

ANÁLISIS DE LA HIDRODINÁMICA Y EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UN TRAMO DEL RIO SALADO

Lucía Virgilio^{a,b}, Leonardo M. Filippa^{a,b}, Alfredo E. Trento^b

^a*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Argentina, luciavirgilio@gmail.com*

^b*Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral CC 217, (3000) Santa Fe, Argentina, alfredotrento@yahoo.com*

Palabras clave: tensiones de corte, sedimentos, río Salado.

Resumen. El río Salado en su tramo inferior discurre en el territorio santafesino como un río de llanura, caracterizado por la presencia de meandros y con albardones bien definidos en ambas márgenes. Su caudal módulo en la sección de control localizada en la ruta provincial 70 (RP70) es de $137 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En este tramo del río los niveles de contaminación son particularmente elevados, producto del aporte de fuentes de vertido continuo de origen industrial. Hacia fines de 2008 se registró una bajante en la cual el caudal medido fue inferior a Q_{95} , escenario durante el cual las concentraciones de contaminantes se tornaron significativas. Los objetivos del trabajo fueron: 1) obtener, mediante simulación hidrodinámica, el campo de velocidades y de tensiones de fondo para 3 escenarios ambientales con diferentes estados hidrométricos a fin de establecer el proceso de transporte de sedimentos predominante para cada uno de ellos, 2) estudiar el impacto que genera para cada estado hidrométrico el aporte de material particulado por parte de la fuente, mediante la implementación de un modelo Lagrangeano, y 3) vincular los resultados de las simulaciones con la distribución granulométrica del lecho. Los resultados del modelo Lagrangeano indican que, para aguas bajas, la fuente puede alterar la dinámica del transporte de sedimentos en un área de influencia que se extiende hasta la distancia de mezcla completa. El mayor impacto se produce sobre la margen derecha del río. A partir del modelo hidrodinámico fue posible vincular las tensiones de corte de fondo con la granulometría del lecho y de ese modo fue posible explicar la heterogeneidad de los d_{50} medidos en el lecho.

1 INTRODUCCIÓN

Los sedimentos son una parte integral dinámica de los sistemas fluviales, dado que juegan un papel fundamental en sus funciones hidrológicas, geomorfológicas y ecológicas (Westrich & Förstner, 2007). Una de sus características principales es la de actuar como sumidero de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, fenómeno que ocurre principalmente con los sedimentos de granulometría fina (Calmano et al., 1993; Peng et al., 2009). Sin embargo, es importante tener en cuenta que los sedimentos no se encuentran inmóviles en el lecho de los cursos fluviales. Esto se debe a que según las condiciones hidrodinámicas pueden resuspenderse, transportarse aguas abajo y depositarse en zonas con bajas velocidades (por ejemplo: en el lecho, en las orillas y/o en las planicies de inundación). Consecuentemente, este transporte de sedimentos puede generar focos de contaminación en el curso fluvial llamados “hot spots” que pueden ser erosionados y transportados en posteriores procesos de crecida, causando así el deterioro del cuerpo de agua. Por este motivo, los problemas de contaminación no son meramente locales, sino que su escala espacial puede alcanzar decenas de kilómetros, proceso que se puede ir incrementando con el correr del tiempo en la medida que no se conozcan debidamente sus causas y no se realicen las acciones de remediación adecuadas.

El río Salado nace en el norte argentino y recorre más de 1500 km hasta desembocar en el sistema Paraná. En su tramo inferior, objeto de estudio de este trabajo, discurre en territorio santafesino como un río de llanura, y se caracteriza por ser meandriforme y presentar albardones bien definidos en ambas márgenes. En este tramo el cauce fluvial posee un ancho promedio de 60 m y la profundidad promedio es de 0,80 m en condiciones de aguas bajas. El caudal módulo en la sección de control localizada en la ruta provincial N° 70 (RP70) es de $137 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la serie 1953 – 2008 (SSRH, 2009). Además, en dicho tramo el curso fluvial transporta concentraciones variables de sedimentos suspendidos (mayoritariamente limos y arcillas) en el rango de 50 mg L^{-1} a 500 mg L^{-1} para aguas bajas y aguas altas, respectivamente.

Es importante destacar también que este tramo del río se inscribe en una región económicamente próspera dado que las planicies que bordean el cauce son empleadas principalmente para la producción ganadera, tanto de carne como de leche, cuyos productos son comercializados a nivel nacional e internacional. No obstante, el crecimiento socio-económico de la región se contraponen con la elevada contaminación encontrada en el curso fluvial. Esto se debe a que existen fuentes puntuales que vierten efluentes con elevadas concentraciones de contaminantes (orgánicos e inorgánicos) y/o material particulado.

Por este motivo se adoptó como dominio de estudio un tramo de 6,5 km del curso inferior del río Salado, localizado en cercanías de la ciudad de Esperanza (Santa Fe, Argentina). La sección de ingreso se ubica 2,5 km aguas arriba del puente sobre la ruta provincial N° 6 (RP6), mientras que la sección de salida se encuentra 4 km aguas abajo del mismo (ver Figura 1). Dentro de este dominio se encuentran fuentes de descarga continua las cuales se localizan sobre la margen derecha en un tramo que comienza 100 m aguas arriba del puente sobre la RP6 y se extiende 200 m aguas abajo del mismo. A los fines del trabajo el efecto generado por las mismas se concentró en un solo punto localizado sobre la margen derecha en T1 (ver Figura 1).

Los objetivos del trabajo fueron: 1) obtener, mediante simulación hidrodinámica, el campo de velocidades y de tensiones de fondo para 3 escenarios ambientales con diferentes estados hidrométricos a fin de establecer el proceso de transporte de sedimentos predominante para cada uno de ellos, 2) estudiar el impacto que genera para cada estado hidrométrico el aporte de material particulado por parte de la fuente, mediante la implementación de un modelo

Lagrangeano, y 3) vincular los resultados de las simulaciones con la distribución granulométrica del lecho.

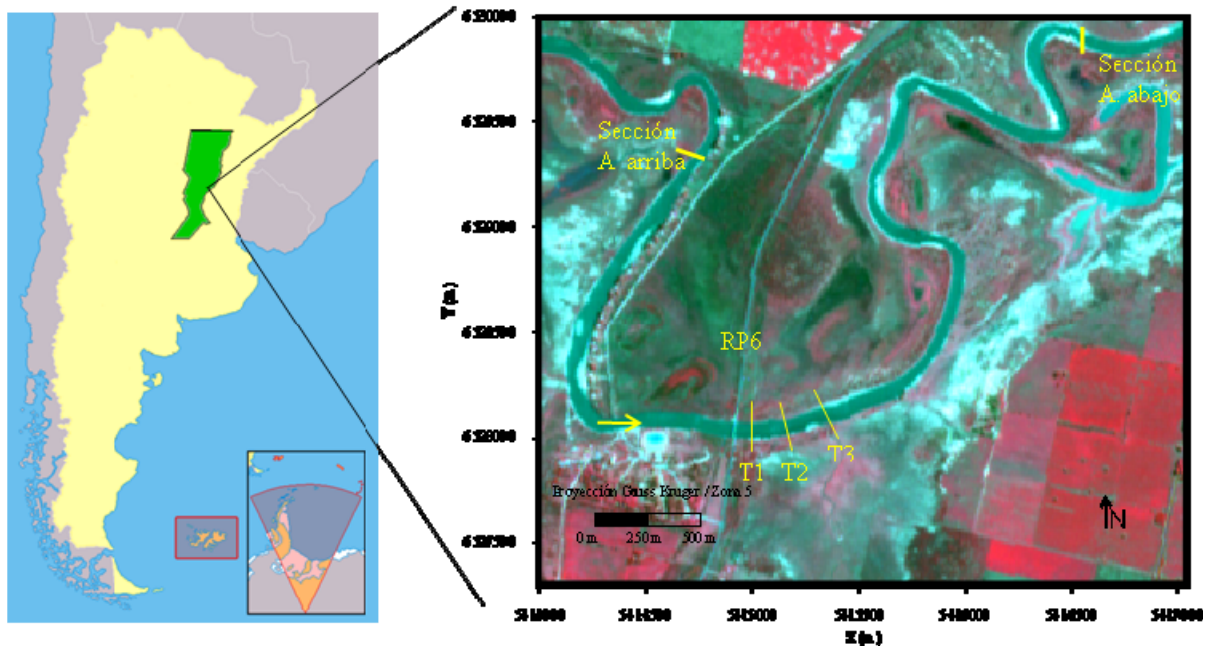


Figura 1: Dominio de estudio del tramo inferior del río Salado (Santa Fe, Argentina), ubicación de las secciones de ingreso y salida del modelo 2DH y de las secciones transversales de muestreo.

A fin de estudiar la problemática del transporte de sedimentos (suspendidos y del lecho) se aplicó el sistema computacional SISBAHIA[®], acrónimo de SISTema BAsE de HIDrodinámica Ambiental (Rosman, 2011), el cual consiste en un conjunto de modelos, hidrodinámicos y de transporte. El mismo se utilizó para simular 3 escenarios ambientales presentados hacia fines de 2008 (ver Figura 2).

El primer escenario simulado fue un pico de crecida, cuyo caudal registrado fue de $103,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Q_1), siendo éste menor que el caudal módulo. El segundo escenario fue una crecida de poca magnitud durante la cual se registró un caudal de $10,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Q_2). Finalmente, se simuló un tercer escenario, que coincidió con una bajante extraordinaria ocurrida en el río Salado hacia fines de Noviembre de 2008, durante el cual el caudal registrado ($Q_3 = 5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) fue inferior al Q_{95} . Los escenarios se caracterizaron por estar bien diferenciados entre sí en cuanto a las condiciones hidrodinámicas imperantes y, consecuentemente, el transporte de sedimentos también fue diferente en cada caso.

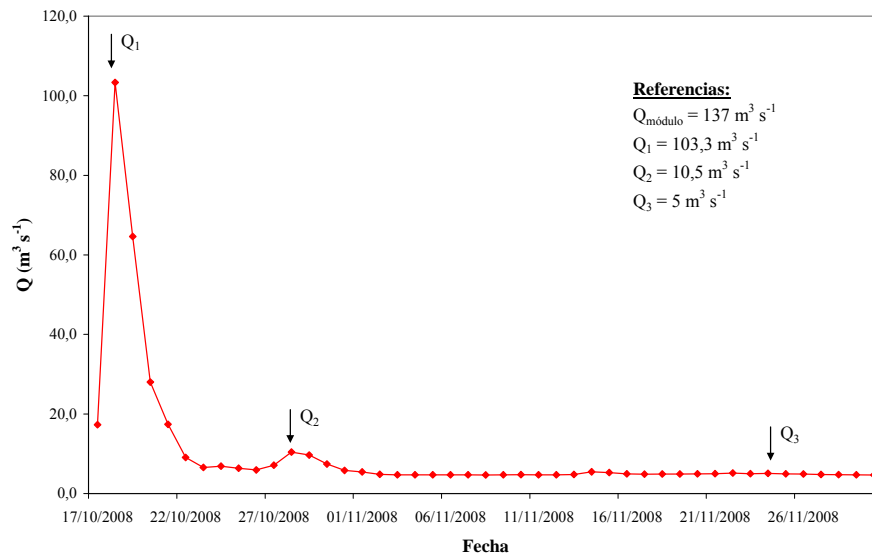


Figura 2: Variación del caudal para el río Salado (Santa Fe, Argentina) desde el 17 de Octubre de 2008 al 30 de Noviembre de 2008, con la referencia de los caudales para los escenarios simulados y el caudal módulo del río.

2 METODOLOGÍA

2.1 Condiciones de implementación del modelo hidrodinámico

El escurrimiento se representó mediante el modelo bidimensional horizontal (2DH) de SISBAHIA[®], el cual resuelve la ecuación de conservación de masa integrada a lo largo de la vertical (1) y las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento con la aproximación de aguas poco profundas en las direcciones horizontales x e y , ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(H + \zeta)}{\partial x} + \frac{\partial V(H + \zeta)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - 2U\phi \text{sen}\theta = \\ & = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0(H + \zeta)} \left(\frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xy})}{\partial y} + (\tau_x^S - \tau_x^B) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - 2V\phi \text{sen}\theta = \\ & = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0(H + \zeta)} \left(\frac{\partial((H + \zeta)\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial((H + \zeta)\tau_{yy})}{\partial y} + (\tau_y^S - \tau_y^B) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

donde: x e y son las direcciones principales en el sentido longitudinal y transversal, respectivamente; U y V son las componentes de las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x e y , respectivamente; $\zeta(x,y,t)$ es la elevación por encima de un nivel de referencia; $H(x,y)$ es la batimetría de cauce y planicie, medida en relación a la cota de un

plano horizontal de referencia; g es la aceleración de la gravedad; ρ_o es la densidad del agua; τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{xz} son las tensiones turbulentas promediadas en la vertical; τ_x^B , τ_y^B son las tensiones resistivas en el lecho y τ_x^S , τ_y^S las tensiones resistivas en la superficie del agua, todas en las direcciones de los subíndices; φ es la velocidad angular de rotación de la Tierra en el sistema de coordenadas local; θ es el ángulo de latitud en radianes. El tratamiento de la turbulencia se basa en una técnica de filtrado, conocida como Large Eddy Simulation (*LES*), la cual se auto ajusta en la escala de la sub-grilla.

La discretización espacial, en el plano horizontal x - y , del dominio de estudio se realiza mediante una malla de elementos finitos cuadrangulares Lagrangeanos isoparamétricos, donde las variables del escurrimiento y los parámetros del dominio son definidos por polinomios Lagrangeanos cuadráticos. Para la discretización temporal se aplican esquemas de diferencias finitas de segundo orden, utilizándose una factorización implícita de segundo orden para los términos no lineales y el esquema de Crank-Nicholson para los lineales. Además, las ecuaciones de gobierno del modelo requieren condiciones iniciales y de contorno. Las condiciones iniciales implican establecer para el instante inicial de simulación los valores de elevación de la superficie libre y/o las componentes de velocidad para todos los nodos del dominio. En lo que respecta a las condiciones de contorno pueden ser de dos tipos: de tierra o abiertos. Los contornos de tierra representan los contornos del cuerpo de agua y los posibles puntos de ingreso y salida, en tanto que los contornos abiertos representan los límites del dominio de agua modelado y no una frontera física. En el primer caso se deben establecer las velocidades o caudales normales en todos los puntos de la frontera, mientras que el segundo implica establecer la elevación de la superficie libre (Rosman, 2011).

Puntualmente, en este trabajo el dominio de estudio se discretizó con una malla de 1027 elementos cuadrangulares isoparamétricos, con 9 nodos por cada elemento (4833 nodos en total). La menor distancia entre nodos fue de 2 m, mientras que la mayor distancia fue de 70 m. El tamaño promedio de cada elemento fue de 15 m. Los contornos del dominio fueron digitalizados en base a una imagen del Satélite Alos del 11 de Febrero del 2009, fecha para la cual las condiciones hidrodinámicas fueron similares a las presentadas durante el mes de Noviembre de 2008. La resolución espacial (tamaño de píxel) de la imagen satelital fue de 10x10 m.

En la grilla de elementos finitos se especificó la localización y el caudal de efluente aportado por la fuente al curso fluvial. Las condiciones de borde para las simulaciones se establecieron en función del caudal medido en la sección de aguas arriba, mientras que en la sección de aguas abajo se fijaron las cotas del pelo de agua.

Las simulaciones, todas ellas bajo condiciones estacionarias, se efectuaron para un tiempo total de 24 horas, con un intervalo de tiempo (Δt) de 5 s. No se consideró el efecto del viento, puesto que no fue relevante. La calibración de las simulaciones hidrodinámicas para los dos primeros escenarios se realizó en base a los registros diarios de la SSRH (2009) y, a resultados obtenidos con un modelo 1D (Brunner, 2008), empleado para simular en condiciones no estacionarias la hidrodinámica durante los meses de octubre y noviembre de 2008 en un dominio extendido de 58 km de longitud (desde RP6 a RP70) que comprende el tramo de estudio de este trabajo. Para el tercer escenario la calibración del modelo hidrodinámico se realizó a partir de mediciones de campo de la cota del pelo de agua y del caudal para el día simulado.

Una vez obtenidos los resultados de las simulaciones hidrodinámicas se evaluó el proceso de transporte predominante para cada escenario simulado, es decir, se determinó si se presentaron condiciones erosivas, de equilibrio o de depositación en cada caso.

Para evaluar si existieron condiciones erosivas se compararon las tensiones de corte obtenidas mediante la simulación con la tensión de corte crítica de erosión (τ_e), adoptándose para esta última el valor de $0,26 \text{ N m}^{-2}$ (Trento et al., 2010).

En caso de no presentarse condiciones erosivas, se observó si existieron condiciones propicias para el transporte de sedimentos de fondo y/o de sedimentos en suspensión. Para evaluar si se presentó movimiento de los sedimentos de fondo se compararon las tensiones de fondo con la tensión de corte crítica (parámetro adimensional de Shields) para la iniciación de movimiento. Mientras que para evaluar si existió transporte de material en suspensión se comparó la velocidad de corte con la velocidad de sedimentación (Parker, 2004).

En caso de que sólo se haya presentado transporte de sedimentos en suspensión se evaluó si existieron condiciones de depositación. Este análisis se realizó según la propuesta de Nicholas et al. (2006) la cual presenta como parámetro principal la velocidad crítica de depositación (u_{cr}), esto es, la velocidad del flujo por debajo de la cual ocurre la depositación. Para el río Salado se adoptó $u_{cr} = 0,07 \text{ m s}^{-1}$ (Trento et al., 2010).

2.2 Condiciones de implementación del modelo de partículas

Una vez calibradas las simulaciones hidrodinámicas se implementó el módulo Lagrangeano de trayectoria de partículas de SISBAHIA[®] a fin de evaluar para cada escenario, la influencia que posee el aporte de sedimentos por parte de la fuente, dado que la concentración de material particulado erogado por esta es del mismo orden que la transportada por el río Salado en condiciones de aguas bajas. Como una primera aproximación al problema, a los fines de evaluar dicha influencia, las simulaciones fueron realizadas de un modo simplificado suponiendo que el río no transporta sedimentos en suspensión provenientes de aguas arriba de la fuente. Es decir, se consideró que el único aporte de sedimentos al sistema lo realiza la fuente.

El modelo de trayectoria de partículas del sistema computacional SISBAHIA[®] resuelve la ecuación de advección – dispersión (4)

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial UC}{\partial x} + \frac{\partial VC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_{xx}}{H} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_{yy}}{H} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_{xy}}{H} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_{yx}}{H} \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (4)$$

donde: C es la concentración de la sustancia de interés, para este trabajo la sustancia de interés son sedimentos suspendidos; D_{xx} , D_{yy} , D_{xy} , D_{yx} son los componentes del tensor que representan los coeficientes de dispersión turbulenta en las direcciones longitudinal y transversal. Los componentes del tensor se calculan con la ecuación (5)

$$\begin{aligned} D_{xx} &= D_L \cos^2 \varphi + D_T \sin^2 \varphi \\ D_{xy} &= D_{yx} = (D_L - D_T) \sin \varphi \cos \varphi \\ D_{yy} &= D_L \sin^2 \varphi + D_T \cos^2 \varphi \end{aligned} \quad (5)$$

donde: φ es el ángulo entre las líneas de corrientes y el eje x ; D_L y D_T son los coeficientes de dispersión de Elder (1959) en las direcciones longitudinales y transversales, respectivamente.

Los coeficientes de dispersión de Elder se ajustan con las siguientes ecuaciones (6)

$$\begin{aligned} D_L &= \alpha (5,93u_*H) \\ D_T &= \beta (0,15u_*H) \end{aligned} \quad (6)$$

donde: α y β son los parámetros de calibración del modelo; u_* es la velocidad de corte.

La fuente eroga un caudal de 80 L s^{-1} con una concentración de sedimentos de 80 mg L^{-1} . Se trata de una fuente de descarga continua, la cual se representa por un número de partículas que son lanzadas a intervalos regulares de tiempo. Las partículas son dispuestas en forma aleatoria en la región fuente y son transportadas por advección, la cual es computada a través del modelo hidrodinámico. La posición de cualquier partícula en un instante de cálculo se determina mediante una expansión en serie de Taylor a partir de la posición anterior. Una vez determinada la nueva posición se incluye un desvío aleatorio, causado por los movimientos que generan velocidades difusivas en las escalas no resueltas, cuya magnitud es función de las derivadas espaciales de la dispersión turbulenta.

En lo que respecta a la fuente se debe definir su ubicación en la grilla de elementos finitos y, también el caudal líquido y la concentración de material particulado erogados por la misma. Las condiciones de contorno del modelo pueden ser de dos tipos: abiertas y de tierra. Los contornos abiertos representan la sección de salida del dominio de modelación. Cuando una partícula atraviesa dicho contorno, sale del dominio y, por lo tanto, no cuenta más en la simulación. Los contornos de tierra representan las márgenes del cuerpo de agua. Para este caso se pueden presentar dos situaciones, que las partículas que lleguen a las márgenes retornen al cuerpo de agua, es decir, que los bordes sean totalmente reflejantes; o bien, que las partículas sean absorbidas por las márgenes (Rosman, 2011).

Las simulaciones se efectuaron para un tiempo total de 24 horas, con un intervalo de tiempo (Δt) de 10 s. La selección del Δt se realizó de forma tal que cumpla con las restricciones propias de los modelos de trayectoria de partículas. Se ingresaron 10 partículas en cada Δt .

La calibración del modelo de partículas sólo se realizó para el tercer escenario dado que se contó con las mediciones de campo de la concentración de sedimentos suspendidos. Por lo tanto, a fin de poder comparar los resultados obtenidos para los 3 escenarios, para el primer y segundo escenario se adoptaron como válidos los valores de los parámetros de calibración del tercer escenario. Una vez implementados los modelos de trayectorias de partículas se realizó un análisis de sensibilidad de los coeficientes de dispersión longitudinal y transversal.

Para los escenarios simulados se comparó la distancia de mezcla completa obtenida mediante simulación con la resultante de aplicar la fórmula empírica de Fischer et al. (1979), propuesta para un canal recto con flujo uniforme, la cual está dada por (7)

$$L = 0,4 \frac{UB^2}{\varepsilon_t} \quad (7)$$

donde: L es la distancia de mezcla completa en la transversal; 0,4 es un coeficiente que se utiliza cuando la descarga es sobre las márgenes; B es el ancho del curso fluvial; ε_t es el coeficiente de dispersión transversal.

Como el río Salado se caracteriza por ser un río meandriforme, el coeficiente de dispersión transversal se calculó según una relación también propuesta por Fischer et al. (1979) la cual es aplicable a cursos meandriformes (8)

$$\varepsilon_t = 0,6u_*H \pm 50\% \quad (8)$$

2.3 Mediciones de campo y de laboratorio

Para el escenario ambiental de aguas bajas, esto es, el tercer escenario, se realizó un muestreo de campo en el cual se tomaron muestras de sedimentos suspendidos y sedimentos

del lecho. Las muestras de sedimentos suspendidos se tomaron con una botella Wildco de 2,2 L en 8 puntos de muestreo, distribuidos a lo largo de todo el dominio de estudio. Las muestras de sedimentos del lecho se tomaron con una draga en 6 puntos de muestreo, distribuidos en 3 secciones transversales (ver [Figura 1](#)). Los 6 puntos donde se tomaron muestras de sedimentos del lecho se corresponden con 6 de los 8 puntos donde fueron tomadas las muestras de la columna de agua. En tanto que las 2 muestras restantes de la columna de agua corresponden a puntos localizados cercanos a la sección de ingreso y de salida, respectivamente.

La distribución granulométrica de las muestras de sedimentos suspendidos y del lecho se determinó en laboratorio mediante difracción láser (Malvern Mastersizer Hydro 2000). Esta determinación permitió conocer, desde $0.01 \mu\text{m}$ hasta $2000 \mu\text{m}$, con distintos intervalos, los porcentajes de sedimentos asociados a cada fracción granulométrica. También en el laboratorio se determinaron las concentraciones de sólidos suspendidos totales mediante el filtrado de muestras de la columna de agua en membranas de $0,45 \mu\text{m}$ (Millipore), según norma ASTM Method D3977-97B ([Guo, 2006](#)).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Modelo hidrodinámico

Los resultados de las simulaciones hidrodinámicas mostraron que para los tres escenarios planteados la estabilización numérica de los modelos se alcanzó antes de las 3 horas de simulación. Para todas las simulaciones las diferencias entre la cota del pelo de agua calculada y la cota medida fueron de ± 1 cm. En lo que respecta a los caudales las diferencias observadas fueron menores al 10 % en todos los casos.

A continuación se muestran y analizan los resultados obtenidos para los 3 escenarios ambientales. El análisis corresponde en todos los casos al tiempo final de simulación. Cabe mencionar que se dio particular énfasis a la evaluación de los resultados en el tramo del río muestreado durante las mediciones de campo, esto es, el tramo que se extiende desde el puente sobre RP6 hasta 1,5 km aguas abajo.

Para el primer escenario simulado los módulos del campo de velocidades y las tensiones de corte variaron en los rangos $0,1 - 0,55 \text{ m s}^{-1}$ y $0,13 - 2,11 \text{ N m}^{-2}$ (ver [Figura 3](#)), respectivamente. Para el segundo escenario el intervalo de variación del campo de velocidades fue de $0,03$ a $0,16 \text{ m s}^{-1}$, mientras que el campo de tensiones varió entre $0,02$ y $0,21 \text{ N m}^{-2}$ (ver [Figura 4](#)). En tanto que para el escenario de campaña, esto es, para la bajante extraordinaria, el campo de velocidades y el de tensiones variaron entre $0,01 - 0,09 \text{ m s}^{-1}$ y $0,01 - 0,10 \text{ N m}^{-2}$ (ver [Figura 5](#)), respectivamente. Por lo tanto, estos resultados muestran que ambos parámetros decrecieron con el caudal, entre escenario y escenario.

En lo que respecta al proceso de transporte predominante para cada escenario simulado se observó que sólo para el primero de ellos las tensiones de fondo superaron la tensión crítica de erosión. Esto indicaría que para dicho escenario existieron condiciones erosivas y que, consecuentemente, los sedimentos del lecho fueron movilizados hacia aguas abajo.

Para el segundo escenario los resultados obtenidos indican que existieron condiciones propicias para la iniciación de movimiento de sedimentos del lecho con granulometría menor a $250 \mu\text{m}$ (categoría de arenas medias); mientras que en suspensión pudieron transportarse sedimentos con granulometrías menores a $62 \mu\text{m}$, es decir, limos y arcillas. En cuanto al proceso de transporte predominante los resultados indican que existieron condiciones de equilibrio sedimentológico.

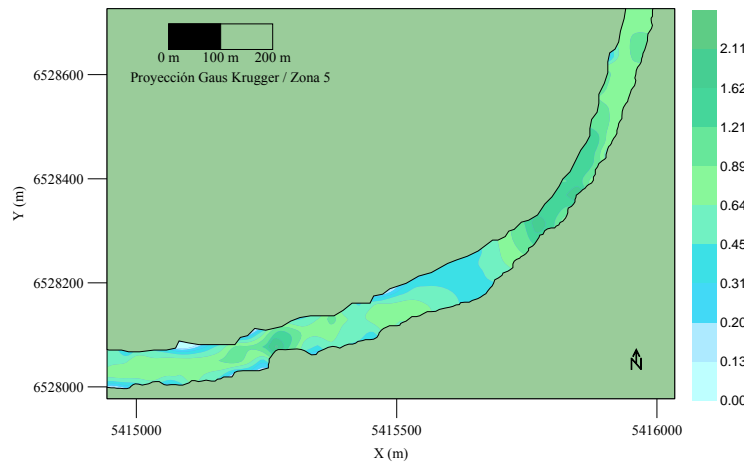


Figura 3: Tensiones de corte de fondo $[N m^{-2}]$ para el primer escenario simulado ($Q_1 = 103,3 m^3 s^{-1}$), en el tramo comprendido entre el puente sobre RP6 y 1,5 km aguas abajo del mismo.

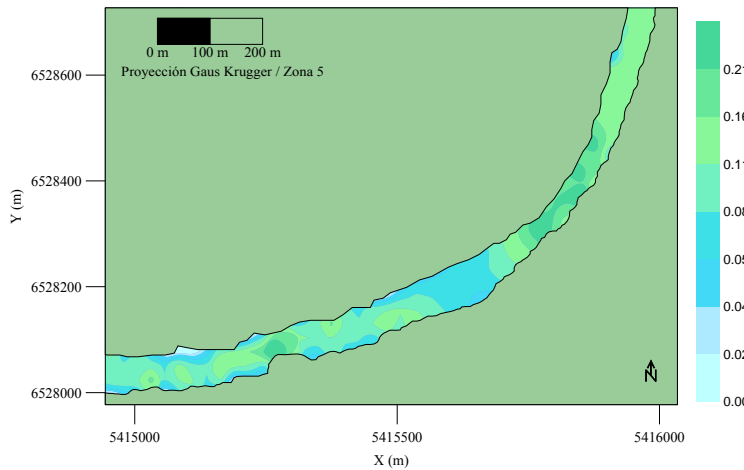


Figura 4: Tensiones de corte de fondo $[N m^{-2}]$ para el segundo escenario simulado ($Q_2 = 10,5 m^3 s^{-1}$), en el tramo comprendido entre el puente sobre RP6 y 1,5 km aguas abajo del mismo.

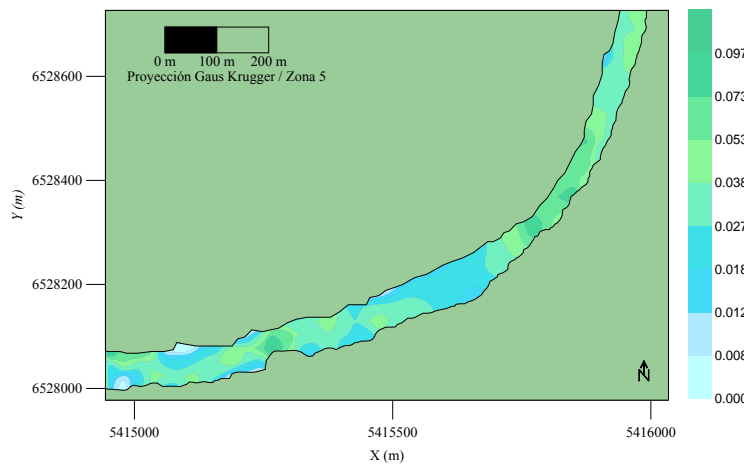


Figura 5: Tensiones de corte de fondo $[N m^{-2}]$ para el tercer escenario simulado ($Q_3 = 5 m^3 s^{-1}$), en el tramo comprendido entre el puente sobre RP6 y 1,5 km aguas abajo del mismo.

Para el tercer escenario los resultados de la simulación hidrodinámica indican que no se presentaron condiciones de iniciación de movimiento de los sedimentos del lecho. En lo que

respecta al transporte de sedimentos en suspensión los resultados de la simulación indican que, al igual que para el segundo escenario, pudieron ser transportados limos y arcillas. En cuanto al proceso de transporte predominante para este último escenario los resultados de la simulación indican que fue un escenario mixto. Esto se debe a que en determinadas zonas existieron condiciones propicias para la depositación, dado que las velocidades obtenidas a partir de la simulación fueron menores a la velocidad crítica de depositación; mientras que en otras pudieron presentarse condiciones de equilibrio sedimentológico.

3.2 Modelo de trayectoria de partículas

Mediante la implementación del modelo Lagrangeano de trayectoria de partículas se realizó una primera aproximación al estudio del impacto que genera la fuente en el transporte de sedimentos suspendidos, dado que aporta elevadas concentraciones de sedimentos al curso fluvial.

La calibración de este modelo, como se mencionó anteriormente, sólo se pudo realizar para el tercer escenario, dado que se contaba con mediciones de campo. Los resultados fueron satisfactorios ya que la diferencia entre la concentración de sedimentos suspendidos medida en laboratorio y la simulada fue menor al 10%. Para el primer y segundo escenario se adoptaron como válidos los parámetros de calibración del tercer escenario a fin de poder realizar comparaciones entre los resultados.

Para el primer escenario se observa que, según la distribución de concentraciones calculada con el modelo, la influencia en cuanto al aporte de material particulado por parte de la fuente es prácticamente nula, dado que no se extiende más allá de unas pocas decenas de metros (ver [Figura 6](#)). En cambio para el segundo (ver [Figura 7](#)) y tercer escenario (ver [Figura 8](#)) los resultados del modelo indican que la fuente tiene una gran influencia la cual está en el orden del kilómetro. Estos resultados son consistentes con el fenómeno estudiado, dado que la capacidad de dilución del curso fluvial varió entre los escenarios, siendo ésta muy elevada para el primer escenario y significativamente menor para los otros dos.

Además, se observa que para el segundo y tercer escenario las mayores concentraciones de sedimentos se presentan sobre la margen derecha. Para el tercer escenario los resultados del modelo de partículas (ver [Figura 8](#)) permiten observar también que entre T2 y T3 sobre la margen derecha (ver [Figura 1](#)) las concentraciones de sedimentos son localmente elevadas ($0,13 \text{ g L}^{-1} = 130 \text{ mg L}^{-1}$). Este incremento en las concentraciones de sedimentos suspendidos podría deberse a un fenómeno local de bajas velocidades producto del impacto hidrodinámico generado por la fuente ubicada en las cercanías; lo cual produciría una acumulación de los sedimentos suspendidos provenientes de aguas arriba.

En lo que respecta a la longitud de mezcla completa en sentido transversal se produce, aproximadamente, 1 km aguas abajo de la fuente para el segundo escenario y 500 m aguas abajo de la misma para el tercero. Para ambos casos la distancia la distancia de mezcla completa obtenida mediante simulación resultó un orden de magnitud menor que la calculada con la ecuación de [Fischer et al. \(1979\)](#). Esto es esperable dado que el curso fluvial posee márgenes irregulares, variaciones en la batimetría de fondo, estrangulaciones y curvas, lo que permite que la mezcla completa se alcance antes que en un canal recto con flujo uniforme.

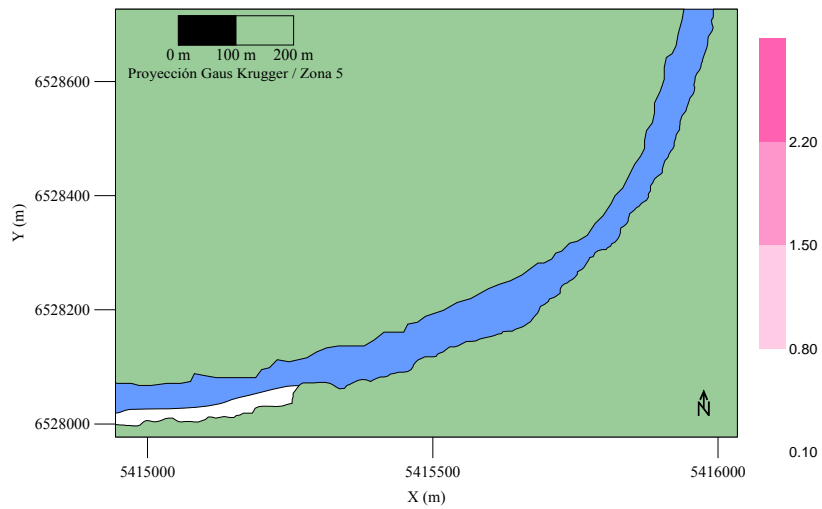


Figura 6: Isolíneas de concentración de sedimentos [mg L^{-1}] generada por la erogación de material particulado por una fuente puntual.

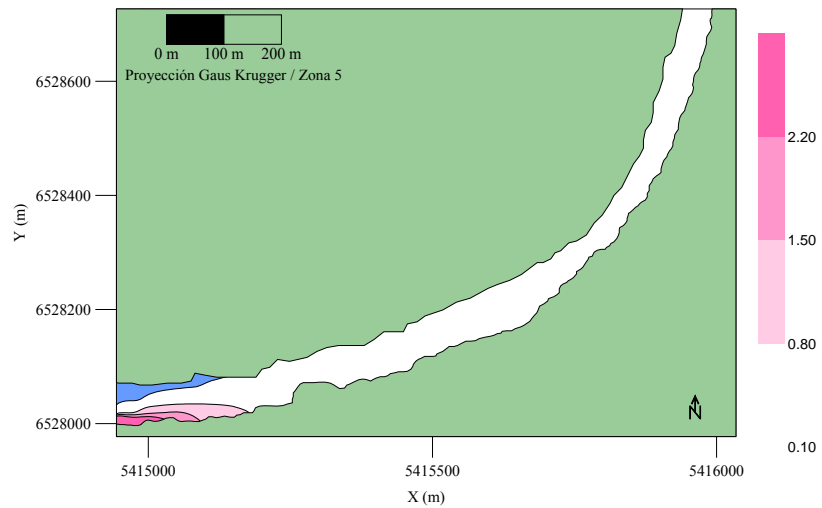


Figura 7: Isolíneas de concentración de sedimentos [mg L^{-1}] generada por la erogación de material particulado por una fuente puntual.

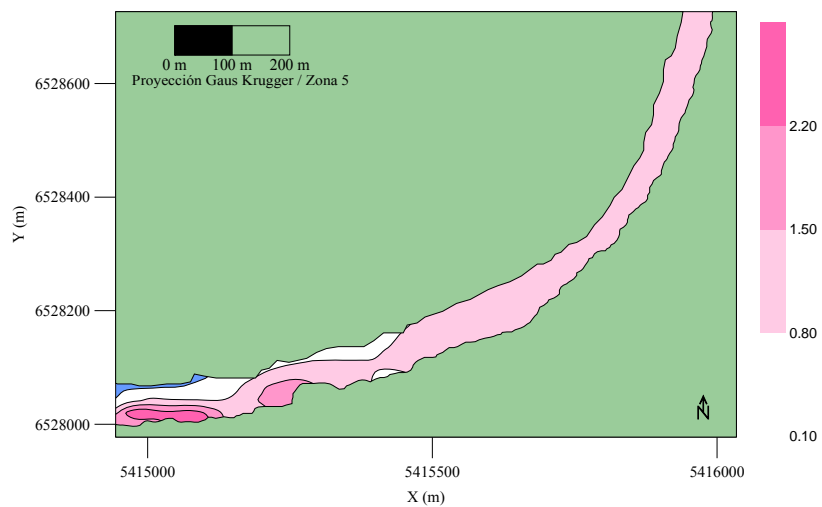


Figura 8: Isolíneas de concentración de sedimentos [mg L^{-1}] generada por la erogación de material particulado por una fuente puntual.

El análisis de sensibilidad de los coeficientes de dispersión se realizó variando los mismos en ± 1 orden de magnitud los parámetros de calibración de dichos coeficientes. Esto permitió observar que existieron diferencias significativas en los resultados cuando se modificó el coeficiente de dispersión longitudinal, mientras que las diferencias fueron poco relevantes al variar el coeficiente de dispersión transversal.

3.3 Vinculación de las simulaciones con la distribución granulométrica

En base al análisis de los campos de velocidades y tensiones de fondo obtenidos a partir del modelo hidrodinámico, se observa que la capacidad de transporte del río es mayor hacia el centro del cauce donde se generan las mayores tensiones. Luego, se espera que allí se encuentren los mayores diámetros de partículas, con d_{50} eventualmente superiores a $62 \mu\text{m}$ dado que el material más fino resultaría resuspendido o no encontraría condiciones propicias para depositarse. Por otro lado, hacia las márgenes donde las tensiones en el lecho son menores se espera que los d_{50} sean inferiores a los encontrados hacia el centro del cauce (levemente inferiores a $62 \mu\text{m}$).

Además, teniendo en cuenta la disminución de velocidades observada para el tercer escenario entre T2 y T3 sobre la margen derecha (ver [Figura 1](#)) y, además, que el proceso de transporte para este escenario fue mixto (depositación – equilibrio sedimentológico), se espera que en dicho sector existan las condiciones propicias para la depositación del material particulado. Por lo tanto, la distribución granulométrica de la muestra de sedimentos del lecho sobre la margen derecha, en cercanías de T2, debería presentar mayores porcentajes de material fino, es decir, d_{50} menor a los $62 \mu\text{m}$.

Los tamaños de sedimentos esperables en el centro del cauce, según lo mencionado en el párrafo anterior, concuerdan con lo obtenido mediante el análisis granulométrico de las muestras del lecho tomadas en campo para el escenario de aguas bajas. El d_{50} de los puntos de muestreo localizados en el centro del cauce varió en el intervalo entre $75 - 79 \mu\text{m}$. En el punto de muestreo correspondiente a la fuente el d_{50} medido fue particularmente elevado. Esto puede atribuirse a un efecto local de incremento de la turbulencia que genera la fuente en su campo cercano, lo cual impide que el material fino se deposite en esa zona, resultando en un d_{50} comparativamente elevado. Además, se observó que sobre la margen derecha en cercanías de T2 el d_{50} de la muestra de sedimentos fue de $30,7 \mu\text{m}$, lo que puede deberse a una acumulación de los sedimentos producto del impacto hidrodinámico generado por la fuente. No obstante, sobre la margen izquierda en T3 el d_{50} obtenido por difracción láser de la muestra de sedimentos del lecho no concuerda con lo esperado, dado que el mismo fue significativamente bajo ($19,8 \mu\text{m}$), lo cual podría deberse a una inadecuada toma de la muestra.

En lo que respecta al transporte de sedimentos en suspensión se observó que los resultados obtenidos mediante la simulación del campo de velocidades concuerdan con lo obtenido en las muestras de columna de agua. Esto se debe a que del análisis granulométrico por difracción láser se obtuvo que en suspensión se transportaban sedimentos finos (arcillas y limos), cuyo mayor porcentaje ($> 60 \%$) estuvo comprendido entre las categorías limos muy finos a limos medios, es decir, en el rango $2 - 31 \mu\text{m}$.

4 CONCLUSIONES

Mediante el modelo 2DH se logró representar adecuadamente el campo de velocidades y de tensiones de fondo para cada uno de los escenarios ambientales. Las calibraciones resultaron satisfactorias ya que las diferencias entre la cota del pelo de agua calculada y la cota medida fueron de $\pm 1 \text{ cm}$. En lo que respecta a los caudales las diferencias observadas

fueron menores al 10 % en todos los casos.

Para las 3 simulaciones realizadas se observó que las mayores velocidades y tensiones de fondo se presentaron en el centro del cauce y, fueron más pequeñas hacia las márgenes, presentándose este patrón en general para todo el dominio de modelación y, en particular en el tramo muestreado. Esto indica que la mayor capacidad de transporte se presenta hacia el centro del cauce. Además, para el escenario de aguas bajas, fue posible vincular las tensiones de corte de fondo con la granulometría del lecho y de ese modo explicar la heterogeneidad de los d_{50} medidos en el lecho.

Se demostró también que para estados hidrométricos de aguas bajas la fuente es capaz de influir en el transporte de sedimentos en una distancia de 700 m, y que el mayor impacto relativo a las concentraciones de sedimentos suspendidos se presenta principalmente sobre la margen derecha.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en el marco de los Proyectos CAI+D 2009 PI 38-194 subsidiado por la Universidad Nacional del Litoral (UNL) y PICT 35885 subsidiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina y la UNL.

REFERENCIAS

- Brunner, G., HEC-RAS, *River analysis system, Hydraulic reference manual, Version 4.0*. U.S. Army Corps of Engineers, (<http://www.hec.usace.army.mil>), 2008.
- Calmano, W., Hong, J., and Förstner, U., Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential, *Water, Science and Technology*, 28:223-235, 1993.
- Elder, J., The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 5:544-560, 1959.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C., Imberger, J., and Brooks, N.H., *Mixing in inland and coastal waters*, Academy Press, New York, USA, 1979.
- Guo, Q., Correlation of Total Suspended Solids (TSS) and Suspended Sediment Concentration (SSC) Test Methods, New Jersey Department of Environmental Protection, Division of Science, Research, and Technology, Contract No. SR05-005, 2006.
- Nicholas, A., Walling, D., Sweet, R., and Fang, X., New strategies for upscaling high-resolution flow and overbank sedimentation models to quantify floodplain sediment storage at the catchment scale, *Journal of Hydrology*, 329:577-594, 2006.
- Parker, G., *ID morphodynamics of rivers and turbidity currents*, (http://cee.uiuc.edu/people/parkerg/morphodynamics_e-books.htm), 2004.
- Peng, J., Song, Y., Yuan, P., Cui, X., and Qui G., The remediation of heavy metals contaminated sediments, *Journal of Hazardous Materials*, 161:633-640, 2009.
- Rosman, P., *Referência Técnica do SisBaHiA[®]*, (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>), 2011.
- SSRH, Subsecretaría de Recursos Hídricos, *Estadística Hidrológica de la República Argentina*, Presidencia de la Nación, Rep. Argentina, 2009.
- Trento, A., Alvarez, A., Filippa, L., Gallo, M., and Vinzón, S., Un modelo de partículas para la dinámica de cromo y sedimentos en el río Salado, MECOM 2010, IX Congreso Argentino de Mecánica Computacional, Buenos Aires, Vol. XXIX, 8009-8020, Eds. Dvorkin, Goldschmit, Storti, 2010.
- Westrich, B., and Förstner, U., *Sediment dynamics and pollutant mobility in rivers. An interdisciplinary approach*, Springer, Germany, 2007.