

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA 2DH A ESCALA DE TRAMO DEL RÍO PARANÁ INFERIOR

Basile, P.A.^{1,2}; Riccardi, G.^{1,2,3}; Peruzzo, F.^{1,4}; Garcia; M.^{1,2}

¹ Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA - UNR)

² Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA - UNR)

³ Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR)

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

E-Mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar

Introducción

El manejo integrado y sustentable de sistemas fluviales requiere cada vez más el uso de herramientas de modelación como soporte para la planificación y toma de decisiones. En este sentido, la modelación hidrodinámica de grandes ríos aluviales constituye la base para el estudio de importantes problemas hidroambientales. Por un lado, tales modelos pueden ser utilizados para representar otros procesos asociados (transporte de sedimentos, erosión-sedimentación, etc.). Por otro lado, la modelación permite evaluar alternativas de diseño de obras fluviales y analizar el impacto ambiental que las mismas generan en el medio físico.

En el presente trabajo se describe la implementación de un modelo matemático 2DH completo, para simular la hidrodinámica del río Paraná Inferior, en el tramo comprendido entre el km 452 (extremo aguas arriba) y el km 410 (extremo aguas abajo) de la ruta de navegación troncal Santa Fe-Océano. En dicho tramo se desarrolla la mayor parte del complejo portuario del Área Gran Rosario, el cual se ha convertido en el frente portuario fluvial más importante de América del Sur, en lo relativo al movimiento de granos, subproductos y aceites vegetales. Por lo tanto, el conocimiento de la hidrodinámica (y del transporte de sedimentos) es un requerimiento fundamental para evaluar, en general, todo tipo de intervención antrópica en dicho tramo. En esta primera etapa, que aquí se presenta, se plantea la calibración de los procesos hidráulicos. Sucesivamente, se prevé simular el transporte de sedimentos y los procesos de erosión-sedimentación del lecho, para estudiar la evolución de los pasos críticos para la navegación.

Descripción del área de estudio

En la Figura 1 se presenta la ubicación del tramo km 410-452 del río Paraná. El caudal módulo (período 1970-2014) en Puerto San Martín (PSM, km 448), es igual a $17500 \text{ m}^3/\text{s}$. El caudal máximo alcanzó los $60000 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1983, con casi $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ fluyendo en el cauce principal y el resto sobre la planicie de inundación (García et al., 2015). El caudal mínimo registrado en PSM es aproximadamente igual a $7000 \text{ m}^3/\text{s}$. Por lo tanto, la relación entre el caudal máximo y el mínimo es igual a 8,5, es decir, un valor bajo, similar a otros grandes ríos del planeta. Por otra parte, la pendiente de la superficie libre entre PSM y ROS varía entre $1,4 \times 10^{-5}$ y $4,3 \times 10^{-5}$.

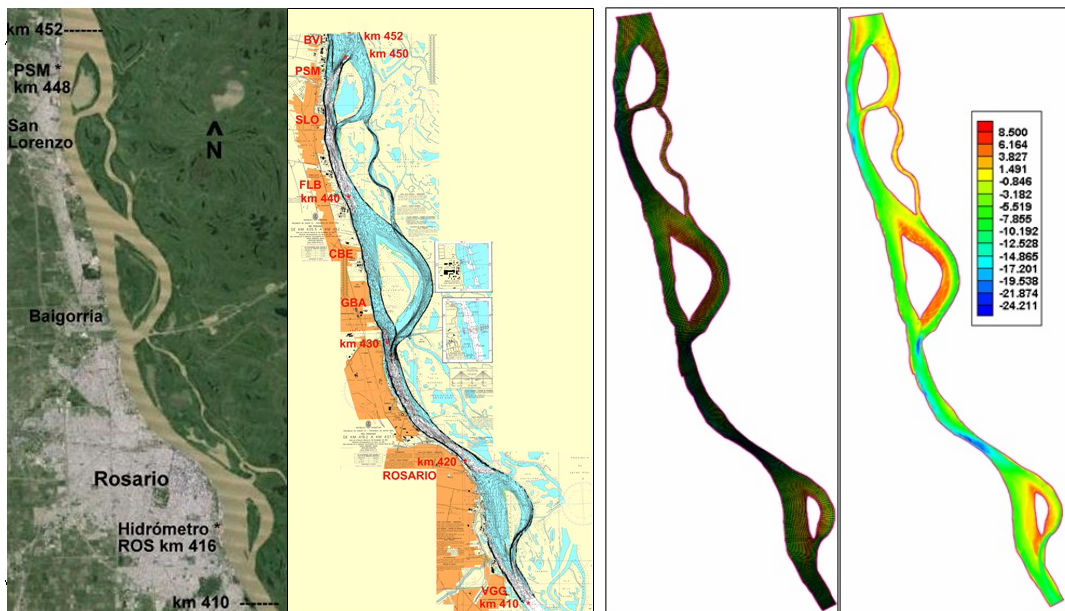


Figura 1. Ubicación del tramo km 410-452 del Río Paraná. De izq. a der.: Imagen Landsat Google-Earth©, Cartas náuticas del SHN superpuestas con isóbatas de relevamientos de la DNVN, Malla computacional y Nivel del lecho en (m) IGN.

A macro-escala, el cauce principal muestra una configuración morfológica caracterizada por una sucesión de expansiones, donde se observan islas vegetadas, interconectadas con tramos más estrechos y profundos. La relación entre el ancho y la profundidad media varía en un orden de magnitud, $25 < B/h_m < 250$. El lecho es de arena con d_{50} variando entre 0,26 mm y 0,32 mm, y desvío estándar geométrico variando entre 1,46 y 1,85 (Basile y Riccardi, 2002).

Breve descripción del modelo matemático

Para la simulación numérica hidrodinámica se utiliza el modelo matemático hidromorfodinámico bidimensional horizontal CCHE2D (Jia y Wang, 2001) que simula la

hidrodinámica; el transporte de sedimentos y la erosión-sedimentación del lecho. Las ecuaciones de gobierno de la hidrodinámica (RANS integradas en profundidad) se expresan como (Jia y Wang, 2001):

$$\frac{\partial z_w}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad \text{continuidad} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial z_w}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} \quad \text{momentum en direcc. x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial z_w}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} \quad \text{momentum en direcc. y} \quad (3)$$

donde z_w : nivel de la superficie libre del agua, h : profundidad de flujo, u y v : velocidades medias en la vertical en direcciones x e y respectivamente, ρ : densidad del agua, g : aceleración de la gravedad, τ_{bx} y τ_{by} : tensiones de corte sobre el fondo en direcciones x e y respectivamente, las cuales se expresan como:

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u U}{h^{1/3}} \quad , \quad \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v U}{h^{1/3}} \quad (4a) \text{ y } (4b)$$

donde n : coeficiente de rugosidad de Manning, U : módulo vector velocidad y τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yx} y τ_{yy} tensiones turbulentas o tensiones adicionales de Reynolds promediadas en vertical, las cuales se expresan, de acuerdo a la analogía de Boussinesq, en función de la viscosidad turbulenta ν_t y del tensor de velocidad de deformación medio:

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \rho \frac{\partial u}{\partial x} \quad , \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \rho \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad , \quad \tau_{yy} = 2\nu_t \rho \frac{\partial v}{\partial y} \quad (5a), (5b) \text{ y } (5c)$$

El valor de ν_t puede ser determinado con diferentes opciones a especificar por el usuario. La resolución de las ecuaciones se realiza con el Método de Elementos Eficientes. Para la implementación del modelo se utiliza la plataforma bajo entorno Windows© CCHE-GUI 3.0 (Zhang, 2006) en conjunción con el mallador de dominios geométricos complejos CCHE-MESH 3.0 (Zhang y Jia, 2009), que incluye varias técnicas para la generación y optimización de mallas computacionales estructuradas ajustadas al contorno

Implementación del modelo matemático

La topobatimetría del cauce se definió con relevamientos realizados por la Dirección Nacional de Vías Navegables - Distrito Paraná Inferior (DNVN-DPI) entre los años 2010 y 2012. Asimismo, para definir los límites del cauce se utilizaron imágenes satelitales y cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) (Figura 1). La base de datos topobatimétricos se importó con CCHE-MESH y se generó una malla estructurada, en coordenadas curvilíneas ajustadas al contorno con controles de suavización, resultando en promedio $\Delta s=100$ m y $\Delta n=45$ m. Sucesivamente se le asignaron las cotas IGN a los nodos mediante el método de interpolación por triangulación. En la Figura 1 se presentan dos imágenes de la constitución actual del modelo, brindadas por la plataforma CCHE-GUI, donde se observa la malla computacional y los niveles del lecho, expresados en m IGN.

Se realizaron simulaciones en régimen permanente utilizando caudales aforados (FICH, 2004 y 2006; SSRH). Asimismo, se realizaron simulaciones en régimen impermanente del 01/11/2004 al 31/12/2004. Los caudales utilizados para las simulaciones variaron entre $11.640 \text{ m}^3/\text{s}$ y $28.600 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabla 1). De acuerdo a la curva de duración de caudales en Puerto San Martín (PSM, km 448) correspondiente al período 1970-2014, a tales caudales le corresponden tiempos de excedencia de 97,7% y 0,3% respectivamente. Es decir, se simularon aguas bajas, medias y altas del río.

Se realizaron diversas corridas de calibración ajustando el coeficiente de rugosidad de Manning. Los valores obtenidos variaron entre $0,024 \text{ s/m}^{1/3}$ y $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$. Para evaluar la viscosidad turbulenta se especificó un modelo κ - ϵ . Se trataron de reproducir los niveles hidrométricos registrados en los Hidrómetros de ROS y PSM, las distribuciones de velocidades y caudales específicos observadas. Además, se reprodujeron los caudales observados derivados en las bifurcaciones: i) Isla El Banco, km 449; ii) I. Rosita, km 440; iii) I. Carlota, km 436 y iv) I. Ing. Corsi, km 416,5.

Evaluación de resultados

Simulaciones en régimen permanente

En la Tabla 1 se presentan los niveles hidrométricos observados y calculados, referidos a IGN, en los hidrómetros de PSM y ROS, correspondientes a las simulaciones con caudal constante. También se especifica el caudal, el coeficiente de rugosidad de Manning y el error relativo (E_r)

de los niveles hidrométricos calculados respecto a los observados, para cada simulación. Este último, varía entre 0,12% y 1,87% en PSM (km 448) y entre 0,12% y 1,34% en ROS (km 416).

Tabla 1. Niveles hidrométricos observados y calculados en Puerto San Martín (PSM, km 448) y Rosario (ROS, km 416).

Fecha	Q (m ³ /s)	z _w obs. (m) IGN		Simul. Nº	n (s/m ^{1/3})	z _w calc. (m) IGN		E _r (%)		Ē _r (%)	
		PSM	ROS			PSM	ROS	PSM	ROS	PSM	ROS
31/08/2001	11640	5,17	4,47	S1-C5R1	0,025	5,18	4,53	0,19	1,34	0,59	0,96
21/02/2006	14310	6,05	5,23	S2-C4R3	0,025	6,11	5,26	0,99	0,57		
09/06/2005	17490	7,17	6,24	S3-C2R6	0,024	7,18	6,26	0,14	0,32	0,20	0,45
21/12/2004	19570	7,92	6,94	S4-C1R5	0,025	7,94	6,98	0,25	0,58		
02/04/2003	22740	8,59	7,53	S5-C3R4	0,024	8,60	7,57	0,12	0,53	1,00	±0,37
16/08/1982	26760	9,10	8,03	S6-C7R3	0,024	9,27	8,04	1,87	0,12		
04/01/1983	28600	9,98	8,86	S7-C9R2	0,025	10,08	8,82	1,00	-0,45		

Los errores relativos promedio (\bar{E}_r) de niveles hidrométricos son 0,59%, 0,2% y 1 % en PSM y 0,96%, 0,45% y ±0,37% en ROS, para aguas bajas ($z_w < 5,5$ m IGN en ROS), medias y altas ($z_w > 7,3$ m IGN en ROS) respectivamente. Mientras que, los errores relativos promedio correspondientes a las pendientes de la superficie libre, que se estiman a partir de los valores de Tabla 1, son del ±5,4 % para aguas bajas, -1,6 % para aguas medias y ±10 % para aguas altas.

Para cada una de las simulaciones se determinaron los caudales derivados por cada brazo y se los compararon con los caudales observados. A los valores de porcentaje de caudal derivado por el brazo derecho, simulados con el modelo en cada bifurcación, se les ajustaron las siguientes ecuaciones de regresión lineal ($R^2 > 0,95$), para las bifurcaciones kms 449, 440, 436 y 416,5:

$$\%Q(BD_km449) = -4,112 \times 10^{-4} Q + 87,404 \quad , \quad \%Q(BD_km440) = 3,612 \times 10^{-4} Q + 85,318$$

$$\%Q(BD_km436) = -3,920 \times 10^{-4} Q + 71,488 \quad , \quad \%Q(BD_km416,5) = -5,828 \times 10^{-4} Q + 77,646$$

Mediante dichas ecuaciones se calcularon los porcentajes del caudal total derivado por el brazo derecho, para los aforos realizados por FICH (2004, 2006), y se determinaron los errores relativos respecto a los correspondientes porcentajes observados en los aforos. En la Tabla 2 se presentan los resultados de dicha comparación cuantitativa, donde se observa que los errores relativos promedio son iguales a 4,36 %, ±1,81 %, ±2,36 % y 7,63 %, para las bifurcaciones kms 449, 440, 436 y 416,5, respectivamente.

Tabla 2. Porcentaje del caudal total Q derivado por brazo derecho en bifurcaciones del cauce; obs., calc., E_r y \bar{E}_r .

Fecha aforo	Q (m ³ /s)	Bifurc. (km)	% Q (BD)		E_r (%)	\bar{E}_r (%)
			Obs.	Calc.		
30/11/2004	20790	449,0	74,30	78,85	5,77	4,36
21/02/2006	13617	449,0	79,40	81,80	2,93	
30/11/2004	19818	440,0	91,20	92,48	1,38	±1,81
08/03/2006	14839	440,0	92,70	90,68	-2,23	
02/12/2004	19075	436,0	61,40	64,01	4,08	±2,36
08/03/2006	14315	436,0	66,30	65,88	-0,64	
25/11/2004	16901	416,5	70,00	76,75	8,80	7,63
26/05/2006	12634	416,5	72,00	76,98	6,47	

En la Figura 3a se presenta una comparación entre caudales específicos calculados y observados en la sección km 429 (a la altura del balneario La Florida en Rosario), correspondiente a la simulación S4-C1R5 ($Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$). Se nota que la distribución de caudales específicos en la sección transversal es muy bien reproducida por el modelo. El error relativo promedio, entre valores calculados y observados, es igual a $\pm 5 \%$. Para la misma sección, en la Figura 3b se presentan los niveles hidrométricos calculados y observados, conjuntamente con el nivel del lecho del MDT generado con CCHE-MESH y los niveles del lecho extraídos del relevamiento batimétrico (todos los niveles referidos al IGN). Se observa una buena correspondencia entre los valores de profundidad ($h=z_w-z_b$) observados y calculados. El error relativo promedio, entre valores puntuales calculados y observados de profundidad de flujo, es igual a $\pm 4,4 \%$.

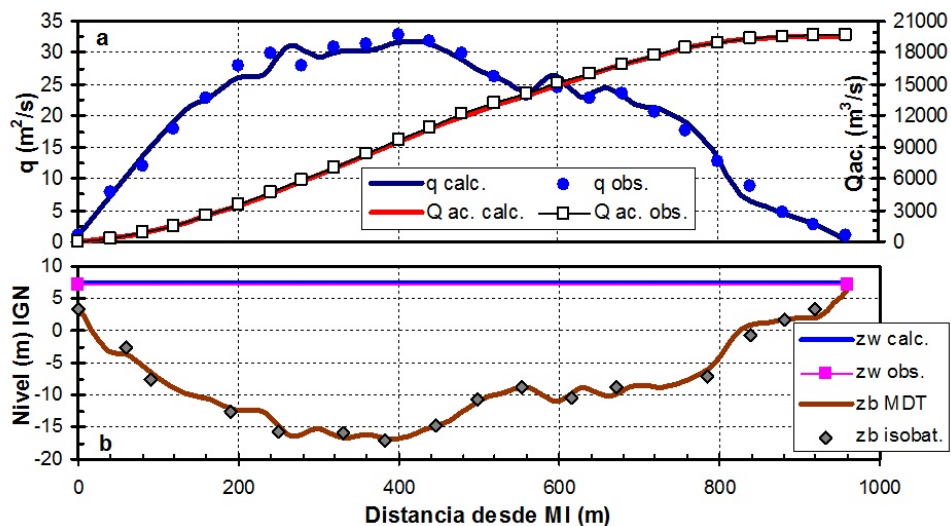


Figura 3. Simulación S4-C1R5, $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$. Sección transversal km 429. a) Comparación de la distribución de caudales específicos q calculados y observados y correspondiente curva de caudales acumulados Q_{ac} . b) Nivel hidrométrico calc. y obs.; nivel del lecho del MDT y nivel del lecho observado a partir de relevamiento batimétrico.

Simulaciones en régimen impermanente

Los limnigramas simulados en régimen impermanente reproducen adecuadamente los observados en PSM y ROS. En la Figura 4 se presentan los limnigramas calculados y observados, en los hidrómetros mencionados, conjuntamente con el hidrograma de entrada al tramo. Se puede apreciar que los ajustes logrados son muy satisfactorios. Para cuantificar el grado de ajuste se calcularon los coeficientes de Nash-Sutcliffe, E, mediante la siguiente ec.:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [z_w(i \Delta t)_{obs.} - z_w(i \Delta t)_{calc.}]^2}{\sum_{i=1}^N [z_w(i \Delta t)_{obs.} - \bar{z}_{w_{obs.}}]^2} \quad (6)$$

donde, $\bar{z}_{w_{obs.}}$ es el valor medio de los niveles hidrométricos z_w , observados en un intervalo de tiempo $N\Delta t$. $E=1$ corresponde a un ajuste perfecto entre niveles calculados y observados. Para ambas estaciones los valores obtenidos fueron, $E=0,987$ (PSM) y $E=0,991$ (ROS).

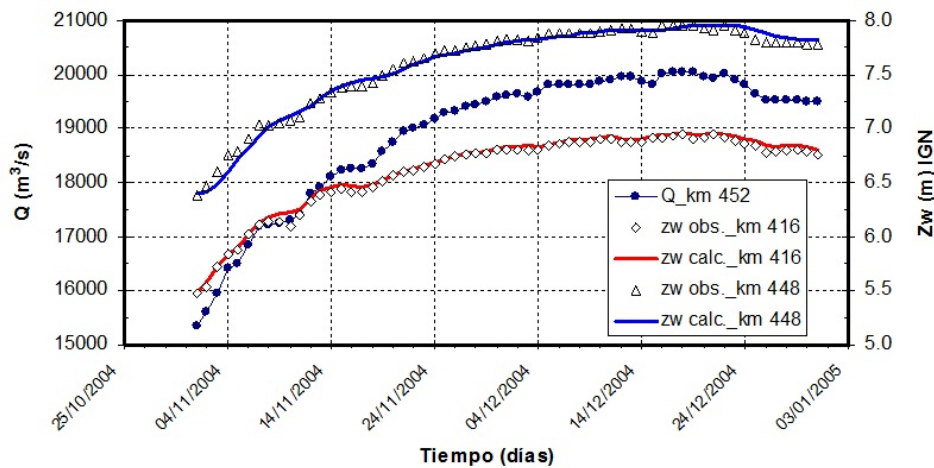


Figura 4.- Caudal en función del tiempo en entrada (km 452) y comparación de limnigramas observados y calculados en km 416 (Hidrómetro Rosario) y km 448 (Hidrómetro Puerto San Martín).

Conclusiones

Se ha implementado el modelo CCHE2D para simular la hidrodinámica, en un tramo de 42 km (km 410/km 452) del río Paraná. Los caudales aforados, utilizados para las simulaciones en régimen permanente y los caudales especificados en la simulación en régimen

impermanente, barren todo el rango de duraciones que se observa en la curva de duración de caudales de Puerto San Martín (PSM, km 448). De esta manera, se ha caracterizado el comportamiento hidrodinámico para condiciones de aguas bajas, medias y altas del río.

Los resultados del modelo hidrodinámico han sido contrastados con mediciones de caudales con ADCP y con niveles hidrométricos registrados en el hidrómetro de Rosario (ROS, km 416) y Puerto San Martín (PSM, km 448). El modelo ha representado satisfactoriamente la dinámica del flujo en el tramo estudiado, tanto en régimen permanente como impermanente; ya sea en lo que concierne a la reproducción de niveles hidrométricos, pendientes de la superficie libre, profundidades de flujo, distribución de velocidades y caudales específicos en secciones transversales, como así también, en lo que respecta a la representación de los porcentajes del caudal total que son derivados en las bifurcaciones del cauce.

En las simulaciones en régimen permanente, el error relativo de los niveles hidrométricos calculados respecto a los observados, varía entre 0,12 % y 1,87 % en PSM (km 448) y entre 0,12 % y 1,34 % en ROS (km 416). Mientras que, los errores relativos promedio para aguas bajas, medias y altas son 0,59 %, 0,2 % y 1 % en PSM y 0,96 %, 0,45 % y $\pm 0,37$ % en ROS, respectivamente. Los errores relativos promedio, correspondientes a las pendientes de la superficie libre, son del $\pm 5,4$ % para aguas bajas, -1,6 % para aguas medias y ± 10 % para aguas altas. Los errores relativos promedio, entre valores calculados y observados, de caudal específico y profundidad de flujo (S4-C1R5, km 429), son iguales a ± 5 % y $\pm 4,4$ %, respectivamente. Los porcentajes del caudal total, derivados en las cuatro bifurcaciones del cauce analizadas, son reproducidos adecuadamente. Los errores relativos promedio, entre valores calculados y observados, son iguales a 4,36 %, $\pm 1,81$ %, $\pm 2,36$ % y 7,63 %, para las bifurcaciones kms 449, 440, 436 y 416,5, respectivamente.

En relación a las simulaciones en régimen impermanente, los limnigramas calculados reproducen satisfactoriamente a los observados en PSM y ROS. En efecto, los valores obtenidos del coeficiente de Nash-Sutcliffe (1970), para ambas estaciones, fueron cercanos a la unidad: $E=0,987$ (PSM) y $E=0,991$ (ROS).

Agradecimiento. Los autores agradecen a la UNR por el apoyo brindado mediante los PID 19-I368, 19-I358, ING509 e ING514 y a la DNVN-DPI por los datos topobatimétricos e hidrológicos-hidráulicos facilitados.

Referencias bibliográficas

1. Basile, P.A. y Riccardi, G.A. (2002). "A Quasi-2D Hydro-Morphological Mathematical Model: An Application to the Argentinean Paraná River". *International Journal of Sediment Research*, 17 (1), 20-30.
2. FICH (2004). *Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de La Invernada, Río Paraná*. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – UNL, Diciembre 2004.
3. 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, Julio 2006.
4. García, M.; Basile, P.A.; Riccardi, G. y Rodríguez, J.F. (2015). "Modelling extraordinary floods and sedimentological processes in a large channel-floodplain system of the Lower Paraná River (Argentina)". *International Journal of Sediment Research*, 30 (2015), 150-159.
5. Jia, D., Shao, X., Wang, H. y Zhou, G. (2010). "Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River". *Adv. in Water Resources*, 348-360.
6. Jia, Yafei y Wang, Sam S.Y. (2001). *CCHE2D: Two-dimensional Hydrodynamic and Sediment Transport Model for Unsteady Open Channel Flows Over Loose Bed*. National Center for Computational Hydro science and Engineering. The University of Mississippi. Technical Report N° NCCHE-TR-2001-01, Ago. 2001.
7. Zhang, Yaoxin (2006). *CCHE-GUI: Graphical User Interface for CCHE2D Model. Users Manual - Version 3.0*. National Center for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. Technical Report N° NCCHE-TR-2006-02, Oct. 2006.
8. Zhang, Yaoxin y Jia, Yafei (2009). *CCHE-MESH: 2D Structured Mesh Generator Users' Manual - Version 3.0*. National Center for Computational Hydroscience and Engineering. The University of Mississippi. Technical Report N° NCCHE-TR-2009-01, Feb. 2005.
9. Zhou, G., Wang, H., Shao, X. y Jia, D. (2009). "Numerical model for sediment transport and bed degradation in the Yangtze River channel downstream of Three Gorges reservoir". *Journal of Hydraulic Engineering*, 135, 729-740.