidades de erosión de margen entre ambos (modelo y cauce natural). Para este último la capa superficial de material más cohesivo (producto de depositación de carga de lavado sobre la planicie) y de la vegetación presente, produciría un menor grado de libertad lateral en comparación con los experimentos en laboratorio, y por lo tanto la mayor concentración del flujo sobre margen cóncava originando una mayor profundización.

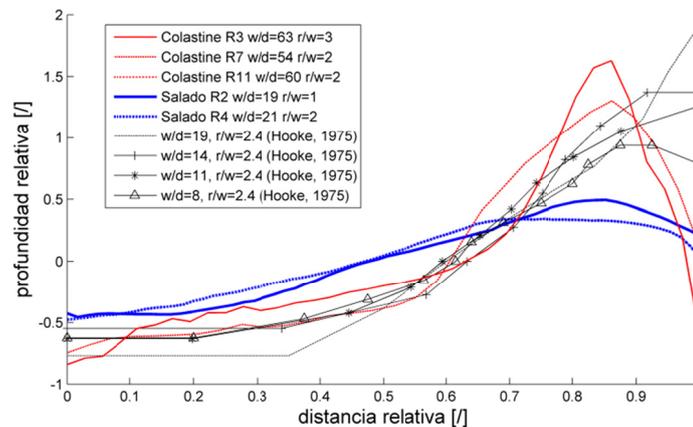


Figura 4.- Variación de perfiles transversales en canales de laboratorio (Hooke, 1975) y sobre meandros del río Colastiné y Salado. La progresiva cero corresponde a margen convexa.

v) En la Figura 5 se presenta la variación de la pendiente transversal del fondo del cauce correspondiente a las secciones de los ápices en las 3 curvas analizadas, i.e. donde se producen las variaciones del fondo más bruscas. Se puede observar diferentes comportamientos: para el caso del ápice R3, se detecta un banco cuasi horizontal sobre los primeros 100 m desde margen izquierda, seguido por un suave descenso del fondo con una pendiente media de 2° hasta la zona de máxima profundidad, luego comienza un aumento paulatino de la pendiente hasta alcanzar un valor máximo de 40° sobre la margen derecha. Para el caso de la curva R7, el banco interno de forma cuasi horizontal se prolonga unos 150 m desde la margen derecha incrementando luego la pendiente (hasta 10°) en thalweg para luego aumentar

hasta 20° sobre la margen izquierda. Un comportamiento similar se aprecia en la sección R11. En esta última, el banco interno cuasi horizontal presenta una mayor extensión de aproximadamente 225 m, i.e. el 60 % del ancho total. Los comportamientos de las pendientes transversales del fondo sugieren diferentes procesos o bien diferentes factores que afectan la migración del banco. Las bajas pendientes sobre la margen cóncava sugiere una mayor estabilidad de la misma, en comparación a cauces de menor escala o a los estudiados en laboratorio, con valores de pendientes en las cercanías de la margen cóncava mayores.

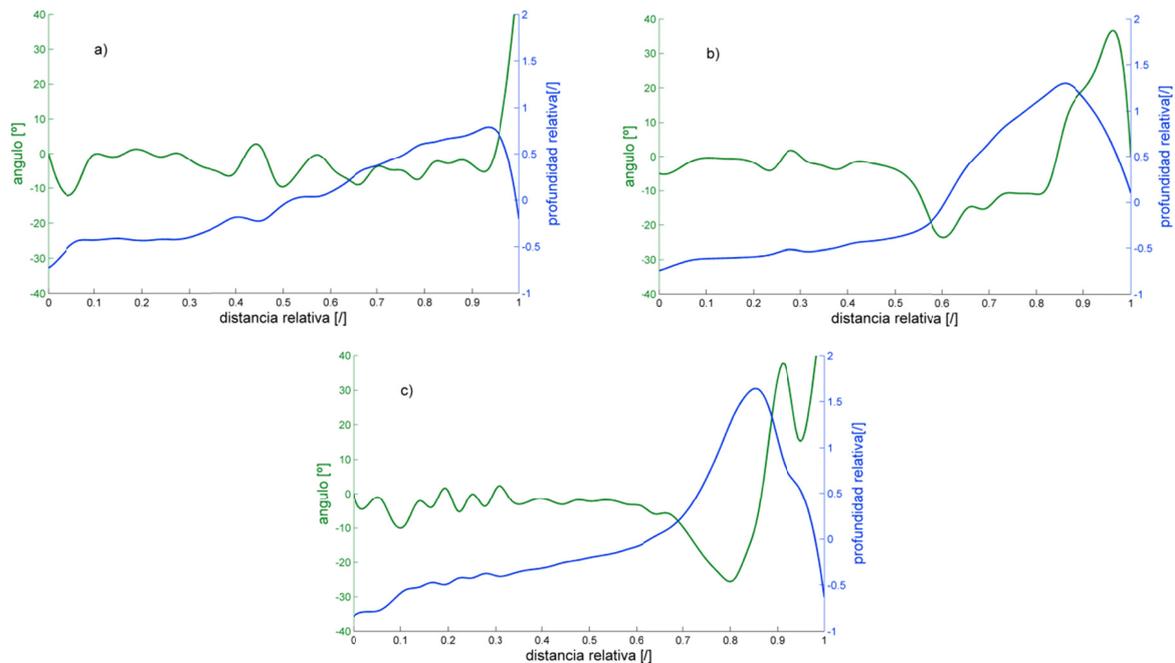


Figura 5.- Angulo de fondo correspondientes a las secciones R3, R7 y R11, a), b) y c) respectivamente.

Estructura de flujo

En la Figura 6 se presentan la distribución de velocidades primarias y secundarias correspondientes a las secciones ubicadas en los ápices de las curvas analizadas, en estas es posible visualizar un movimiento helicoidal el cual se ubica entre la zona de máxima profundidad y el quiebre producido en el fondo por el banco interno. Los anchos de estas celdas secundarias solo ocupan una pequeña proporción del ancho total, i.e. anchos relativos del 28%, 26% y 14% para R3, R7 y R11, respectivamente. Aguas abajo de cada curva las celdas de circulación secundaria se expanden y pierde intensidad/desaparecen inmediatamente indicando su efecto solo local en la zona del ápice.

Para la situación hidrológica relevada, existe una importante transferencia de momento hacia la margen cóncava, provocando una fuerte concentración del flujo y consecuente profundización de la misma con depositación sobre el banco interno. Esta alta concentración del flujo provoca que el banco se extienda aguas abajo hasta el comienzo de la curva siguiente.

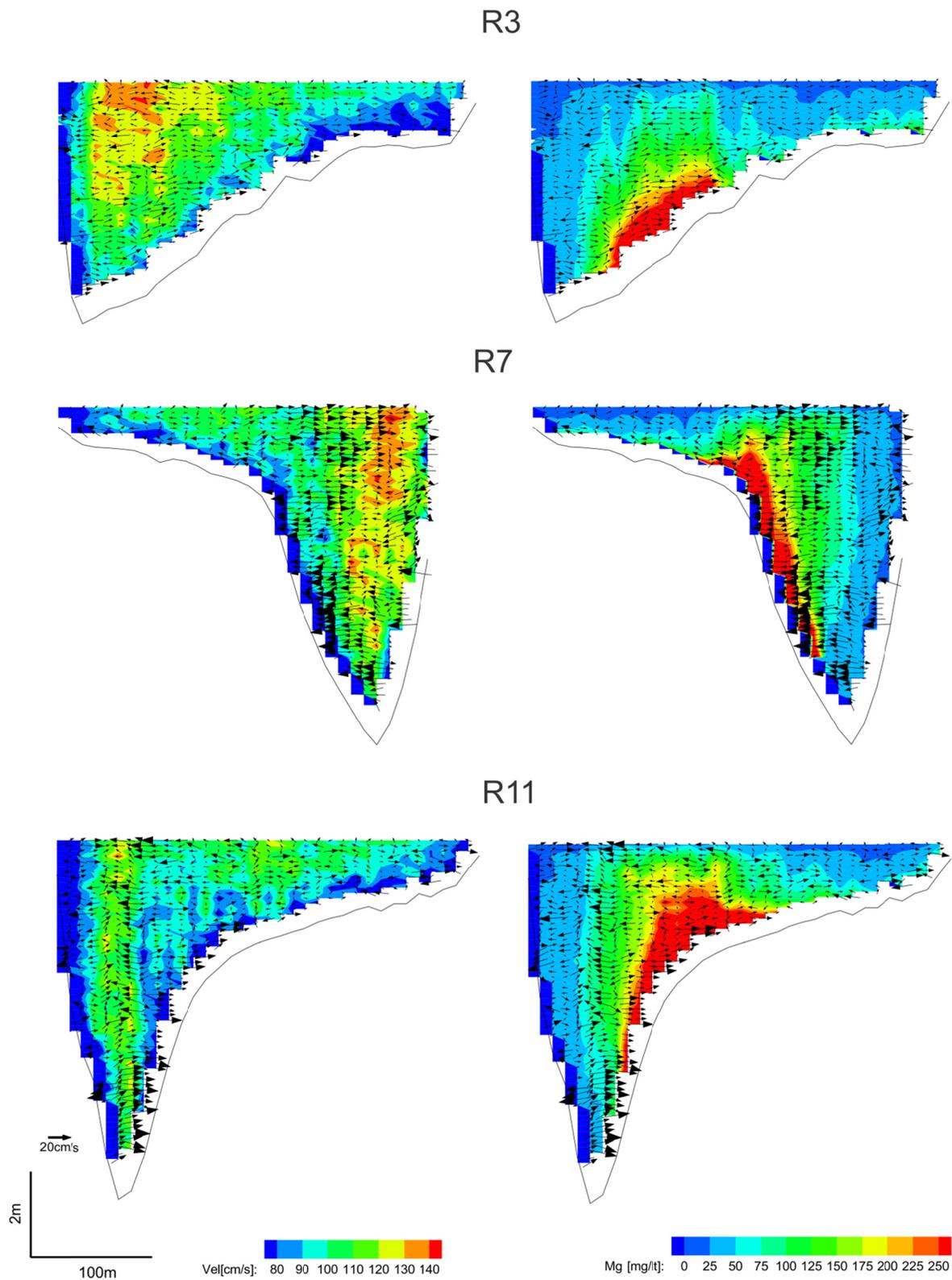


Figura 6.- Campo de concentraciones y velocidades primarias y secundarias.

Los campos de concentración del material de fondo suspendido presentan un comportamiento similar para todas las secciones, ubicándose sobre el centro del cauce con pequeñas variaciones hacia las márgenes en los ápices. Es de notar aquí la no coincidencia con los centros de máximas velocidades.

En Figura 7 se presentan las líneas que unen los núcleos de máximas velocidades y máximas concentraciones de material de fondo en suspensión. Nótese los diferentes tiempos de adaptación de ambas variables, mientras el flujo se adapta más rápidamente a los cambios de curvatura y morfología el comportamiento del sedimento sugiere la necesidad de tiempos y distancias mayores como para adaptarse a los cambios. Esto podría traer efectos de depositación del material e incremento del banco interno.

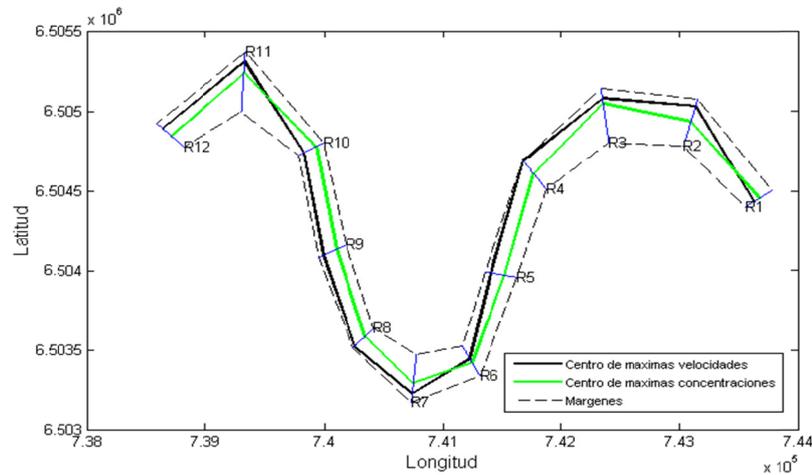


Figura 7.- Regiones de máximas velocidades y máximas concentraciones.

Solo en secciones donde se producen las máximas velocidades secundarias (R7, R8 y R11) se observa un efecto local de estas sobre el material suspendido, inclinando moderadamente las isolíneas de igual concentración, i.e. hacia la margen interna cerca del fondo y hacia la externa en superficie.

Rio Salado

Morfología

A continuación en Figura 8 se presenta el resultado de los relevamientos batimétricos sobre el tramo de estudio correspondiente al Salado. Aquí se puede destacar lo siguiente:

- i) No se distingue un banco interno aplanado, mostrando una sección con una pendiente constante a lo largo de la transecta. De manera similar al cauce analizado previamente, se distingue el cruce del thalweg previo al inicio de la curva siguiente.
- ii) Se detecta la presencia de regiones con máxima erosión en la margen externa aguas abajo de la curva R2 con valores máximos de 9 m, como así también en la curva R4 pero con valores máximos menores cercano a 7m.

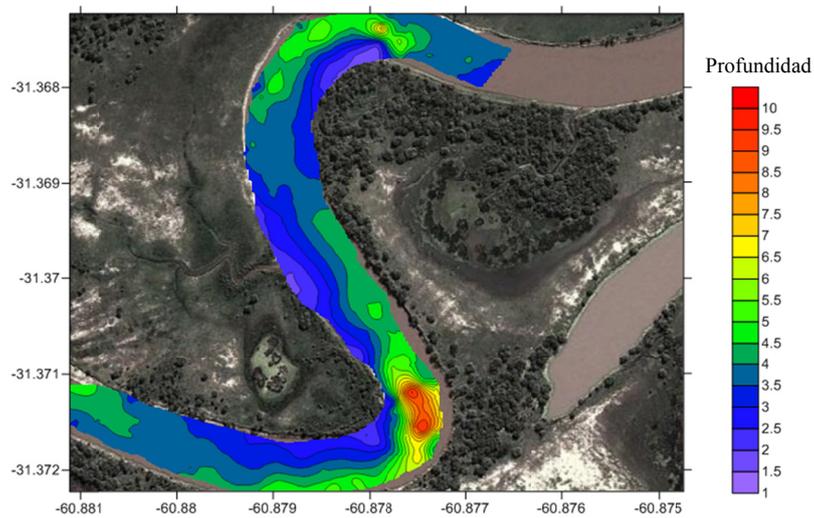


Figura 8.- Batimetría de tramo del estudio correspondiente al río Salado.

iii) En la Figura 9 se presentan las variaciones de la pendiente de fondo para las secciones de los ápices (R2 y R4). En general podemos notar que los ángulos de fondo no presentan variaciones abruptas. Nótese además el cambio de sentido del ángulo de inclinación se da entre 0.8 y 0.9 de la distancia relativa similar para los ápices de mayor curvatura en Colastiné. No se observa el banco de forma plana tal lo relevado en el río Colastiné (pendientes con ángulos cercanos a cero cubriendo un gran porcentaje del ancho total). Para el caso del Salado, las pendientes son gradualmente en aumento.

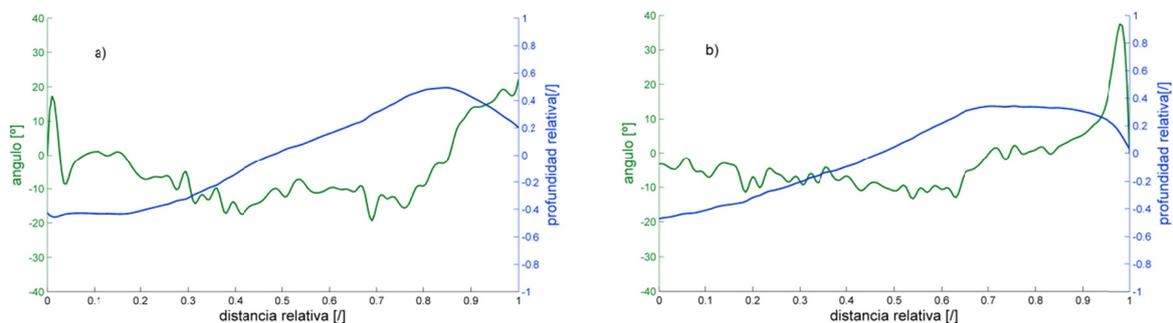


Figura 9.- Ángulo de fondo correspondientes a las secciones R2 y R4 a) y b) respectivamente.

Estructura de flujo

En la Figura 10 se presenta el comportamiento de la estructura de flujo, velocidades primarias y secundarias, correspondientes a los dos ápices (R2 y R4). Se puede detectar un claro movimiento helicoidal en ambas secciones con un ancho de celda de un que cubre aproximadamente entre el 79 (R4) y 80% (R2) del ancho total de la sección. En R2 se observa una capa de corte que limita la celda secundaria principal con otra secundaria de menor intensidad y ancho y de circulación opuesta. Se observa en esta capa una fuerte componente vertical hacia el fondo. En la sección intermedia (R3) la celda desaparece y se forma nuevamente en R4, con sentido de rotación opuesto a R2. Es destacable además en ambas secciones como el centro de máximas velocidades se recuesta sobre el banco interno de las curvas, a diferencia de lo encontrado en Colastiné.

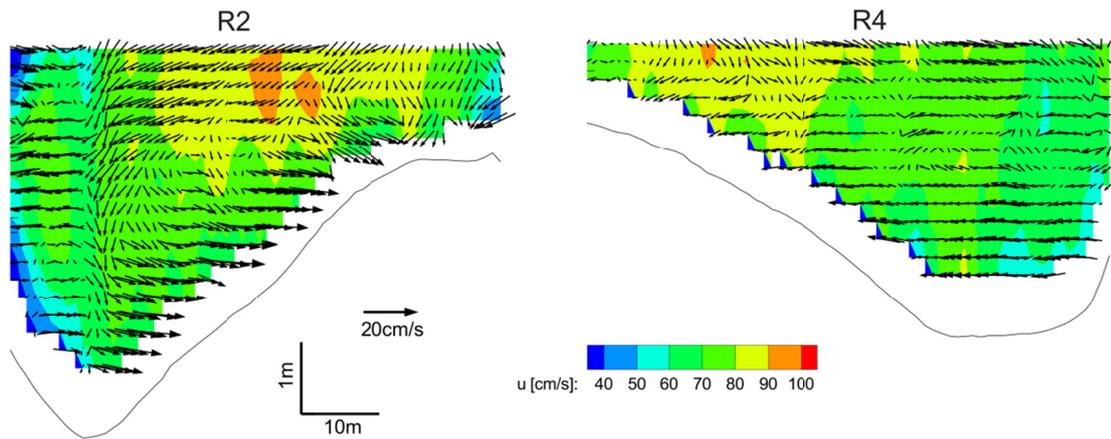


Figura 10.- Campo de concentraciones y velocidades primarias y secundarias.

CONCLUSIONES

El presente trabajo brinda un análisis preliminar del comportamiento del flujo, transporte de sedimento en suspensión y morfología de dos cauces con condiciones fluviomorfológicas distintas. De los datos presentados para los dos escenarios se puede destacar los siguientes puntos:

- i) Un gran desarrollo del banco interno con una brusca profundización y concentración del flujo en la región externa son visibles en el Colastiné. Para el Salado el banco interno tiene reducido desarrollo con pendientes mayores y crecientes hasta llegar al thalweg. Los valores de los ángulos transversales de fondo para ambos cauces llegan a 40° solo en las cercanías de la margen externa.
- ii) En ambos cauces se distingue una celda central definida que se desarrolla ocupando distintas proporciones de la sección transversal. En el Colastiné esta celda secundaria presenta un ancho pequeño respecto al ancho de la sección. Además, las intensidades máximas registradas (sección R7) representan valores menores al 10% de la velocidad primaria máxima del flujo. Se observó que estas celdas desaparecen rápidamente hacia aguas abajo. Aunque aún no cuantificado, tampoco tendrían influencia en la redistribución de los centros de máxima velocidad, tensiones de corte y por lo tanto en la morfología. En el Salado se destaca una mayor intensidad de la celda secundaria que logra valores hasta el 20% de la velocidad primaria (R2) y que ocupan un ancho relativo mayor al 70%. Además, en R2, se producen velocidades verticales hacia el fondo del cauce bien definidas.
- iii) En cuanto a las concentraciones de máximas velocidades en el Colastiné se puede notar que esta se mantiene en la región externa a las curvas, donde se conserva hasta el inicio de la curva posterior, donde se cruza hasta la margen externa de la misma. Para el Salado las máximas velocidades se mantienen sobre el banco interno y no hay coincidencia con la línea de thalweg. Este comportamiento resulta particular pocas veces observado en cauces meandriiformes como los estudiados.

Altas fluctuaciones de velocidades (tanto en intensidad como en dirección) se observaron sobre la región de estudio del Colastiné. Aquí, la rugosidad de la margen (erosión irregular) y la presencia de vegetación (árboles caídos) juegan un importante rol en la generación de estas estructuras, sugiriendo procesos

adicionales de erosión de margen a los ya conocidos. En cambio el Salado presentaba márgenes menos rugosas (menos vegetación y forma regular), esto está en relación al material arcilloso y fuertemente cohesivo que conforma la llanura.

El trabajo, brinda el primer análisis realizado a dos sistemas con relaciones A/P diversas y se demostrándose que esta relación A/P produce comportamientos diferentes de las principales variables actuantes y por lo tanto en su dinámica. Se plantea seguir a futuro con mayores comprobaciones y análisis a fin de brindar herramientas de predicción que contemple la compleja interacción hidráulica, sedimentológica, morfológica e hidrológica sobre estas sistemas.

Agradecimiento. Los autores agradecen a Ana Alvarez, Martin Pez, Lucas Palman, Roberto Mir y Santiago Cañete por la colaboración en los trabajos de campo. Este aporte es producto de proyectos de investigación subsidiados por la Universidad Nacional del Litoral: Proyecto CAI+D Proyecto Joven 2011 “El transporte de sedimentos en ríos aluviales. Desarrollo de métodos de medición basados en la tecnología acústica Doppler” y CAI+D Orientados a Problemas sociales y Productivos 2012 “Identificación a mediano plazo de situaciones de compromiso para el escurrimiento fluvial en cauces viales del río Paraná en su tramo santafesino, basada en indicadores geomorfológicos hidráulico-hidrológicos y bióticos”.

REFERENCIA

- Dietrich, W. E. and Smith D.** (1983). “Influence of the point bar on flow through curved channels”. *Water Resources Research*. Vol. 19(5), pp. 1173-1192.
- Hooke, R.L.** (1975). “Distribution of Sediment Transport and Shear Stress in a Meander Bend”, *J. Geology*, Vol.83, No. 5.
- Latosinski F. G.** (2014). "Estimación y caracterización del transporte de sedimento en cauces aluviales utilizando tecnología acústica Doppler". Tesis doctoral. Universidad Nacional de Rosario.
- Parsons, D. R., Jackson, P. R., Czuba, J. A., Engel, F. L., Rhoads, B. L., Oberg, K. A., Best, J. L., Mueller, D. S., Johnson, K. K. and Riley, J. D.** (2013). “Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements”. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38: pp. 1244–1260. doi: 10.1002/esp.3367.
- Szupiany, R. N., Amsler M. L., Best J.L. and D.R. Parsons** (2007b). “Comparison of Fixed- and Moving Vessel Measurements with an ADP in a Large River”, *J. of Hydra. Engi.*, Vol. 133 (12), pp. 1299-1310.
- Termini, D. and Piraino M.** (2011). “Experimental analysis of cross-sectional flow motion in a large amplitude meandering bend”. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 36, pp. 244-256.
- Thomson, J.** (1877). “Experimental demonstration in respect to the origin of windings of rivers in alluvial plains, and to the mode of flow of water round bends of pipes.” Proc., Royal Society, No. 182, Royal Society of London, London, England.
- Yalin M.S. and da Silva A.M.F.** (2001). *Fluvial Processes*. IAHR Monograph, IAHR: The Netherlands.
- Yen, B. C.** (1972). “Spiral Motion of Developed Flow in Wide Curved Open Channels”. In *Sedimentation*, ed. H. W. Shen, pp. 22. 1-22. 33. Fort Collins, Colo H. W. Shen.