

DETERMINACIÓN DE LOS PRINCIPALES PATRONES DE FLUJO EN EL RÍO URUGUAY Y SU VARIACIÓN ESPACIO TEMPORAL

Rodrigo Junes, Mónica Fossati y Sebastián Solari

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental - Facultad de Ingeniería - Universidad de la República, Uruguay.
E-mail: rjunes@fing.edu.uy, mfossati@fing.edu.uy, ssolari@fing.edu.uy

Introducción

Como se describe en Paoli et al (2000), dentro de la Cuenca del Plata, el Río Uruguay conforma el segundo sistema fluvial en términos de importancia, teniendo una longitud aproximada de unos 1.600 km. Las nacientes del río se encuentran en territorio brasileño, más específicamente en Serra Geral, a unos 1.800 m de altura, tramo en el cual se denomina río Pelotas. Hasta las nacientes del Peperi-Guaçú, el río se desenvuelve en alturas superiores a los 850 m, para luego pasar a discurrir por el límite entre Argentina y Brasil. Posteriormente, el río se estrecha en el salto Grande de Misiones, pasando de los 450 m de ancho a los 20 m. Entre sus afluentes más importantes se cuentan el Ijuí, el Ibicuí y el Quaraí (el cual discurre por el límite entre Brasil y Uruguay). Ya en territorio uruguayo, el principal afluente del Río Uruguay es el río Negro, el cual se extiende por aproximadamente 500 km. Finalmente, el Río Uruguay vuelca sus aguas en el Río de la Plata.

A consecuencia de su extensión, y en función de la variabilidad que presenta tanto en términos de su geología como de su geomorfología, la cuenca del Río Uruguay se puede dividir en tres tramos, a saber: el tramo superior, el medio y el inferior (Iriondo y Kröhling, 2008). El tramo superior se encuentra en la región Sur de Brasil, mientras que el tramo medio es el que discurre entre la frontera entre Argentina y Brasil, siendo el tramo inferior el situado en el límite entre Uruguay y Argentina. Desde el punto de vista hidrodinámico la represa de Salto Grande claramente fracciona al Río Uruguay ya que la misma embalsa el cauce fluvial y regula la cantidad de caudal líquido hacia aguas abajo. Debido a esto para una modelación numérica hidrodinámica lo más sencillo es pensar en una modelación separada por tramos, independiente de que pueda haber alguna conexión e intercambio entre ellos.

El tramo inferior del Río Uruguay reviste importancia para Argentina y Uruguay desde el punto de vista económico, social y ambiental. La gestión de dicho cuerpo de agua debe basarse en información certera del sistema, y por tanto conocer cómo son las características principales del flujo es relevante para muchas aplicaciones. Un estudio hidrodinámico constituye la base para estudios de transporte de sedimentos y morfológicos, así como también para estudio de transporte de sustancias.

En este marco, se desarrolló un modelo numérico que resuelve la dinámica del flujo con alta resolución en todo el tramo inferior del Río Uruguay entre Salto Grande y el inicio del Río de la Plata. La dinámica en dicha zona está regulada por los aportes de caudal fluvial de los distintos afluentes, por el efecto de la marea que proviene del Río de la Plata y por la tensión del viento sobre el espejo de agua, que interactúan con la batimetría formada por los cauces principales, secundarios y zonas bajas.

En particular en este trabajo se utilizó el módulo hidrodinámico del modelo de código abierto TELEMAC-MASCARET Modeling System (TMS), en su versión bidimensional (TELEMAC 2D), el cual es un conjunto de módulos libres y abiertos, orientado a la resolución de problemas en el campo de los flujos a superficie libre (<http://www.opentelemac.org/>), el cual, debido a su amplia utilización en distintos estudios en el mundo (Zhang, 2016; Mahgoub, 2015; Vu, 2015; Langendoen, 2016; Jia, 2015; Nguyen, 2016), se ha transformado en un estándar en su campo de aplicación. Este sistema de modelos

utiliza la técnica de elementos finitos con mallas no regulares de elementos triangulares lo cual es una ventaja a la hora de representar geometrías complejas, las márgenes, cauces e islas del Río Uruguay. A su vez, tiene implementado un sistema de secado y mojado de celdas idóneo para resolver distintas condiciones de flujo asociadas a crecidas y épocas de estiaje (Hervouet, 2007).

Objetivos generales y específicos

El objetivo general del proyecto es determinar las principales características hidrodinámicas del tramo inferior del Río Uruguay y su variabilidad temporal según los forzantes, en base al desarrollo y puesta en funcionamiento de un modelo numérico.

Los objetivos específicos del proyecto son:

- 1) Recopilación, depuración y análisis de antecedentes e información de base sobre la dinámica del tramo inferior del Río Uruguay.
- 2) Implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional para el tramo inferior del Río Uruguay.
- 3) Calibración y validación del modelo hidrodinámico.
- 4) Determinación de los principales patrones de flujo, su variación espacial y temporal en función de los forzantes.
- 5) Generación de recomendaciones para la mejora del modelo hidrodinámico en base a campañas de medición.

Implementación

Para la implementación del modelo hidrodinámico fue necesario en primera instancia generar un modelo digital del terreno (MDT) en base a los datos disponibles tanto públicamente como los facilitados por la CARU y FING-UdelaR; datos de relevamientos satelitales LIDAR públicamente disponibles, Cartas Náuticas del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada Nacional del Uruguay, relevamientos batimétricos realizados por CARU y datos procesados en instancias de la tesis de maestría "Modelación Numérica del Transporte de Efluentes en un Curso Fluvial: Caso Río Uruguay" (Casterá, 2015).

Luego de esto se generó una malla por tramos, tomando en cuenta los canales principales del río e incluyendo la planicie de inundación en ambas márgenes. La malla cuenta con elementos triangulares de 50 m de ancho y 150 de largo aproximadamente a lo largo del cauce, y elementos triangulares de 150 m hasta 250 m de lado en la planicie de inundación. Sobre esta malla se mapeó la información del MDT generado definiendo así la geometría del dominio de cálculo del modelo.

Calibración

El modelo se dividió en tres tramos para su calibración, desde el Norte hacia el Sur: Tramo 1 desde Salto Grande hasta Concepción del Uruguay; Tramo 2 desde Concepción del Uruguay hasta Fray Bentos; Tramo 3 desde Fray Bentos hasta Nueva Palmira. Como parámetro de calibración para los tramos 1 y 2 se utilizó el coeficiente de rugosidad de Manning con el

siguiente esquema: para el tramo 1 se calibró en primera instancia el coeficiente de rugosidad para el cauce con una serie temporal de caudales bajos erogados por el embalse de Salto Grande entre enero y septiembre de 2008 inclusive (inferiores a $8.500 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondientes a funcionamiento de la central hidroeléctrica sin pasaje de caudal por el vertedero de alivio), ya que en esta situación el nivel del río es tal que sus aguas no exceden las márgenes. Fijado el coeficiente para el cauce, se calibró con series de caudales altos (año 2002) el coeficiente de rozamiento para la planicie de inundación e islas del tramo. Fijados los coeficientes para el tramo 1 se procedió de forma análoga con el tramo 2. Para el tramo 3 se agregó como coeficiente de calibración el de arrastre del viento. Los parámetros de calibración obtenidos fueron validados contra series de niveles medidos en estaciones a lo largo del río Uruguay (Salto, Concordia, Yerúa, Nueva Escocia, La Calera, Fábrica Colón, Colón, Paysandú, Concepción del Uruguay, Puerto Campichuelo, Boca del Gualaguaychú, Fray Bentos y Nueva Palmira).

Resultados y conclusiones

Se presentan a continuación a modo de ejemplo resultados obtenidos para escenarios de crecidas extraordinarias con caudales de $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ para parte del tramo 1, lo cual se puede ver en la Figura 1. En estos se observan velocidades de hasta $4,0 \text{ m/s}$ sobre el centro del cauce, en la contracción mostrada en la Figura 2, disminuyendo el valor hacia las márgenes, hasta volverse prácticamente cero en las zonas inundadas fuera del cauce principal. Se puede observar también que en este escenario la línea de crecida llega hasta elevaciones de $12,5 \text{ m}$ referidos al Plano de Referencia Hidrométrico Provisorio (Ex-Wharton), valor que se encuentra 7 m por encima del nivel medio de $5,5 \text{ m}$ del registro de Yerúa.

En general se observa que el modelo numérico reproduce de forma satisfactoria los niveles medidos en las distintas estaciones, con valores de error medio cuadrático (RMSE) y sesgo (BIAS) del orden de $0,30 \text{ m}$ y $-0,15 \text{ m}$ respectivamente, contando con un valor medio de coeficiente de correlación de $0,96$. Resta sin embargo: (1) introducir el forzante de viento en el tramo final del Río, entre Fray Bentos/Gualaguaychú y la desembocadura y (2) contrastar las velocidades obtenidas en el modelo numérico con las medidas en distintas campañas realizadas a lo largo del Río.

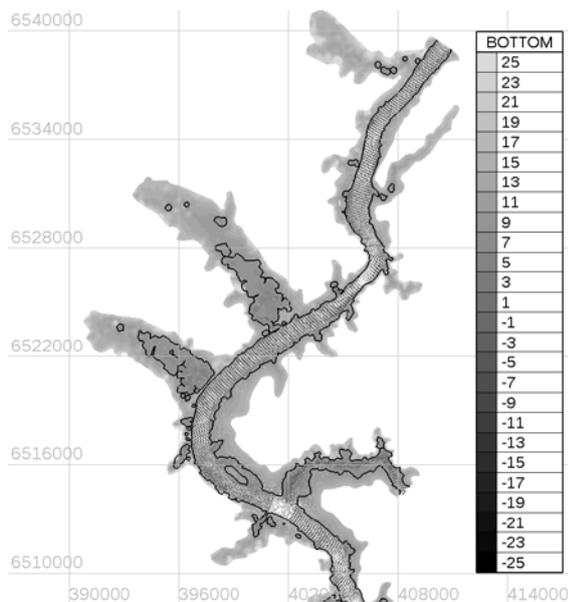


Figura 1.- Fondo: modelo de terreno utilizado; línea negra continua: isolínea de profundidad de 10 cm , ilustrando el alcance de la crecida; vectores blancos: campo de velocidades.

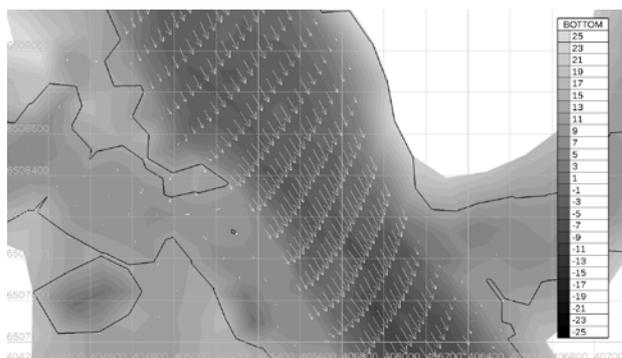


Figura 2.- Acercamiento a contracción en Yerúa. Fondo: modelo de terreno utilizado; línea negra continua: isolínea de profundidad de 10 cm , ilustrando el alcance de la crecida; vectores blancos: campo de velocidades.

De lo anterior se concluye que el modelo representa adecuadamente la hidrodinámica del río Uruguay en las distintas situaciones consideradas, identificando posibilidades de mejora del mismo con la introducción de nuevas forzantes y validación de los campos de velocidades obtenidos comparándolos con relevamientos de campo puntuales.

Referencias

- Casterá, M.** (2015). *Modelación Numérica del Transporte de Efluentes en un Curso Fluvial: Caso Río Uruguay*. Tesis de Maestría de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.
- Hervouet, J.M.** (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Iriondo, J. et al** (2008). *Cambios ambientales en la Cuenca del Río Uruguay: desde dos millones de años hasta el presente*. Universidad Nacional Del Litoral, Santa Fé, Argentina.
- Jia, L.** (2015). *Wave-current interaction in a river and wave dominant estuary: A seasonal contrast*. Elsevier Ltd.
- Langendoen, E.J.** (2016). *Improved numerical modeling of morphodynamics of rivers with steep banks*. Elsevier Ltd.
- Mahgoub, M.** (2015). *Understanding the Behaviour of Gravity Currents in Tideless Estuaries and Considering the Impact of Sea Level Rise within the Nile Estuary*. Journal of Coastal Research, Vol. 31 Issue 3, p714-722, 9p.
- Nguyen, V.T.** (2016). *Numerical Investigation of Sediment Transport and Bedmorphology on a Stretch of Nakdong River*. Elsevier Ltd.
- Paoli, C. et al** (2000). *El río Paraná en su tramo medio: contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura*, chapter 1, p27-68. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.
- Vu, T.** (2015). *Two-dimensional hydrodynamic modelling of flood inundation for a part of the Mekong River with TELEMAC-2D*. British Journal of Environment and Climate Change 5 (2) New Delhi: SCIENCEDOMAIN International, 2015, 162-175, India.
- Zhang, Q.** (2016). *Numerical Study on the Transport Timescale in a River-influenced Macro-tidal Estuary*. Journal of Coastal Research. Spring 2016 Supplement, Vol. 75 Issue sp1, p193-197. 5p.