

SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA BIDIMENSIONAL EN EL RÍO SALADO¹

Pez Martín*, Villalba Sebastián

Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Departamento de hidráulica

Ciudad Universitaria - Santa Fe, Argentina

*mpez2310@gmail.com

Área temática: Ingenierías

Sub-área: Recursos Hídricos

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las condiciones hidrodinámicas que caracterizan los posibles escenarios de un cauce aluvial son determinantes en los procesos de transporte de los constituyentes que suelen incorporarse al curso de agua, por ejemplo a través de descargas industriales, pluviales y domiciliarias. El transporte, en tal caso, no es generalmente un fenómeno unidireccional; y analizarlo como tal se torna poco práctico desde el punto de vista ingenieril si se considera una escala espacial reducida y en las cercanías de la fuente en donde el constituyente se esparce en todas las direcciones. Lo expuesto justifica el interés en la aplicación de modelos hidrodinámicos bidimensionales integrados en la vertical (2DH) para el cálculo de las condiciones hidrodinámicas de un cauce aluvial.

El escenario ambiental de este trabajo es un tramo del curso inferior del río Salado (Santa Fe, Argentina). El río Salado nace en el norte argentino, recorre más de 1500 km hasta desembocar en el sistema del río Paraná y es receptor de distintas descargas industriales, pluviales y domiciliarias algunas con escaso o nulo tratamiento. Posee un cauce meandroso, con albardones bien definidos en ambas márgenes, una profundidad media de 0.80 m y un ancho aproximado de 70 m en aguas medias. Su caudal módulo es de $137 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (SSRH, 2009) y el máximo caudal se registró en 2003 en la sección transversal de RP70, con aproximadamente $4000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Ferreira, 2005). El tramo en estudio es de aproximadamente 8,3 km de longitud, delimitado aguas arriba por una sección hidráulica ubicada a 2,1 km del puente de la ruta provincial N° 6 (RP6) y aguas abajo por otra que se encuentra a 6,2 km del mismo puente. Dicho tramo define un dominio de cálculo, llamado de aquí en adelante "dominio menor" (Figura 1).

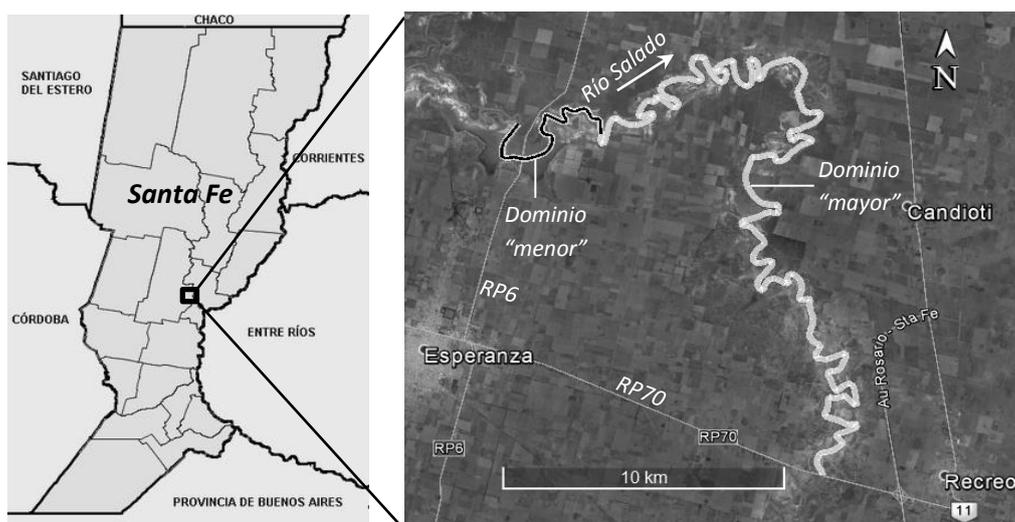


Figura 1: Tramo en estudio del río Salado, ubicación del dominio "mayor" y dominio "menor".

¹ Este trabajo se enmarca en el proyecto CAI+D 2011 "Transporte de sedimentos finos en ambientes fluviales. Análisis, mediciones, floculación y simulación numérica" Director: Trento, Alfredo Emilio, Co-director: Gallo, Marcos Nicolás. Dirección del autor (Cientibecario): Trento, Alfredo Emilio, Co-Dirección: Szupiany, Ricardo Nicolás.

El dominio menor, se encuentra comprendido en un dominio “mayor” (Figura 1), de 57 km de largo, delimitado aguas arriba por la misma sección hidráulica que el dominio menor y aguas abajo por la sección que define la intersección con la ruta provincial N° 70 (RP70).

El objetivo del trabajo consistió en representar la hidrodinámica 2DH en el dominio menor del tramo de río en cuestión implementando un sistema computacional bidimensional (2DH) para las condiciones registradas el 01/04/2014.

METODOLOGÍA

La simulación hidrodinámica se realizó específicamente para un escenario de crecida ordinaria presentado durante el 01/04/2014 en el que durante una salida de campo se midió con perfilador acústico de corriente Doppler (ADCP) un caudal de $180 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y se registró en la sección del puente de RP6 un nivel de agua de 18.56 m (± 0.10 m) IGN. Se obtuvo además información batimétrica del tramo de estudio mediante una ecosonda y registros de velocidades de la corriente en diferentes secciones con el ADCP; ambos equipos acoplados a un sistema de posicionamiento global (GPS) a tiempo real. Cabe destacar que el trabajo de campo coincidió con el pasaje del pico de la crecida, siendo el escenario no estacionario. Se presenta en este trabajo una simulación estacionaria como una primera aproximación.

Las condiciones hidrodinámicas se calcularon en dos etapas. En la primera se implementó el sistema HEC-RAS 4.1 (Brunner, 2010) en el cálculo unidireccional de la hidrodinámica del dominio mayor para condiciones no estacionarias del escurrimiento. Las condiciones de borde aguas arriba fueron definidas con series diarias de caudales para el período de tiempo entre el 15/03/2014 y el 08/04/2014. Por otro lado, en la sección del extremo de aguas abajo (RP70) se impuso una curva de descarga calculada. Se destaca que en esta sección se dispone de lecturas hidrométricas diarias. Se consideraron las batimetrías obtenidas para 42 secciones transversales, obtenidas en relevamientos realizados en diversos trabajos de campo. El coeficiente de rugosidad n de Manning se fijó en 0,025. El modelo fue calibrado con el registro de la cota del pelo de agua en RP6 y mediciones de velocidades medias en distintas secciones transversales.

En la segunda etapa se procedió con la representación bidimensional del escurrimiento en el dominio menor. Para tal fin se utilizó el módulo 2DH de SisBaHiA[®], acrónimo de Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental (Rosman, 2015), que considera la ecuación de conservación de masa integrada a lo largo de la vertical (1), y las dos ecuaciones de *momentum* (2 y 3) en las direcciones horizontales x e y ; todas integradas en la vertical.

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

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

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

donde x e y son las direcciones principales longitudinal y transversal, respectivamente; U y V son las componentes de las velocidades promediadas en la vertical en las direcciones x e y ; $z(x,y,t)$ es la elevación por encima de un nivel de referencia; $H(x,y)$

es la batimetría de cauce, medida en relación a la cota de un plano horizontal de referencia; g es la aceleración de la gravedad; ρ_0 es la densidad del agua; τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} son las tensiones turbulentas promediadas en la vertical; τ_x^B , τ_y^B son las tensiones de corte en el lecho; 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. Las tensiones de corte del lecho τ_x^B , τ_y^B , dependen de la altura de rugosidad ε .

El dominio menor fue discretizado mediante la construcción de una malla compuesta por 1620 elementos cuadrangulares isoparamétricos, de 9 nodos por elementos, con un total de 6861 nodos. Los contornos del dominio se delimitaron en base a una fotografía 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 registrada el 1 de abril del año 2014. El ancho del cauce, de 76 m en promedio, fue cubierto con 9 elementos en toda su longitud de modo de contar con 19 nodos de cálculo en la dirección transversal a la corriente. El plano horizontal de referencia para las batimetrías se ubicó en cota cero IGN.

Las condiciones iniciales y de borde en la sección de aguas abajo se establecieron en función de los resultados obtenidos con el sistema computacional unidimensional aplicado en el dominio mayor. En la sección de aguas abajo fue fijado un nivel de agua de 17,68 m cota IGN para el caudal de referencia. La simulación se efectuó para un tiempo total de 24 horas, con un intervalo temporal $\Delta t = 1$ segundo. Se adoptó $\varepsilon = 0.01$ (Abbot and Basco, 1989). No se consideró la incidencia del viento. La calibración del modelo se realizó a partir del registro de la cota del pelo de agua a la altura de RP6 y de mediciones de velocidad y aforos efectuados durante el 1° de abril de 2014.

RESULTADOS

Los resultados de la simulación hidrodinámica mostraron que tanto las velocidades como los niveles de agua se estabilizaron antes de las 2 horas de simulación. En este sentido, se puede observar que en los tramos rectos y de sección transversal aproximadamente regular la distribución de velocidades en la dirección transversal es homogénea; por otro lado, en el caso de las curvas pronunciadas, es claramente visible la tendencia del flujo a acelerarse en el lado interno de la curva al inicio de la misma, para luego recostarse las velocidades máximas hacia el lado externo de la curva al final de la misma siguiendo la trayectoria de las profundidades máximas. Además pueden identificarse en el tramo de estudio zonas de estrechamientos del cauce caracterizados por la presencia de grandes profundidades (de hasta 8.3 m) y en donde también se puede identificar un aumento de la magnitud de las velocidades calculadas. En la Figura 2 se muestra un mapa de profundidades y el campo de velocidades obtenido en las cercanías de la sección de RP6.

Se contrastaron además valores de velocidades medias en la sección calculadas con las medidas en dos secciones transversales V1 y V2 (Figura 2) obteniéndose diferencias de aproximadamente un 7%. Cabe destacar que para dichas secciones se calcularon velocidades máximas que rondaron en los $0,9 \text{ ms}^{-1}$ y para otros lugares del dominio se obtuvieron velocidades de hasta $1,70 \text{ ms}^{-1}$; magnitudes bien representativas del campo de velocidades, que fue discretizado por elementos de 40 m de largo y 9 m de ancho. En lo que respecta al caudal, se compararon los caudales calculados para 3 secciones transversales Q1, Q2 y Q3 (Figura 2) con el caudal de referencia ($180 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) observándose diferencias aproximadas del 8%.

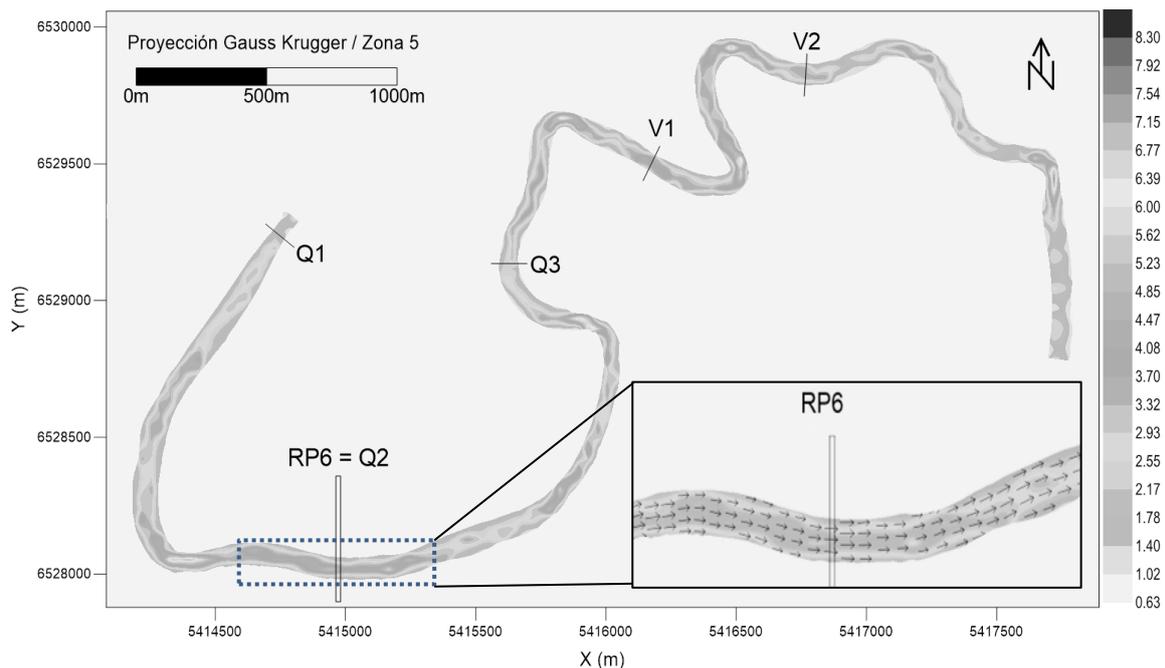


Figura 2: Mapa de profundidades y campo de velocidades obtenido con SisBaHiA cerca de la sección de RP6. Escala con profundidades en (m).

CONCLUSIONES

Mediante la implementación del modelo bidimensional se logró representar de manera satisfactoria la hidrodinámica del escenario planteado; en este sentido, tanto las velocidades como las profundidades calculadas reflejan una configuración del flujo totalmente compatible con las mediciones efectuadas durante las actividades de campo.

Finalmente, cabe destacar que si bien los resultados de las comparaciones entre las variables medidas y calculadas (velocidades medias en la sección y caudales) resultaron adecuados, se proseguirá con el estudio para la calibración del modelo 2DH, en particular con respecto a la altura de rugosidad ε y con la verificación de la condición de borde aguas abajo resultante de la aplicación del modelo 1D.

Agradecimiento: al Dr. Francisco Latosinski y al Ing. Lucas Domínguez Ruben quienes dirigieron las mediciones con ADCP y DGPS durante la campaña del 01/04/2014.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Abbot M.B. and Basco D.R., 1989. Computational Fluid Dynamics, an Introduction for Engineers, Longan Group, UK Limited.

Brunner G., 2010. HEC RAS, River Analysis System User's Manual, Versión 4.1, U.S. Army Corps of Engineers. (<http://www.hec.usace.army.mil>).

Ferreira, C., 2005. La crecida extraordinaria del río Salado en abril-mayo de 2003 (provincia de Santa Fe - Argentina) – aspectos hidrológicos". XX Congreso Nacional del Agua. Mendoza. Argentina.

Rosman P., 2015. "Referência Técnica do SisBaHiA[®]", (<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br>).

SSRH, Subsecretaria de Recursos Hídricos, 2009. Estadística Hidrológica de la República Argentina. Presidencia de la Nación, Rep. Argentina.