

## SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA PARA UN ESCENARIO DE CAUCE LLENO EN EL RÍO SALADO (SANTA FE)

Lucas E. Palman<sup>a</sup>, Matías Imhoff<sup>a</sup>, Martín A. Pez<sup>a</sup>, Sebastián N. Villalba<sup>a</sup>, Ana M. T. Alvarez<sup>a</sup>, Marcos Gallo<sup>b</sup> y Alfredo E. Trento<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, CC 217, (3000), Ciudad Universitaria, Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4, Santa Fe, Argentina.*  
*lucaspalman@gmail.com, <http://www.fich.unl.edu.ar>*

<sup>b</sup>*Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil, <http://www.coppe.ufrj.br>*

**Palabras Clave:** hidrodinámica, bidimensional, Río Salado, elementos finitos.

**Resumen.** El conocimiento de la hidrodinámica es fundamental para la caracterización y comprensión de los procesos de transporte, erosión y deposición de constituyentes en cauces aluviales. El estudio de este fenómeno bajo el supuesto de unidimensionalidad presenta ciertas limitaciones desde el punto de vista práctico, como por ejemplo la presencia de meandros, obras civiles o fuentes puntuales de descargas. En estos casos adquiere particular importancia el conocimiento, por ejemplo, del campo medio de velocidades y su variación en las 3 direcciones ( $x, y, z$ ) y la modelación de los distintos procesos de transporte. Esto justifica la implementación de modelos tridimensionales o bidimensionales para el cálculo de las condiciones hidrodinámicas. El caso de estudio comprende un tramo de aproximadamente 8.0 km de longitud de la cuenca baja del río Salado (Santa Fe, Argentina), receptor de descargas industriales, pluviales y domiciliarias. El alcance del trabajo comprendió la representación hidrodinámica cuasi tridimensional (cuasi 3D) del tramo, implementando el sistema computacional SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental) para un escenario de cauce lleno en condiciones estacionarias. La malla que define el dominio de cálculo está compuesta por 1620 elementos, de 9 nodos por elementos y 6859 nodos en total. El ancho medio del cauce (*bankfull*) es del orden de los 76 m, con profundidades medias de 3.50 m. La calibración y validación del modelo se efectuó en base a mediciones realizadas en mayo de 2015 en situación de cauce lleno. Se realizaron aforos en 3 secciones ( $202 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) con perfilador acústico de corriente Doppler (ADCP), se midieron 9 perfiles verticales de velocidad y se tomaron 22 muestras para la determinación de sólidos suspendidos totales (SST). Se logró una representación satisfactoria del campo de velocidades, en el sentido transversal y vertical del escurrimiento y de las tensiones de corte del lecho en las secciones medidas. Se avanzó en el análisis de sensibilidad del parámetro de rugosidad del cauce y del paso de tiempo de simulación.

## 1 INTRODUCCIÓN

Para comprender los procesos asociados a la dinámica del transporte de constituyentes es esencial conocer las variables hidrodinámicas que gobiernan el fenómeno en cauces aluviales. Estas variables adquieren particular interés durante escenarios de crecida en los cuales pueden tener lugar procesos erosivos ya sean de tipo general o local como es el caso de obras civiles emplazadas en el cauce o valle de inundación. El caso de estudio que se presenta tiene por objeto el cálculo del campo medio de velocidades y tensiones de corte en el Río Salado en la Provincia de Santa Fe. El tramo de estudio, perteneciente a la cuenca inferior del río, comprende una longitud de 8.0 km en inmediaciones del puente de la Ruta Provincial N° 6 (RP6), en cercanías de la localidad de Esperanza. En esta latitud la superficie de aporte de la cuenca alcanza los 180000 km<sup>2</sup> y recorre una longitud cercana a los 2000 km (SSRH, 2009) desde su nacimiento en el río Pasaje o Juramento en la provincia de Salta hasta su desembocadura en el sistema Río Paraná. A partir del ingreso a la provincia de Santa Fe, el cauce escurre con orientación O NO - E SE hasta recibir por margen izquierda el río Calchaquí, que evacua los derrames de la porción sur de los Bajos Submeridionales cuya cuenca alcanza los 61000 km<sup>2</sup>.

El curso inferior se caracteriza por su extenso valle aluvial con anchos de entre 4 y 8 km, pendientes medias del cauce del orden de los 5 cmkm<sup>-1</sup>, traza tortuosa y con curvas agudas. A partir de la serie de alturas diarias 1953/54-2007/08 disponibles en la sección de la Ruta Provincial N° 70 (RP70) y la correspondiente curva de descarga se tiene que el caudal medio anual es de 137 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> con mínimo y máximo diario de 0.08 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y 3954 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> respectivamente (SSRH, 2009).

En relación al transporte de sedimentos, se ha demostrado que el tramo de estudio para situación de aguas medias y bajas predominan los sedimentos finos en suspensión (Trento y Álvarez, 2011) en tanto que las arenas se transportan como formas de fondo (Szupiany *et al.*, 2005). Este sector recibe numerosos aportes de efluentes industriales y domiciliarios provenientes en su mayoría de la cuenca del arroyo Cululú donde se asientan muchas poblaciones con gran actividad agrícola e industrial. En particular se ha detectado presencia de metales pesados en elevadas concentraciones como el cromo disuelto y particulado asociados a la fracción cohesiva de los sedimentos finos (Gallo *et al.*, 2006; Gagnetten *et al.*, 2007; Trento y Alvarez, 2011). Esta problemática motivó el abordaje del tema en diferentes aspectos que van desde estudios de campo (Zenclusen *et al.*, 2014) y laboratorio (Filippa *et al.*, 2013; Filippa *et al.*, 2011) hasta la implementación de modelos numéricos que ayuden a comprender el comportamiento temporal y espacial de los sedimentos y constituyentes asociados (Trento *et al.*, 2010; Pez, *et al.*, 2016). La mayor parte de los trabajos mencionados fueron realizados para escenarios hidrométricos medios y bajos ya que desde el punto de vista ambiental adquiere mayor relevancia este fenómeno. El otro aspecto importante de ensayar bajo estas condiciones es que las mediciones resultan más sencillas y con menores riesgos. Por el contrario, para escenarios de crecida se dispone de muy poca información de variables hidroambientales (como pH, OD, turbidez) y sedimentológicas (como transporte de sedimentos y granulometría). Para estas situaciones el río ocupa gran parte de su valle aluvial que en la zona de estudio es del orden de los 2.0 km, con velocidades medias del orden de 1.0 ms<sup>-1</sup> que vuelven dificultosas las tareas de medición. En estos casos, la implementación de modelos numéricos se vuelve una herramienta muy importante; en particular los modelos hidrodinámicos que brinden información sobre el campo medio de velocidades y sus variaciones en las 3 direcciones (*x*, *y*, *z*) ya que el supuesto de unidimensionalidad en casos tales como la presencia de fuentes de descarga, curvas de meandros y obras civiles, presenta ciertas limitaciones. Estas características propias del tramo de estudio, justifican la implementación de modelos tridimensionales o bidimensionales para calcular las variables hidrodinámicas.

En el presente trabajo se representó la hidrodinámica bidimensional integrada en la vertical (2DH) de un tramo del río Salado utilizando el sistema computacional SisBaHiA (Sistema de Base Hidrodinámica Ambiental) para un escenario de cauce lleno. El tramo de estudio tiene 8.0 km de longitud comprendido entre la *Sección 1*, ubicada 2.0 km aguas arriba del puente de RP6 y la *Sección 3*, ubicada unos 6.0 km aguas debajo de la misma (Figura 1).



Figura 1: Tramo de estudio del río Salado (Santa Fe).

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Mediciones de campo

La información se obtuvo a partir de un trabajo de campo llevado a cabo el 06 de mayo de 2015 para un escenario de cauce lleno.

Se realizaron mediciones de velocidades, profundidades y caudales utilizando un equipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) modelo Workhorse Río Grande de 1200 kHz (Teledyne RDI) capaz de registrar un amplio rango de velocidades ( $\pm 20 \text{ms}^{-1}$ ) y profundidades (0.50 m a 30 m). El equipo fue montado sobre una embarcación con motor fuera de borda acoplado a un sistema de posicionamiento global satelital diferencial (DGPS-RTK) que permite obtener coordenadas horizontales con una precisión de  $\pm 0.02$  m.

Para las mediciones de calidad de agua y sedimentos se utilizaron los siguientes equipamientos montados en un bastidor de acero: sonda multiparamétrica YSI 6600 (SonTek) para medición de turbidez, difractor láser LIST 25X para determinación de tamaños de partículas y equipo de bombeo para toma de muestras de agua. Se obtuvieron registros de turbidez, tamaño de partículas en suspensión y muestras de agua en 3 verticales (y en 3 puntos de la vertical) de cada sección para determinar sólidos suspendidos totales (SST) y granulometría.

La información batimétrica del tramo se obtuvo a partir del relevamiento de 3 secciones transversales, un perfilaje longitudinal siguiendo la línea central del cauce y otro en zig-zag (“cocido”). Se realizaron 6 aforos (producto de dos pasadas en cada sección) y se registraron velocidades en 9 verticales con embarcación anclada en las 3 secciones mencionadas. El tiempo de medición en cada vertical fue de 15 minutos y una frecuencia de muestreo de 0.4 segundos cada 25 cm de profundidad.

## 2.2 Trabajos de gabinete y laboratorio

Se realizó el procesamiento de la batimetría vinculando los datos relevados a cota IGN (Instituto Geográfico Nacional) a partir de un punto acotado en RP6, a fin de comparar los resultados con los antecedentes disponibles. Se registraron cerca de 8500 puntos con una distribución espacial que permitió representar adecuadamente el lecho y las formas de fondo presentes en todo el tramo.

A partir de los aforos se obtuvieron las velocidades medias verticales discretizadas en fajas de aproximadamente 0.60 m de ancho en toda la sección. De esta manera se obtuvo una buena distribución de caudales en la sección.

Se procesaron los valores puntuales de velocidad obtenidos con la embarcación anclada a fin de construir el perfil vertical de velocidades que permitirán estimar la velocidad de corte y la rugosidad de fondo y compararlos con los del modelo.

Se analizaron las 22 muestras de agua y se determinaron las concentraciones de SST (mediante la técnica de filtrado) en cada vertical para las 3 secciones y 3 curvas granulométricas del material en suspensión utilizando un difractor láser Malvern Mastersizer.

## 2.3 Cálculo hidrodinámico

La representación cuasi 3D del escurrimiento se realizó mediante el modulo bidimensional integrado en la vertical (2DH) acoplado al 3D analítico-numérico de SisBaHiA (Rosman, 2015). El modelo matemático en el que se basa, considera las dos ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento con la aproximación de aguas someras para escurrimientos homogéneos integrados en la vertical (Ecs. (1) y (2)), una ecuación de continuidad (Ec. (3)) y una ecuación analítico-numérica de los perfiles verticales de velocidad  $u(x,y,z,t)$  y  $v(x,y,z,t)$  (Ec. (4)). De esta manera se tienen las cuatro ecuaciones para resolver las cuatro incógnitas del modelo hidrodinámico:  $U, V, \zeta, u_i(z)$ .

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - 2u\phi \text{sen}\theta = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o(H + \zeta)} \left( \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xy})}{\partial y} + (\tau_x^S + \tau_x^B) \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - 2u\phi \text{sen}\theta = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o(H + \zeta)} \left( \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{yy})}{\partial y} + (\tau_y^S + \tau_y^B) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(H + \zeta)}{\partial x} + \frac{\partial V(H + \zeta)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$u_i(z) = \frac{1}{\kappa|u_*|_i} \left[ M \frac{\tau_i^B}{\rho_o} \ln \left( \frac{h + z + k_s}{k_s} \right) - \frac{\tau_i^S}{\rho_o} \ln \left( \frac{\zeta - z + k_s}{H + k_s} \right) \right] \quad (4)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $x$  e  $y$  son las direcciones principales en el sentido longitudinal y transversal, respectivamente;  $-h$  es la cota de fondo,  $\zeta(x,y,t)$  es la cota de pelo de agua,  $H(x,y,t) = \zeta + h$  es la profundidad total;  $U$  y  $V$  son las componentes de las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $\rho_o$  es la densidad del agua;  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$  y  $\tau_{xz}$ , son las tensiones turbulentas;  $\tau_x^B$  y  $\tau_y^B$  son las tensiones

resistivas en el lecho;  $\tau_x^S$  y  $\tau_y^S$  las tensiones resistivas en la superficie del agua, todas ellas en las direcciones indicadas por los subíndices;  $\emptyset$  es la velocidad angular de rotación de la Tierra en el Sistema de coordenadas local;  $\theta$  es el ángulo que indica la latitud en radianes,  $u_i(z)$  donde  $i=1,2$  representa las componentes de las velocidades  $x$  e  $y$  a diferentes profundidades;  $u_*$  es la velocidad de corte;  $k_s$  es el coeficiente de resistencia de fondo adoptada constante para este caso;  $M$  es un parámetro utilizado para imponer la condición de igualdad entre la velocidad media vertical del perfil de velocidad 3D y la velocidad 2DH promediada en la vertical.

El proceso de cálculo del método 3D analítico-numérico consta de 3 pasos: en primer lugar, el modelo calcula  $U$ ,  $V$ ,  $\zeta$  a través del módulo 2DH resolviendo las ecuaciones Ecs. (1), (2) y (3). Luego el módulo analítico-numérico 3D calcula los perfiles de velocidad  $u(x, y, z, t)$  y  $v(x, y, z, t)$  en función de las variables calculadas en el paso anterior. Los dos módulos se acoplan ya que las tensiones de fricción en el fondo para el cálculo del flujo 2DH dependen de los perfiles de velocidad 3D que a su vez dependen de la solución del flujo 2DH. Finalmente, se actualizan los vectores solución de  $U$ ,  $V$ ,  $\zeta$   $u$  y  $v$  y se vuelve al primer paso para calcular las soluciones para el siguiente instante de tiempo, repitiendo este procedimiento hasta que el tiempo de simulación especificado sea completado.

El tratamiento de la turbulencia está basado en la técnica de filtrado (Rosman, 1987) y es auto-ajutable en la escala de sub-grilla. La discretización espacial en el plano horizontal  $x$ - $y$  del dominio de cálculo se realiza mediante elementos finitos lagrangianos isoparamétricos. Las variables del escurrimiento y los parámetros del dominio quedan definidos por polinomios lagrangianos cuadráticos en una malla de elementos cuadrangulares. En cuanto a la discretización temporal, cabe destacar la aplicación de esquemas de diferencias finitas de segundo orden, utilizándose el esquema de Cranck-Nicolson para los términos lineales y una factorización implícita de segundo orden en los no lineales (Rosman, 1997).

En la Figura 2 y 3, se presenta la malla para todo el dominio de trabajo conformada por 1620 elementos cuadrangulares isoparamétricos, de 9 nodos por elemento, con un total de 6859 nodos (Pez et al., 2016). Los contornos del dominio de cálculo se determinaron en base a una imagen satelital obtenida de Google Earth, correspondiente al 12 de abril del año 2013, fecha para la cual las condiciones hidrométricas fueron similares a las presentadas durante la crecida del 06 de mayo del año 2015. El ancho del cauce, de 76 m en promedio, quedó representado en toda su longitud por 9 elementos de 8.4 m de ancho medio, contando de esta manera con 19 nodos de cálculo en la dirección transversal a la corriente, en tanto que la longitud del tramo quedó determinada por 180 elementos de 46 m de longitud promedio. Cabe mencionar que no se tuvo en cuenta el efecto de las pilas del puente de RP6 en la modelación pues se supuso que su efecto fue despreciable en relación a la escala geométrica del escenario hidrodinámico -el ancho total de las pilas del puente representa alrededor del 8% del ancho de la sección-. En el mismo sentido, no se tuvieron en cuenta las formas de fondo en el armado de la malla. El plano de referencia para la batimetría se ubicó en la cota cero IGN.



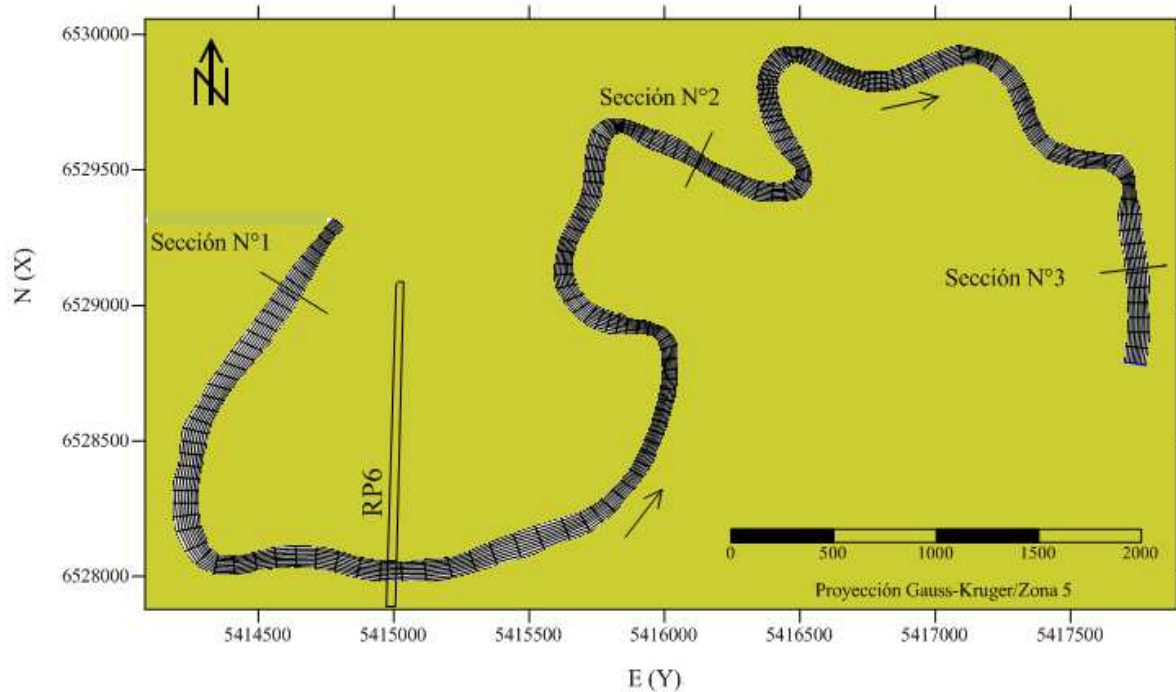


Figura 2: Malla del modelo SisBaHía y las 3 secciones de medición.

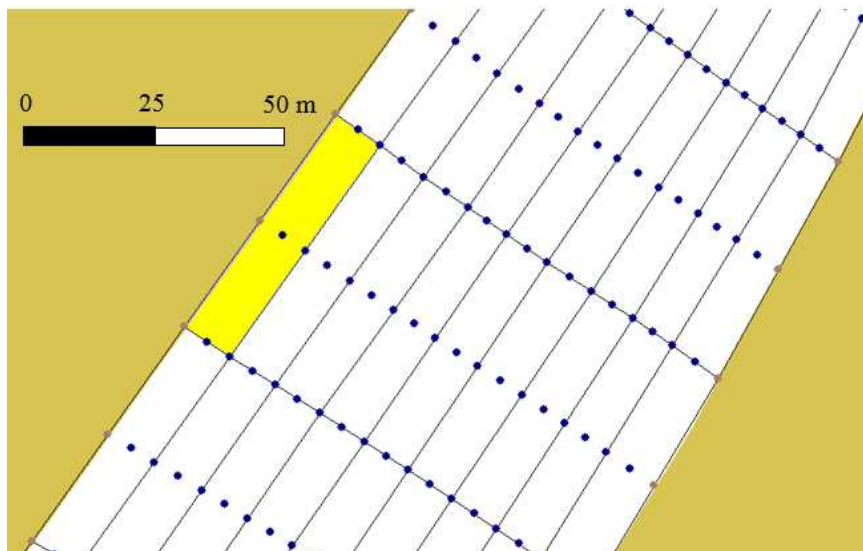


Figura 3: Detalle de los nodos (puntos) y elementos (polígonos) de la malla.

Para el cálculo de la hidrodinámica, se estableció como condición de borde en la sección de aguas arriba el caudal aforado el día de la campaña (distribuido como caudales específicos en cada nodo). En la sección de aguas abajo se fijó una cota del pelo de agua estimada a partir de la cota de pelo de agua medida en RP6 y asumiendo una pendiente hidráulica para el tramo. La definición de las condiciones iniciales implica la asignación, a todos los nodos del dominio, de cota del pelo de agua y las dos componentes horizontales de velocidad para el instante inicial de la simulación. Estos valores se estimaron utilizando los datos relevados con el ADCP.

El valor de  $k_s$  fue determinado a partir del análisis de los perfiles de velocidad vertical medidos (ajustados mediante la Ley Logarítmica) y mediante expresiones empíricas que tienen

en cuenta la granulometría del lecho y las formas de fondo en Villalba et al. (2017) para las 3 secciones de aforo; con valores máximos y mínimos de 0.29 m y 0.06 m respectivamente. En el modelo se asumió un valor único (y permanente) para todo el tramo para cada corrida.

La simulación en condición estacionaria, se efectuó para un tiempo total de 10 horas, tiempo suficiente para garantizar valores estables del modelo. Los intervalos temporales de cálculo ( $\Delta t$ ) variaron entre 0.25 y 4.00 s con el fin de analizar la sensibilidad.

La calibración del modelo se realizó mediante el contraste de las velocidades (en planta y en profundidad) y aforos medidos y calculados.

Se calcularon también las tensiones de corte de fondo  $\tau_o$  y se compararon con el valor de la tensión de corte crítica  $\tau_c$  determinada en estudios previos (Trento y Álvarez, 2011) de  $0.26 \text{ Nm}^{-2}$  a fin de evaluar las condiciones de erosión del escenario.

### 3 RESULTADOS

El caudal medido durante las mediciones de campo del 6 de mayo de 2015 fue del orden de los  $202 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , que se corresponde a una frecuencia del 18% según la curva de distribución de caudales para 50 años de registros en RP70 (SSRH, 2009). El escenario hidrológico de la campaña tuvo lugar durante un período de recesión del río -que duró más de cuatro meses- luego de la crecida extraordinaria de marzo del mismo año, en la que el caudal máximo en RP70 alcanzó los  $1300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

Con el equipo ADCP se registraron velocidades máximas de  $1.10 \text{ ms}^{-1}$  y profundidades medias de 4.0 m. Por cuestiones operativas con el equipo ADCP utilizado, no fue posible el registro del campo de velocidades y batimetría en cercanías de los contornos; concretamente a 5.0 m de la margen, en los últimos 0.80 m desde el fondo y en los primeros 0.90 m desde la superficie. En esos espacios no se pudo registrar información.

La calibración del modelo se logró a partir del ajuste del  $k_s$ . Este ajuste se logró en dos etapas: a) en primer lugar se trabajó con el modelo 2DH, se adoptaron valores de rugosidad de 0.05, 0.07 y 0.012 m y se comparó el campo de velocidad en planta medido y calculado en las 3 secciones; b) luego se trabajó con el módulo 3D analítico-numérico, con el mismo set de datos de rugosidad de a), comparando los 9 perfiles verticales de velocidad medidos con los calculados.

De la simulación con el modelo 2DH, se obtuvo que el valor de rugosidad que mejor representa la hidrodinámica del tramo es de 0.07 m y el paso de tiempo de cálculo apropiado  $\Delta t = 4.0 \text{ s}$ .

En la Tabla 1 se presentan los caudales ( $\bar{Q}$ ) y velocidades medias en la sección ( $\bar{V}$ ) calculadas y medidas con los respectivos errores relativos ( $E$ ). Se aprecia que los errores son del orden del 10%.

Sección	$\bar{Q}$ medido	$\bar{Q}$ calculado	$E$ [%]	$\bar{V}$ medida	$\bar{V}$ calculada	$E$ [%]
	[ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ]		[ $\text{ms}^{-1}$ ]	[ $\text{ms}^{-1}$ ]	
1	200.0	210.1	-5.0	0.84	0.78	6.6
2	202.3	191.4	5.3	0.88	0.81	7.5
3	204.1	211.8	-3.8	0.92	1.02	-11.1

Tabla 1: Comparación de caudales y velocidades (medios) medidos y calculados en las secciones 1, 2 y 3.

En la Figura 4 se presentan las velocidades en la transversal calculadas y medidas con la media móvil (intervalo 10) respectiva -para eliminar la dispersión de los datos instantáneos- para las 3 secciones para la rugosidad mencionada. Se aprecia una adecuada representación del campo medio de velocidades en las tres secciones analizadas. Los errores obtenidos en los

caudales podrían estar asociados a la falta de información hidrodinámica y batimétrica en las zonas cercanas a los contornos de la sección. En la sección 2, se evidencia un fenómeno particular sobre la margen izquierda (zona más profunda de la sección) donde las velocidades medidas alcanzan valores cercanos a cero y aumentan rápidamente hasta alcanzar su valor máximo en la progresiva 10 m; esto puede revelar un fenómeno hidráulico local que para ser representado adecuadamente con el modelo se precisa de información batimétrica de mayor detalle. A partir de la progresiva 20 m, las velocidades calculadas y medidas siguen similar comportamiento hasta el final de la sección.

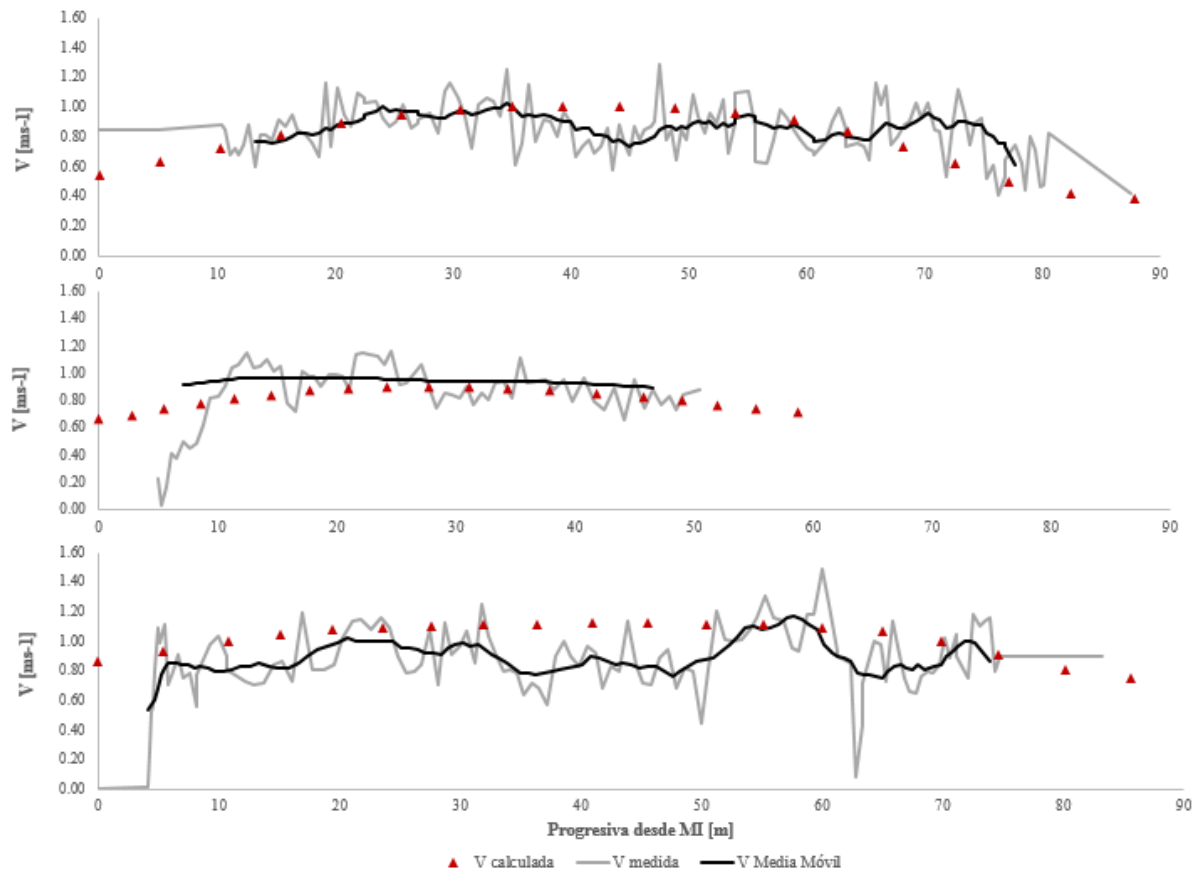


Figura 4: Perfil transversal de velocidad. De arriba hacia abajo, Sección 1, 2 y 3.

En la [Figura 5](#) se presenta la batimetría y un detalle del campo de velocidades -en inmediaciones de la Sección 2- resultantes de la simulación. Como se aprecia, las profundidades son del orden de los 3.0 m en todo el tramo, con presencia de zonas profundas (superiores a 6.0 m) sobre la margen externa aguas abajo de los meandros.

En la [Figura 6](#) se presentan los perfiles verticales de velocidades medidas y calculadas con el módulo 3D analítico-numérico de SisBaHiA para 3 rugosidades. Las verticales presentadas corresponden a mediciones realizadas sobre la zona central y a la margen derecha de la Sección 1 respectivamente. Para el ajuste de los perfiles verticales en las secciones 2 y 3, se precisarán mayores niveles de detalle batimétrico.

Se evidencia que el campo de velocidades (2DH), es poco sensible a las variaciones del  $k_s$  en la porción superior de la capa límite: un aumento del 80% de la rugosidad, representó



variaciones del 5% de la velocidad media. Sin embargo, en la zona inferior de la capa límite existen grandes variaciones del perfil de velocidad para los valores de rugosidad analizados.

En relación al paso de tiempo de cálculo  $\Delta t$  se verificó que, conforme este aumenta, se observa una leve disminución del caudal y la velocidad media calculada por el modelo. Sin embargo no resulta ser una variable sensible en tanto que variaciones del 100% del  $\Delta t$ , representaron variaciones del 2% en el cálculo del caudal y del 3% en la velocidad media.

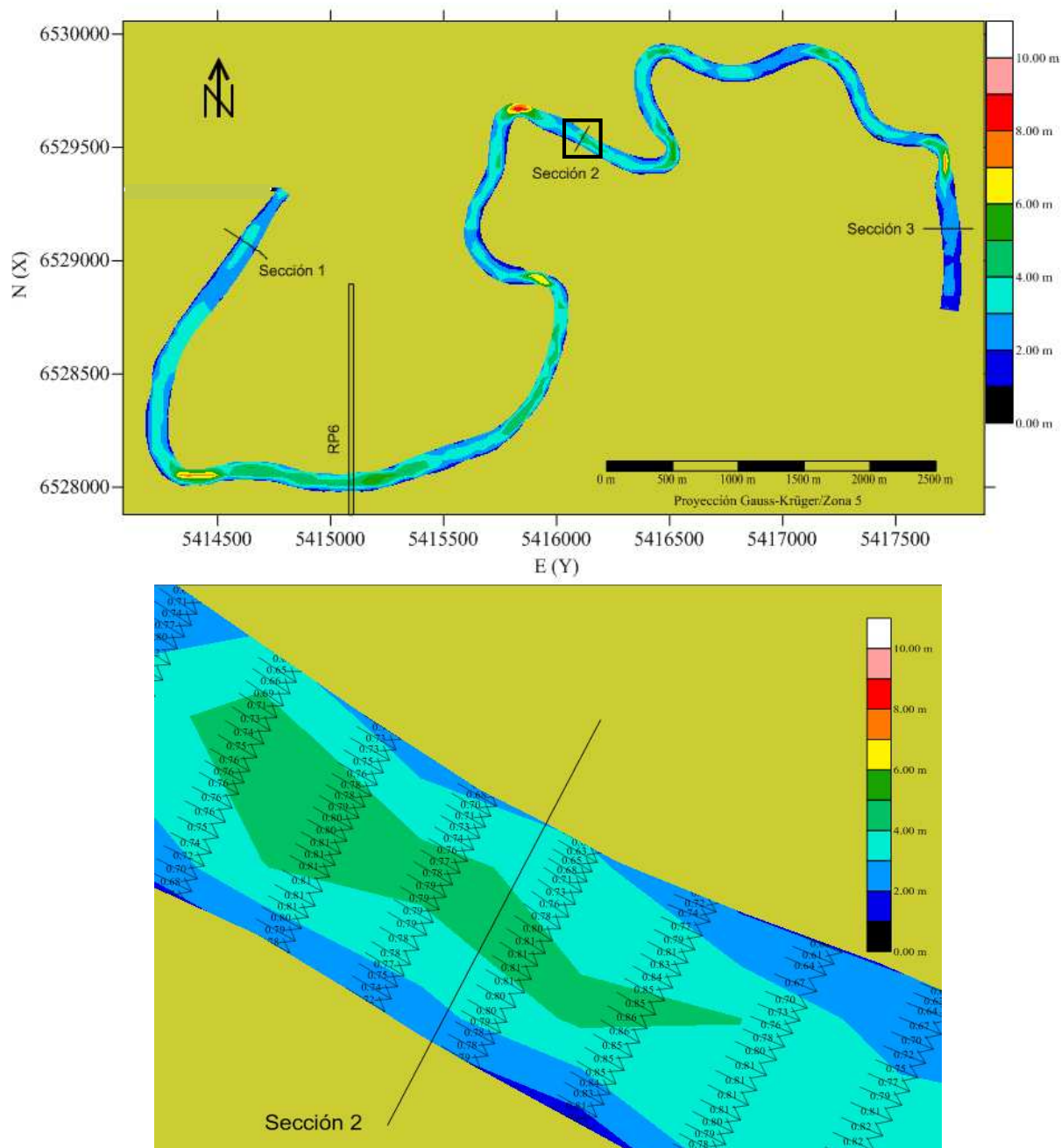


Figura 5: Batimetría (profundidad) del tramo y detalle del campo de velocidades calculadas con SisBaHiA en inmediaciones de la Sección 2.

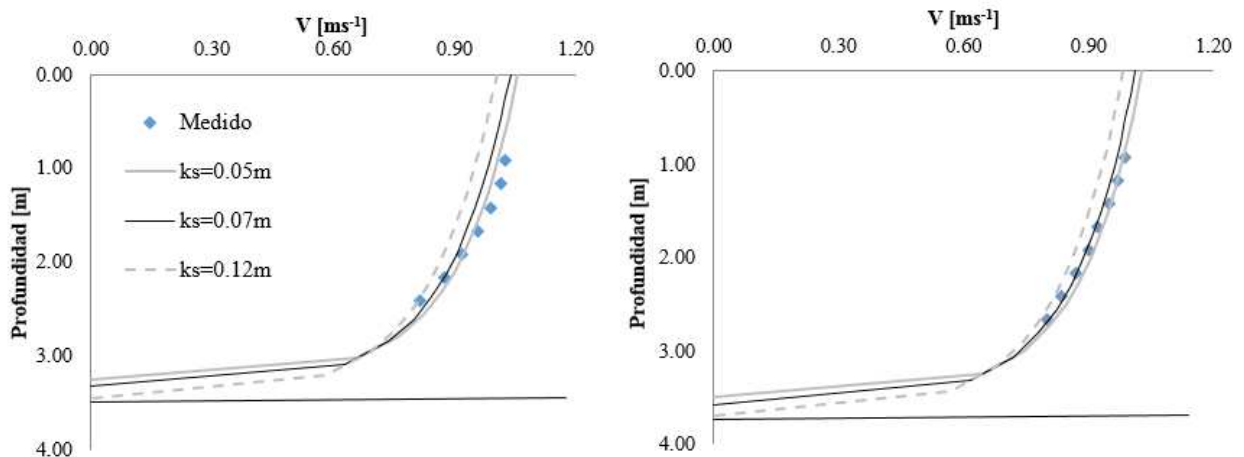


Figura 6: Perfiles verticales de velocidad medidos y calculados en la Sección 1 correspondientes a la zona Central (izquierda) y sobre Margen Derecha (derecha) del cauce para diferentes valores de rugosidad  $k_s$ .

En la Figura 7 se muestra el mapa de tensiones de corte de fondo  $\tau_o$  calculadas para todo el tramo. El valor medio es del orden de los  $4.0 \text{ Nm}^{-2}$ , con máximos que alcanzan los  $13.0 \text{ Nm}^{-2}$  y mínimos de  $0.06 \text{ Nm}^{-2}$ . Vale aclarar que las zonas de tensiones de corte máximo que se visualiza en los dos extremos del tramo se deben tomar con cierta reserva ya que están fuertemente influenciadas por las condiciones de borde. Se verificó que el 99% de los nodos las tensiones superan a la tensión de corte crítica de  $0.26 \text{ N m}^{-2}$  lo que confirma las condición erosiva para el escenario analizado.

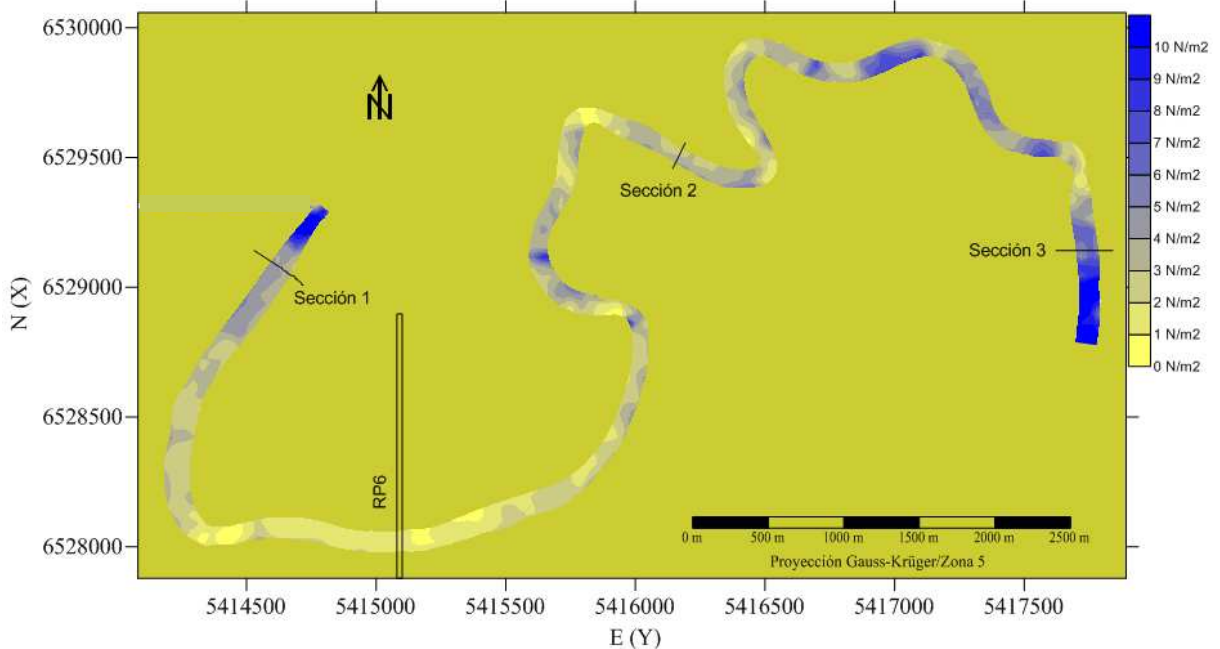


Figura 7: Mapa de tensiones de corte de fondo  $\tau_o$  [ $\text{Nm}^{-2}$ ].

## 4 CONCLUSIONES

Se logró una buena representación de las condiciones hidrodinámicas del tramo de río para la situación hidrométrica analizada utilizando el módulo 2DH, con errores relativos de caudal medio del orden del 5% y de velocidades transversales medias del orden 10%.

Con el módulo cuasi 3D se obtuvieron perfiles de velocidad vertical aceptables en algunas secciones. En otras secciones no se lograron buenos ajustes debido a que se requiere de mayor información batimétrica que permita definir con mayor detalle la zona próxima al punto de medición.

Se verificó que el modelo es poco sensible a las variaciones de la rugosidad del cauce  $k_s$  en cálculo de la velocidad media, pero se torna importante en el cálculo de velocidades en cercanías del fondo. El mejor ajuste se logró con un valor de 0.07 m. Respecto de los pasos de tiempo de cálculo, se ha observado en el módulo 2DH que los errores, tanto en las velocidades como en los caudales medios, aumentan al disminuir el mismo.

Finalmente, se pudo corroborar las condiciones erosivas para el estado hidrométrico analizado en los que la tensión de corte de fondo, del orden de los  $4.0 \text{ N.m}^{-2}$ , superaba en más de diez veces la tensión crítica del lecho.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al grupo de investigación dirigido por el Dr. Ricardo Szupiany quienes realizaron los relevamientos con ADCP y GPS. Se agradece al personal del CIM de la FICH por la valiosa información meteorológica.

## REFERENCIAS

- Filippa, L., Freire, L., Trento, A., Alvarez, A., Gallo, M. and Vinzón, S., Laboratory evaluation of two Lissat-25X using river sediments, *Sedimentary Geology*, Elsevier, 238:268-276. DOI:10.1016/j.sedgeo.2011.04.017, 2011.
- Fillipa, L., y Trento, A., Ensayos de floculación con sedimentos del río Salado contaminados con cromo mediante un dispositivo Jar Test, *III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, Santa Fe, 77-78, 2013.
- Gagneten, M., Gervasio, S. and Paggi, J., Heavy Metal Pollution and Eutrophication in the Lower Salado River Basin (Argentina), *Water, Air and Soil Pollution*, 178:335-349, 2007.
- Gallo, M., Trento, A., Alvarez, A. M. T., Beldomenico, H., Campagnoli D., Dissolved and Particulate Heavy Metals in the Salado, *Water Air And Soil Pollution*, 174:367 – 384, 2006.
- Pez, M., Villalba, S., Alvarez, A. M., Palman, L., Trento, A., Representación 2DH del pico de una crecida en el río Salado (Santa Fe), *Mecánica Computacional*, XXXIV: 2185-2197, 2016.
- Rosman, P. C. C., *Modeling Shallow Water Bodies via Filtering Techniques*. Ph.D. Thesis, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Civil Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1987.
- Rosman, P.C.C. *Subsídios Para Modelagem de Sistemas Estuarinos*. In: Rosman, P.C.C., Almeida, A.B., Eiger, S., Eds., *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, 3rd Edition, ABRH, Porto Alegre, 238-348, 1997.
- Rosman, P., *Referência Técnica do SisBaHiA®*, (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>), 2015.
- SSRH, Subsecretaría de Recursos Hídricos, Estadística Hidrológica de la República. Presidencia de la Nación, Rep. Argentina, 2009
- Szupiany, R., Trento, A., Alvarez, A. M., Transporte de sedimentos de fondo en el río Salado (Santa Fe, Argentina), *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10, 1:79-88, 2005.

- Trento, A. and Alvarez, A., A numerical model for the transport of chromium and fine sediments, *Environmental Modeling and Assessment*, 16, 6:551-564. DOI: 10.1007/s10666-011-9263-5, 2011.
- Trento, A., Alvarez, A., Filippa, L., Gallo, M. y Vinzón, S., Simulación de cromo y sedimentos finos en un escenario fluvial, *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR*, Punta del Este, Uruguay, Trabajo completo 519.pdf, Resumen 2C\_519, pág. 31, 2010.
- Villalba, S., Pez, M., Palman, L., Alvarez, A.M., y Trento, A., Caracterización hidrosedimentológica del río salado (Santa Fe) para un escenario de cauce lleno, *V Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, Buenos Aires, Argentina, 2017.
- Zenclussen, C., Palman, L., Alvarez, A., y Trento, A., Trabajos de laboratorio y campo con un trazador fluorescente para calcular el coeficiente de dispersión longitudinal, *2do Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, 2014.
- Zenclussen, C., Palman, L.E., Montagnini, M.D., Pez, M., Álvarez A.M., Trento, A., Ensayo de trazadores para determinación del coeficiente de dispersión longitudinal, *IV Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, La Plata, Argentina, 2015.