

# IMPLEMENTACION DEL MODELO HIDRODINAMICO BIDIMENSIONAL TELEMAC-2D EN UN TRAMO DEL RIO PARANA INFERIOR

Florencia Peruzzo<sup>1,2,4</sup>, Gerardo Riccardi<sup>1,2,3</sup> y Pedro A. Basile<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Hidráulica, Escuela de Ingeniería Civil, FCEIA, UNR.

<sup>2</sup> Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA, UNR.

<sup>3</sup> Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario.

<sup>4</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas - Riobamba 245 bis. 2000 Rosario, Argentina.  
E-mail: fperuzzo@fceia.unr.edu.ar

## Introducción

Los grandes ríos aluviales de llanura representan un recurso natural de inestimable valor ambiental para un territorio, por ello la sustentabilidad de tales ambientes fluviales resulta de vital importancia. El río Paraná, río aluvial que recorre la zona litoral de nuestro país, forma parte de la Cuenca del Plata, junto con los ríos Paraguay y Uruguay, sus afluentes y varios humedales como los Esteros del Iberá y el Bañado la Estrella. Las aguas superficiales de dicha cuenca son recolectadas principalmente por el denominado Corredor Fluvial Paraná - Paraguay, que se destaca por la presencia de grandes extensiones de humedales. La magnitud de los volúmenes de escurrimiento y la longitud de su recorrido hacen que el mismo se encuentre entre los ríos de llanura más importantes del mundo. El río Paraná tiene usos múltiples entre los que se destacan el aprovechamiento hidroeléctrico, el abastecimiento de agua, el uso como vía de comunicación para navegación comercial y recreacional, entre otros. En este contexto la modelación hidrodinámica se ha convertido en una herramienta esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos como también para cuantificar el impacto de las actividades humanas para la protección de los mismos y del medio ambiente. El tramo del río Paraná que se estudia en este trabajo abarca desde el km 452 hasta el km 410 de la ruta de navegación troncal Santa Fe – Océano. Existen antecedentes de simulaciones con modelos matemáticos aplicados satisfactoriamente en el tramo, tales como, modelos bidimensionales completos (FICH, 2006; Guerrero y Lambert, 2013; Basile et al., 2015) y modelos cuasi-bidimensionales de baja complejidad (Peruzzo et al., 2016). Asimismo García et al. (2013) ha llevado adelante una modelación cuasi 2D en cauce principal y planicie de inundación en un tramo de 208 km entre la ciudades de Diamante y Ramallo, incluyendo el tramo en estudio.

## Objetivos

El objetivo de este trabajo es evaluar, mediante la simulación numérica bidimensional, las modificaciones en la hidrodinámica a partir de la evolución morfológica en un tramo del río Paraná Inferior entre el km 410 y el km 452, en los periodos de 2004-2006 y 2010-2012. Para esto se procedió a comparar partición de caudales en las cuatro bifurcaciones del tramo y distribución transversal de caudales específicos y áreas mojadas en distintas secciones transversales.

## Materiales y métodos

El modelo de simulación implementado es el TELEMAC-2D (Hervouet, 2000) acoplado a la plataforma de pre y postprocesamiento de datos y resultados bajo entorno de ventanas Blue Kenue©. TELEMAC-2D es un modelo bidimensional de uso gratuito basado en el método de resolución numérica por elementos finitos para resolver las ecuaciones bidimensionales completas para aguas poco profundas.

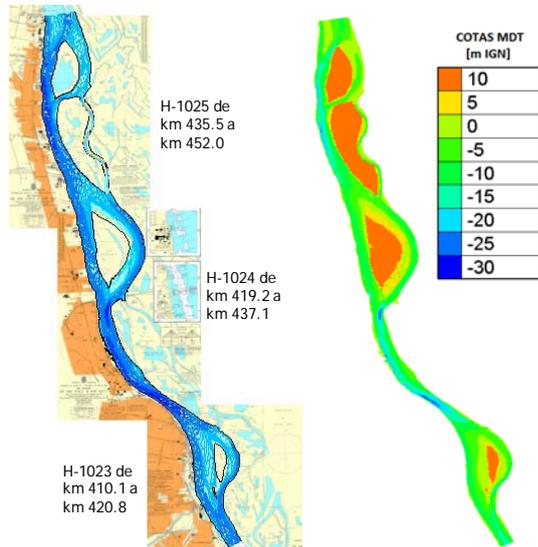
La aplicación del modelo se inició con la definición topobatómica del cauce principal, constituyendo el modelo digital del terreno del fondo del río, las márgenes e islas de dos escenarios morfológicos correspondientes a los períodos de años 2004-2006 y 2010-2012 a partir de datos existentes recopilados de relevamientos realizados por

FICH (2004 y 2006) y por la DNVN-DPI (2014) respectivamente. Las curvas de nivel del fondo fueron georeferenciadas y se ajustó la base espacial del área de modelación mediante un mosaico construido a partir de 3 cartas náuticas provistas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN, 2014) (Figura 1a). Luego, se crearon dos representaciones espaciales del fondo del cauce principal utilizando mallas computacionales. Mediante el software Blue Kenue©, se construyeron dos grillas triangulares irregulares con una distancia máxima entre nodos igual a 50 m, permitiendo capturar toda la información disponible de los relevamientos existentes. La constitución M04-06, obtenida a partir de los relevamientos de la FICH, quedó conformada por 40712 nodos y 79501 elementos. Mientras que la constitución M10-12, elaborada sobre la base de la información relevada por DNVN-DPI, quedó conformada por 67093 nodos y 132124 elementos. En la Figura 1b se presenta una imagen de la constitución M04-06 donde se observan los niveles del lecho expresados en m referidos al cero IGN. Vale aclarar que la constitución M10-12 se extendió hasta el km 405 para incluir la vinculación con el riacho La Brava.

Para cada constitución se realizaron simulaciones en flujo permanente usando un rango de caudales entre 11640 m<sup>3</sup>/s hasta 28600 m<sup>3</sup>/s (aguas bajas a altas). Los caudales empleados en las simulaciones corresponden a caudales aforados por FICH (2004 y 2006) y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en la estación Paraná-Timbúes. Además, se realizaron simulaciones en flujo impermanente reproduciendo las series de caudales observada en la estación Paraná-Timbúes en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 para la constitución M04-06 y en el período 16/03/15 al 15/03/16 para las constituciones M10-12, abarcando esta última la crecida del río Paraná de los meses de enero y febrero de 2016. El parámetro de calibración considerado fue el coeficiente de rugosidad de Manning  $\eta$  y las variables de ajuste fueron los niveles de agua observados en los hidrómetros de Puerto San Martín (PSM, km 448) y Rosario (ROS, km 416). Los resultados de la constitución M04-06 también se contrastaron con mediciones de caudales en las cuatro bifurcaciones que presenta el tramo en estudio y mediciones de velocidades con ADCP en secciones transversales del dominio realizadas por la FICH en el período noviembre-diciembre 2004 y febrero-marzo 2006, obteniendo una buena aproximación entre valores observados versus calculados (Peruzzo et al., 2017). Para las simulaciones en flujo permanente, los caudales aforados fueron ingresados como condición de borde aguas arriba y la condición de borde aguas abajo fue la relación altura-caudal. Para las simulaciones en flujo impermanente, la condición de borde aguas arriba fue la serie de caudales diarios registrados en la estación Paraná-Timbúes en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 para la constitución M04-06, y para M10-12 la serie registrada en el período 16/03/2015 al 15/03/2016. En lo que respecta a la condición de borde aguas abajo para ambas constituciones se empleó una relación altura-caudal.

Para el análisis de la evolución de la hidrodinámica se estudió en primer lugar la partición de caudales en las cuatro bifurcaciones que forman parte del tramo: 1. Isla El Banco-km 449; 2. Isla Rosita-km 440; 3. Isla Carlota-km 436 y 4. Isla Ing. Sabino Corsi-km 416.5. Para cada uno de los 7 escenarios de flujo permanente simulados en la constitución M10-12 se estimaron los caudales derivados por el brazo derecho e izquierdo en estas secciones y se compararon con caudales aforados por FICH (2004 y 2006). Las mediciones de caudales

realizadas en 2004 representan un estado de aguas medias-altas con caudal medio total de  $20000 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que para 2006 representan un estado de aguas medias-bajas con caudal medio total de  $14000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Conjuntamente se analizó la variación del área mojada en las secciones analizadas comparando las áreas obtenidas a partir de ambas constituciones. En segundo lugar, se calcularon distribuciones de caudales específicos en distintas secciones transversales del dominio para ambas constituciones, se compararon entre sí y con distribuciones observadas en mediciones de campo con ADCP realizadas por la FICH (2006).



**Figura 1.-** (a) Curvas de nivel digitalizadas según relevamientos de FICH (2004) junto con las cartas náuticas del SHN; (b) Constitución del modelo M04-06 y MDT.

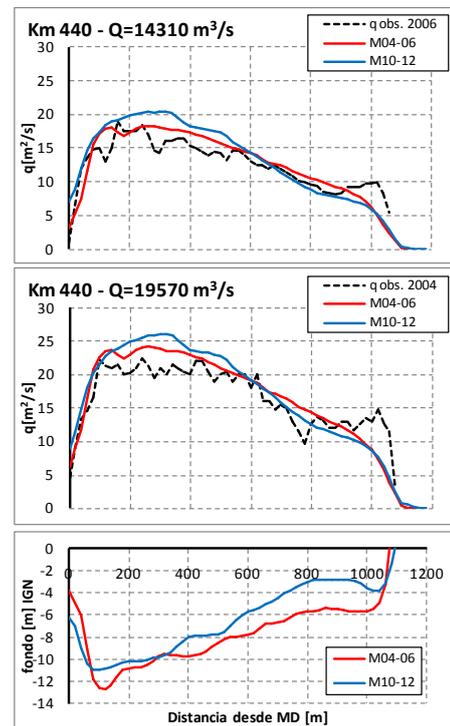
## Evaluación de Resultados

El rango de valores del coeficiente de rugosidad de Manning que proporcionó el mejor ajuste en términos de niveles estuvo comprendido entre 0.023 a 0.025. El error relativo porcentual medio entre niveles observados y simulados es de 0.59% para M04-06 y 0.41% para M10-12. En régimen impermanente se reproduce adecuadamente las series de niveles observados en PSM y ROS. Para ambas constituciones se clasifica entre buena y muy buena la aproximación para un intervalo de tiempo de cálculo de 10 s. En cuanto a la partición de caudales en las cuatro bifurcaciones que se presentan en el tramo se observa un incremento de los porcentajes del caudal total derivado por el brazo derecho, y una correspondiente disminución por el brazo izquierdo. El caudal derivado por el brazo derecho se incrementa en un rango de un 3.5% a 13.1% en aguas bajas a un rango entre 3.1% a 14.5% en aguas altas. Las variaciones de caudal derivado por ambos brazos se corresponden con las variaciones de área mojada para el mismo periodo de años. A modo ilustrativo, se presenta en la Figura 2 la comparación entre caudales específicos aforados y calculados, para caudales totales  $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$  en la sección del km 440.

## Conclusiones

El modelo bidimensional TELEMAC-2D fue implementado para simular la hidrodinámica en régimen permanente e impermanente de un tramo del río Paraná Inferior para dos situaciones morfológicas correspondientes a los periodos de años 2004-2006 y 2010-2012. A partir del grado de aproximación obtenido entre niveles observados versus calculados se concluye que los resultados han sido aceptables. Se evaluaron tres parámetros para estudiar la evolución de la hidrodinámica en el período de tiempo analizado: partición de

caudales en las bifurcaciones del tramo, área mojada y distribución de caudales específicos en varias secciones transversales. Se observa una clara variación en los dos primeros parámetros, mientras que el tercero permanece prácticamente estable.



**Figura 2.-** Comparación de la distribución de caudales específicos calculados y observados en el km 440: (a)  $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b)  $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$ ; (c) batimetría sección transversal.

## Referencias

- Basile, P.A., Riccardi, G., Peruzzo, F. y Trivisonno F. (2015). "Modelación Hidrodinámica de un tramo del Río Paraná Inferior", VII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Montevideo, Uruguay.
- DNVN-DPI (2014). Cartografía del río Paraná. Datos topobatemétricos tramo km 232 - 480. Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior, Rosario.
- FICH (2004). Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de la Invernada, Río Paraná. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL.
- FICH (2006). Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de la Invernada. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, UNL.
- García, M., Basile, P.A., Riccardi, G. y Rodríguez, J.F. (2013). "Modelling Hydrodynamic and Sedimentation Processes in Large Lowland Rivers: An Application to the Paraná River (Argentina)", 35th IAHR World Congress, Chengdu, China.
- Guerrero, M. y Lamberti, A. (2013). "Bed-roughness investigation for a 2-D model calibration: the San Martín case study at Lower Paraná", International Journal of Sediment Research, 28 (4), pp. 458-469.
- Hervouet, J.M. (2000). TELEMAC modelling system: an overview. Hydrological Processes, 14(13), 2209-2210.
- Peruzzo, F., Riccardi, G. y Basile, P.A. (2016). "Modelación cuasi-bidimensional de escurrimiento superficial en cauce principal del tramo Paraná inferior km 410-452", IFRH2016, Ezeiza, Argentina.
- Peruzzo, F., Riccardi, G., Basile, P.A. y García, M. (2017). "Evaluación de un modelo hidrodinámico bidimensional en un tramo del cauce principal del río Paraná", VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Córdoba, Argentina.
- SHN (2014). Base de Datos Digital de Cartas Náuticas de Río Paraná Inferior, <http://www.hidro.gov.ar/cartas/cartasnauticas.asp>. Servicio de Hidrografía Naval.