

Modelación cuasi-bidimensional de escurrimiento superficial en cauce principal del tramo Paraná inferior km 410-452

Florencia Peruzzo^{1,2,4}, Gerardo Riccardi^{1,2,3}, Pedro Basile^{1,2}

¹Departamento de Hidráulica-Escuela de Ingeniería Civil, FCEIA, UNR

²Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, FCEIA, UNR

³Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas

E_mail: fperuzzo@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN: En este trabajo se presenta el avance de la investigación que tiene como objetivo la simulación de escurrimiento superficial cuasi-bidimensional en un tramo del río Paraná Inferior comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe – Océano, con el fin de describir variables de flujo como velocidad y niveles para diferentes estados en todo el dominio espacial con un modelo de complejidad reducida. Asimismo se indagan ventajas y desventajas respecto al abordaje cuasi-bidimensional y su contrastación con la descripción del flujo por parte de un modelo bidimensional completo también constituido en el tramo. El modelo de simulación implementado es el CTSS8RIO, al cual se le ha acoplado la plataforma de pre y postprocesamiento de datos y resultados bajo entorno de ventanas SIMULACIONES 2.0, siendo de tipo difusivo simplificado no contemplando efectos inerciales ni cierre de turbulencia, ambos software de desarrollo propio. Hasta el momento se avanzó en la constitución del modelo digital del fondo a partir de datos recopilados de relevamientos existentes (DNVN–DPI) con una discretización cuadrangular del dominio de 20 m x 20 m. El modelo quedó conformado por 228531 celdas y 454134 vinculaciones. El modelo ha sido calibrado y validado para estados de flujo permanente en un rango de aguas bajas a altas comprendiendo caudales entre 11640 m³/s hasta 28600 m³/s. Como parámetro de calibración fue considerado el coeficiente de rugosidad de Manning de las celdas. Asimismo el modelo fue testeado respecto a su capacidad de reproducción de la distribución transversal de caudales específicos y la derivación de caudales en 3 bifurcaciones que presenta el tramo. Los resultados en términos de niveles de agua y caudales han resultado satisfactorios considerando la baja complejidad del modelo.

Palabras clave: Modelo cuasi-2D, ríos aluviales de llanura, Río Paraná.

INTRODUCCIÓN

El río Paraná, uno de los ríos de llanura más importante del mundo, 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. La confluencia de los ríos Paraná y Uruguay forman el Río de la Plata. 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 (SAyDS, 2013).

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. La central hidroeléctrica Yacyretá, construida sobre este río, es hoy una de las empresas generadoras de energía eléctrica más importantes de la región gracias al gran caudal que el mismo transporta. Por otro lado, la Vía Navegable Troncal Confluencia - Océano, que es una ruta de navegación que comprende el tramo argentino del río Paraná desde el km 1238 llamado Confluencia hasta la zona de aguas profundas naturales del Río de la Plata exterior km 239,1 del Canal Punta Indio, forma parte de la hidrovía que vincula los puertos de nuestro país con los de Bolivia, Paraguay y Brasil. La misma está formada por las secciones Santa Fe - Océano al sur y Santa Fe - Confluencia al norte. En lo que respecta a los humedales, además de los usos que se le dan a lo largo del corredor fluvial como son la ganadería extensiva, la pesca y la caza de especies de fauna nativa y las actividades turísticas y recreativas estos ecosistemas permiten el abastecimiento de agua, el control de las inundaciones, la protección contra las tormentas, la retención de contaminantes, entre otros, (SAyDS, 2013).

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 (Singh y Woolhiser, 2002).

En el presente trabajo se busca mostrar los avances de la implementación de un modelo de simulación cuasi-bidimensional para caracterizar la hidrodinámica de un tramo del río Paraná Inferior comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe – Océano. Además se evaluarán ventajas y desventajas respecto al abordaje cuasi-bidimensional y se contrastarán los resultados obtenidos con los de un modelo bidimensional completo aplicado por Basile et al. (2015) constituido también en el tramo. El modelo de simulación implementado es el CTSS8RIO siendo de tipo difusivo de los denominados de complejidad reducida no contemplando efectos inerciales ni cierre de turbulencia, no obstante pese a su simplicidad pueden representar con adecuado nivel de aproximación patrones predominantes del escurrimiento (Nicholas et al., 2012). Existen antecedentes de simulaciones con modelos bidimensionales completos aplicados satisfactoriamente en el mismo tramo (FICH, 2006; Guerrero y Lamberti, 2013; Basile et al., 2015) y en lo que respecta a modelación cuasi-2D se ha realizado una aplicación en un tramo de 6 km en las cercanías de Puerto San Martín (Basile y Riccardi, 2002) y desde la ciudad de Diamante hasta la ciudad de Ramallo se realizó una modelación unidimensional del cauce principal y cuasi-2d de la planicie de inundación (García et al., 2013).

DESCRIPCION DEL TRAMO EN ESTUDIO

En la Figura 1 se presenta el área en estudio, la cual se limitó a un tramo del río Paraná Inferior comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa fe – Océano. El cauce principal en este tramo se desarrolla sobre la margen santafesina abarcando distintas localidades como Puerto San Martín, San Lorenzo, Granadero Baigorria y Rosario, a lo largo de la cual se desarrolla un importante cordón industrial junto con la presencia de numerosas instalaciones portuarias. El río escurre en una dirección predominante norte-sur presentando una configuración cauce principal e islas, caracterizándose con un ancho medio para el tramo completo de 1580 m (FICH, 2004). El valle de inundación se desarrolla sobre la margen izquierda del río y el ancho del mismo en esta zona varía entre 40 – 50 km. Esta gran planicie asociada se inunda parcial o totalmente durante las crecidas.

El caudal medio anual es de $17500 \text{ m}^3/\text{s}$ según caudales registrados en Puerto San Martín (PSM, km 448) durante el periodo 1970-2014 (Basile et al., 2015). Durante la crecida extraordinaria de 1983 el mayor caudal de agua fue cerca de $60000 \text{ m}^3/\text{s}$, casi $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ circulaban sobre el cauce principal (García et al., 2013). Para dicho evento, el nivel máximo de agua en Rosario (ROS, km 416) fue de 9.21 m IGN y el valle estuvo completamente inundado con una profundidad media de 4 m de agua. Mientras que en PSM el menor caudal registrado fue alrededor de $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Basile et al., 2015). La pendiente hidráulica que se verifica en el tramo es de $2 \times 10^{-5} \text{ m/m}$ para aguas bajas y de $3.5 \times 10^{-5} \text{ m/m}$ para aguas altas.

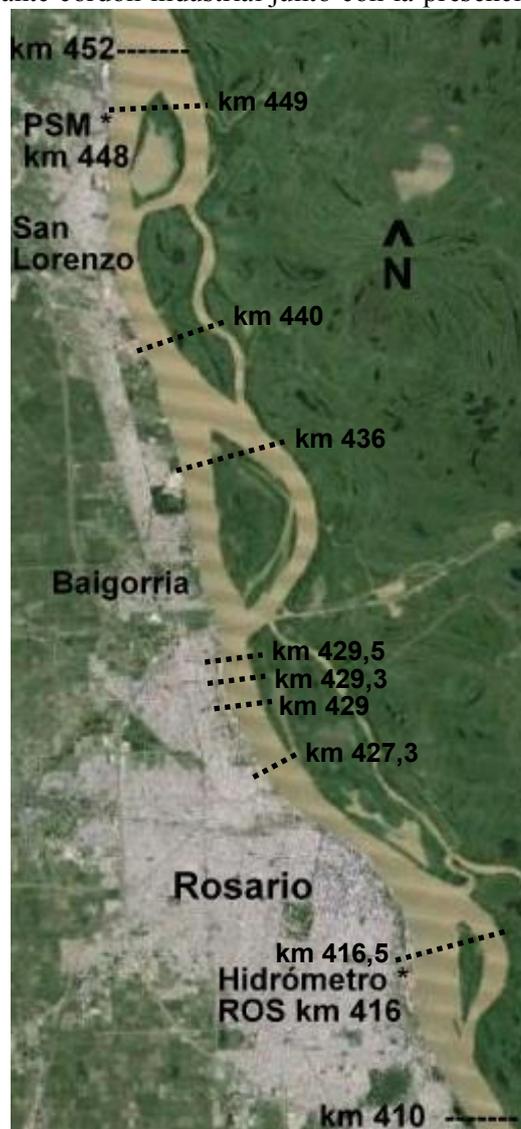


Figura 1.- Ubicación del tramo en estudio (imagen extraída de Google Earth©; Basile et al., 2015)

MODELO DE SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA

El modelo de simulación implementado es el CTSS8RIO al cual se le ha acoplado la plataforma de pre y postprocesamiento de datos y resultados bajo entorno de ventanas SIMULACIONES 2.0 (Stenta et al., 2005). Es una versión adaptada del modelo CTSS8 (Riccardi, 2001) siendo de tipo difusivo simplificado no contemplando efectos inerciales ni de cierre de turbulencia. Las ecuaciones utilizadas por el modelo para representar la hidrodinámica son (Figura 2):

Continuidad:

$$A_{S_{k,i}} \frac{dz_{k,i}}{dt} = P_{k,i(0)} + \sum Q_x + \sum Q_y \quad (1)$$

Momentum en dirección x:

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \eta_x^2 \frac{(Q_x/A_{tx}) \sqrt{(Q_x/A_{tx})^2 + (Q_y/A_{ty})^2}}{h_x^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

Momentum en dirección y:

$$\frac{\partial z}{\partial y} + \eta_y^2 \frac{(Q_y/A_{ty}) \sqrt{(Q_x/A_{tx})^2 + (Q_y/A_{ty})^2}}{h_y^{4/3}} = 0 \quad (3)$$

Donde:

$A_{S_{k,i}}$: área superficial mojada en la celda i

$z_{k,i}$: cota de agua en la celda i

$P_{k,i}$: ingreso/egreso de caudales externos

Q_x y Q_y , η_x y η_y , h_x y h_y , A_{tx} y A_{ty} : caudales intercambiados, coeficientes de resistencia de Manning, alturas y áreas transversales consideradas entre las celdas vinculadas en el sentido x e y.

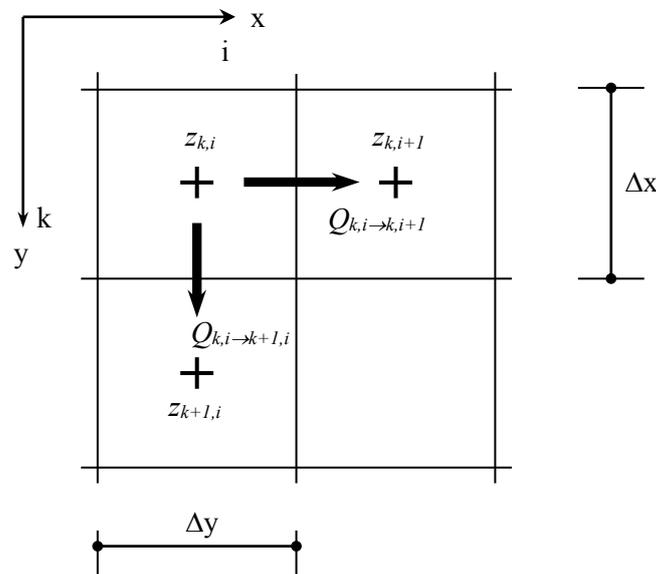


Figura 2.- Definición de las variables de flujo en la grilla

CONSTITUCIÓN DEL MODELO

La constitución del modelo matemático se desarrolló en etapas. En primer lugar, se constituyó el modelo digital del terreno del fondo del río, las márgenes e islas a partir de datos existentes recopilados de relevamientos realizados por la Dirección Nacional de Vías Navegables – Delegación Paraná Inferior entre los años 2004 y 2006 (FICH, 2004 y 2006). El Riacho Paraná Viejo se completó con datos relevados entre los años 2010 y 2012 (DNVN-DPI, 2014). Se digitalizaron las curvas de nivel del fondo georeferenciadas al sistema de coordenadas

POSGAR 94 Faja 5 Datum WGS 1984 y vinculadas altimétricamente a un plano de referencia a la altura del km 428 obtenido de la interpolación de los ceros de los hidrómetros locales correspondientes a Puerto Rosario (km 416) y Puerto San Martín (km 448). Se ajustó la base espacial del área de modelación mediante un mosaico construido a partir de 6 cartas náuticas provistas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN, 2014) (Figura 3 a). A partir de la digitalización de las curvas de nivel mediante el software SURFER®, adoptando método de interpolación Kriging, se construyó el modelo digital del fondo del cauce principal en una grilla cuadrangular de 20 m x 20 m. Este nivel de detalle ha permitido capturar toda la información disponible del relevamiento del cauce. Finalmente el modelo quedó conformado por 228531 celdas y 454134 vinculaciones (Figura 3 b). La condición de borde aguas arriba se constituyó con 102 celdas en las que se distribuye el caudal total ingresante. La condición de borde aguas abajo está constituida por 39 celdas con su correspondiente altura de agua asociada al caudal entrante.

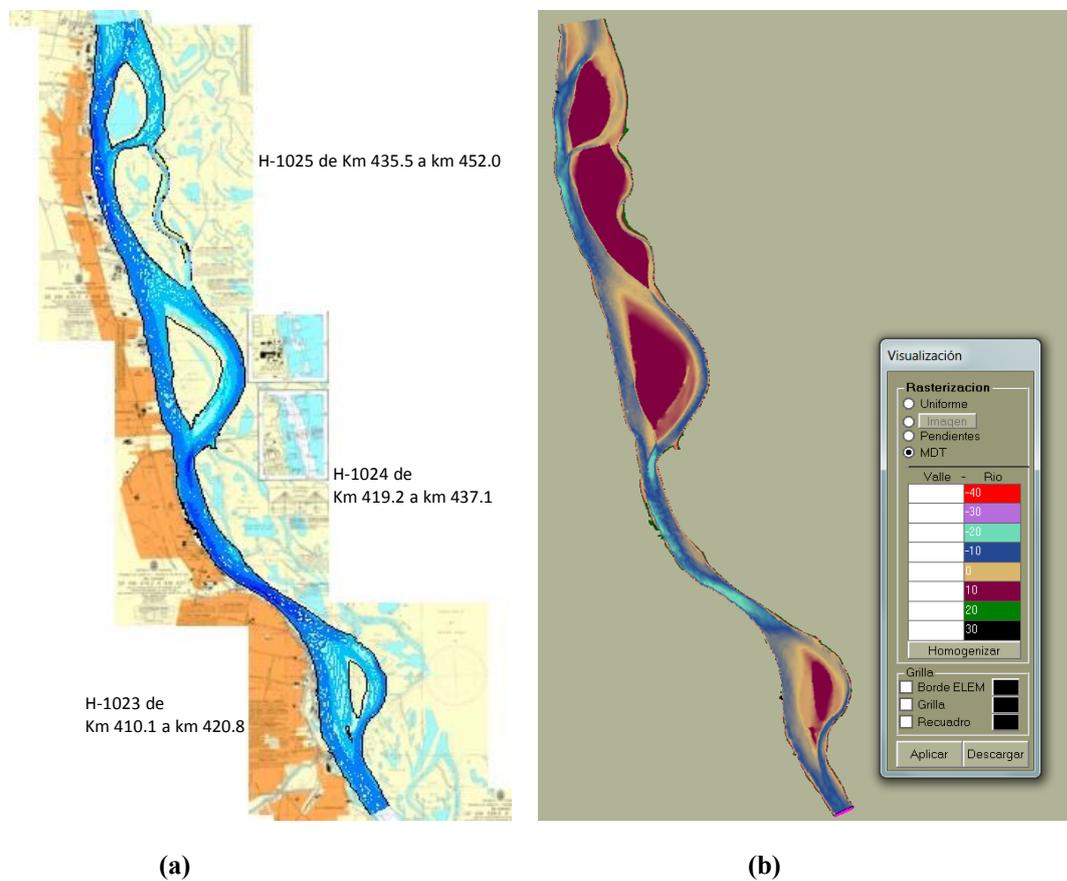


Figura 3.- (a) Curvas de nivel digitalizadas según relevamientos de la DNVN – Distrito Paraná Inferior junto con las cartas náuticas del SHN; (b) Constitución del modelo y MDT

RESULTADOS

La calibración y validación del modelo consistió en la simulación de escurrimiento en flujo permanente en donde se llevó adelante la comparación de niveles de agua registrados en los hidrómetros de Rosario (ROS-km 416) y Puerto San Martín (PSM-km 448) con niveles de agua calculados. El parámetro de calibración considerado fue el coeficiente de resistencia de Manning η en cada vinculación entre celdas.

El primer paso consistió en una calibración preliminar con el fin de reproducir el escurrimiento ocurrido en diciembre de 2004 con un caudal de 19570 m³/s. Este estado del flujo corresponde a una campaña de mediciones de niveles, velocidades y caudales realizada en esa fecha (FICH, 2004). Se efectuaron simulaciones con flujo permanente considerando $0.025 \leq \eta \leq 0.032$. Se impuso como condición de borde el nivel constante en el borde aguas abajo. Para fijar condiciones iniciales se partió con un nivel hídrico en todas las celdas igual al nivel correspondiente en la sección de borde aguas abajo y se fijó el caudal ingresante en el extremo aguas arriba. Posteriormente se llevo a cabo un proceso de calibración – validación para estados de flujo permanente en un rango de aguas bajas a altas comprendiendo caudales entre $11640 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 28600 \text{ m}^3/\text{s}$. El rango de valores del coeficiente de resistencia de Manning que proporcionó el mejor ajuste estuvo comprendido desde 0.031 para aguas bajas y 0.0285 para aguas altas. El error relativo porcentual en niveles se acota en 0.72% siendo el valor medio de 0.24%. En la Tabla 1 se muestra una síntesis de los parámetros observados y calculados. Además en la Figura 4 se muestran los perfiles de niveles calculados sobre el eje del canal de navegación conjuntamente con los niveles observados para cada escenario estudiado y el perfil de fondo.

Tabla 1.- Niveles Observados, Calculados y Errores porcentuales

Fecha	Q [m ³ /s]	z _w [m] IGN observado (z _{wo})		n [s/m ^{1/3}]	z _w [m] IGN calculado (z _{wc})		E _r = 100 (z _{wc} /z _{wo})-1 [%]	
		PSM	ROS		PSM	ROS	PSM	ROS
21/02/2006	14310	6.05	5.23	0.031	6.05	5.21	0.07	0.40
09/06/2005	17490	7.12	6.23	0.031	7.17	6.24	0.72	0.10
21/12/2004	19570	7.92	6.93	0.031	7.91	6.94	0.09	0.16
02/04/2003	22740	8.59	7.52	0.030	8.65	7.52	0.66	0.05
16/08/1982	26760	9.16	8.03	0.0285	9.18	8.01	0.24	0.31
04/01/1983	28600	9.98	8.85	0.0285	9.96	8.85	0.17	0.02

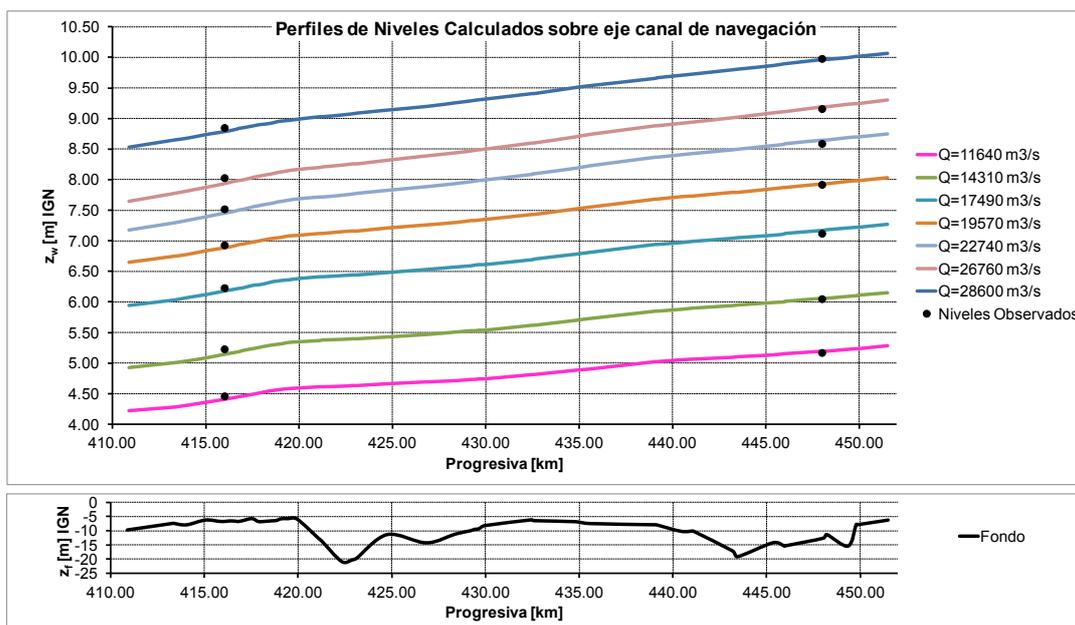


Figura 4.- Niveles Observados, perfiles de Niveles Calculados sobre eje canal de navegación y perfil del fondo

A su vez, con los resultados obtenidos en las simulaciones para caudales $Q=14310 \text{ m}^2/\text{s}$ y $Q=19570 \text{ m}^2/\text{s}$ se calcularon las distribuciones de caudales unitarios en distintas secciones transversales y se compararon con distribuciones observadas en mediciones de campo con ADCP realizadas por la FICH en el periodo febrero-marzo 2006 (FICH, 2006). En las Figuras 5 y 6 se presenta la comparación entre caudales unitarios calculados y observados en las secciones km 452, 440, 429.3 y 427.3 para la simulación con caudal $Q=14310 \text{ m}^2/\text{s}$ y en las secciones km 440, 429.5, 429 y 427.3 para la simulación con caudal $Q=19570 \text{ m}^2/\text{s}$. La calidad del ajuste fue evaluada en esta instancia con el coeficiente de correlación R^2 , demostrando una buena capacidad del modelo en reproducir las distintas distribuciones aforadas. En las graficas de ambas figuras se expresan los respectivos valores que adopta el coeficiente de correlación R^2 determinado entre datos observados y calculados para cada una de las secciones, el cual quedo comprendido entre 0.73 y 0.92, considerándose aceptable. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las distintas secciones transversales en el tramo en estudio.

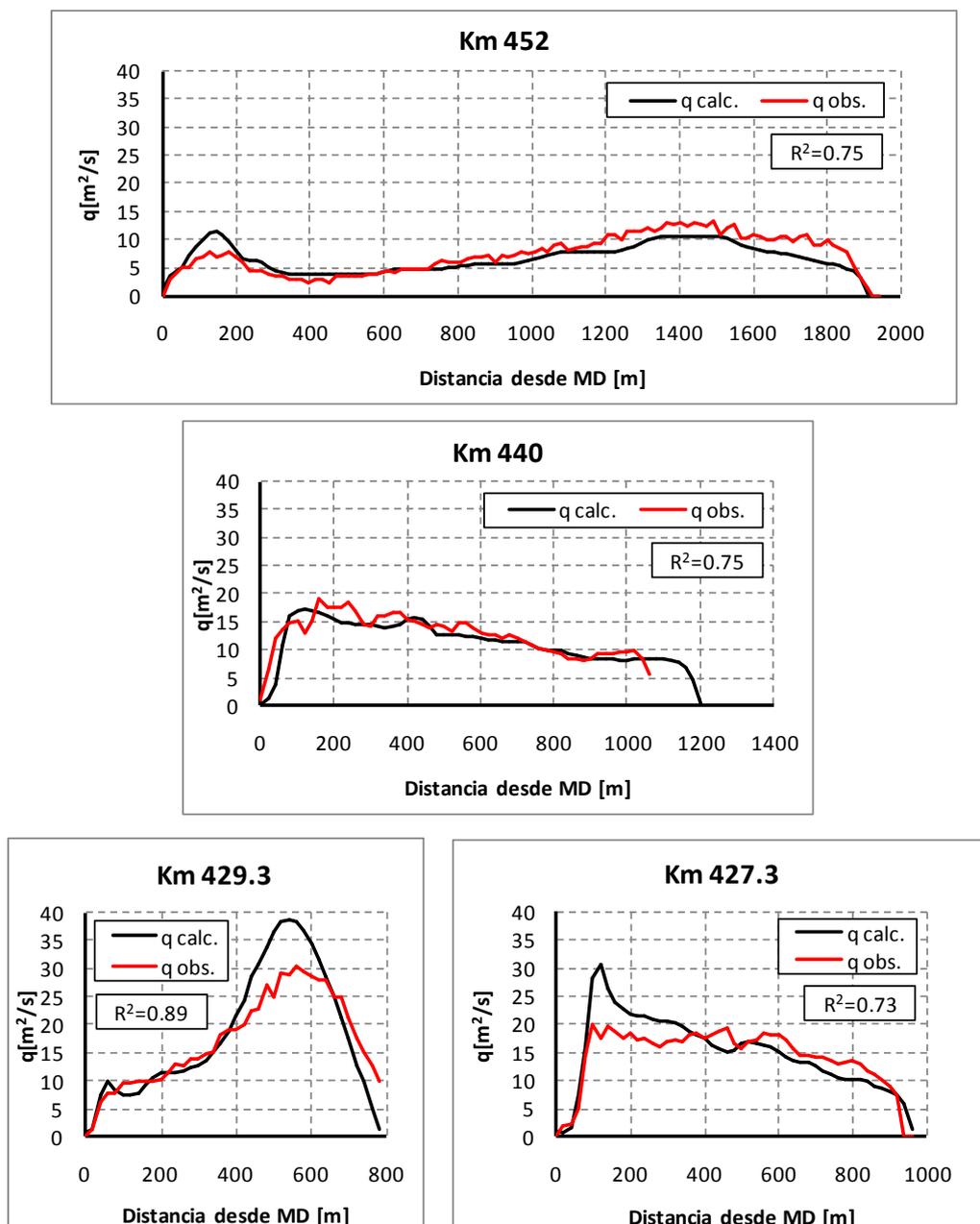


Figura 5.- Simulación $Q=14310 \text{ m}^2/\text{s}$. Comparación de la distribución de caudales unitarios q calculados y observados

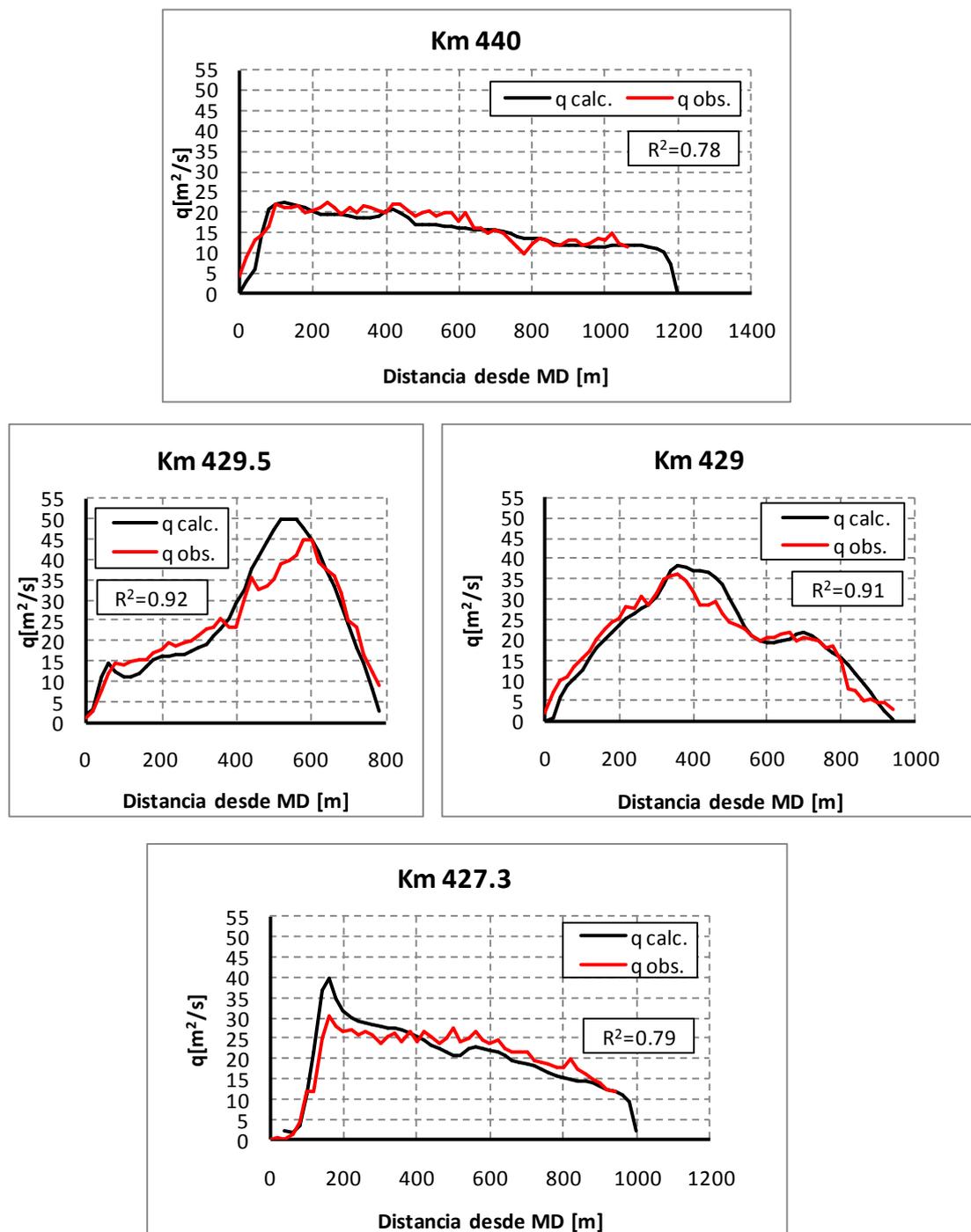


Figura 6.- Simulación $Q=19570 m^2/s$. Comparación de la distribución de caudales unitarios q calculados y observados. A los efectos de estudiar la capacidad de distribuir los caudales en las bifurcaciones que presenta el tramo de río en estudio se procedió a estimar los caudales derivados en varias secciones para cada uno de los 7 escenarios de flujo permanente simulados y luego se compararon con caudales aforados por FICH (2004 y 2006). También se compararon con los caudales simulados en el trabajo de Basile et al. (2015). Las cuatro bifurcaciones consideradas (Figura 1) corresponden a: 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. En la Tabla 2 se presentan los porcentajes del caudal total Q derivados en cada bifurcación para el brazo derecho (BD) y para el brazo izquierdo (BI), para cada una de las simulaciones.

Tabla 2.- Porcentaje del caudal total Q derivado por BD y BI en las cuatro bifurcaciones para cada simulación

Fecha	Q [m ³ /s]	Bifurcación 1		Bifurcación 2		Bifurcación 3		Bifurcación 4	
		BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)	BD(%)	BI(%)
31/08/2001	11640	84.52	15.48	95.63	5.35	64.42	35.73	72.64	27.92
21/02/2006	14310	82.89	17.11	94.26	5.74	63.22	36.78	72.00	28.00
09/06/2005	17490	80.65	19.35	93.48	6.52	62.26	37.74	71.44	28.56
21/12/2004	19570	79.39	20.61	93.03	6.97	61.62	38.38	71.35	28.65
02/04/2003	22740	78.17	21.83	92.64	7.36	61.03	38.97	71.45	28.55
16/08/1982	26760	77.47	22.53	92.30	7.70	60.65	39.35	71.38	28.62
04/01/1983	28600	76.43	23.57	91.87	8.13	60.03	39.97	71.46	28.54

Los caudales aforados en las bifurcaciones corresponden a caudales distintos a los empleados en la simulación en esta etapa de calibración. Para poder determinar los valores a comparar con los aforos, se procedió a ajustar relaciones lineales entre caudal total Q de cada simulación versus los respectivos valores de porcentaje de caudal derivado por cada brazo en cada bifurcación. Una vez halladas estas relaciones se valorizaron los porcentajes en función de los caudales aforados y se compararon porcentajes derivados simulados contra aforados con el correspondiente error porcentual. Dado que se dispone de dos aforos por cada bifurcación, se estableció también un promedio de los valores absolutos de los errores porcentuales (PVAEP). Completando el análisis también se contrastaron los porcentuales de derivación con los que arrojará los trabajos de modelación de Basile et al. (2015). En la Tabla 3 se presentan los resultados de dicha comparación en el brazo derecho para cada bifurcación. Analizando caudales observados y aforados se observa que el valor del error relativo máximo se acota en 6.07% mientras que el promedio de los valores absolutos de los errores relativos para cada bifurcación se acota en 4.92%, ambos valores aceptables. En lo que respecta a la comparación con los resultados obtenidos por Basile et al. (2015) con un modelo bidimensional completo, los valores de los errores relativos obtenidos con el modelo cuasi-2D que aquí se presenta son levemente superiores en las bifurcaciones 1, 2 y 3 e inferiores en la bifurcación 4. Podemos claramente concluir que en la reproducción de la derivación de caudales ambos modelos computan valores con el mismo rango de aproximación.

Adicionalmente, las modelaciones permitieron determinar el campo espacial del modulo de velocidades para cada caudal circulante. Si bien no se ha hecho aún una contrastación con datos observados de los campos espaciales de velocidades, una valoración cualitativa de los resultados permite afirmar que son satisfactorios. No obstante, una performance más concluyente se espera realizar cuando se comparen perfiles de velocidades observados con calculados. En la Figura 7 (a) y (b) se presentan a modo ilustrativo los campos de velocidades (integrada en la vertical) para un estado de aguas bajas y altas respectivamente.

Asimismo, para ser utilizado en posteriores aplicaciones en flujo impermanente, a partir de las simulaciones para los diferentes caudales se determinó la relación z_w-Q en el borde aguas abajo en coincidencia con las configuraciones hidráulicas de mejor ajuste. Esta relación será utilizada como condición de borde biunívoca cota-caudal cuando se simulen series temporales de caudales. En la Figura 8 se presenta la relación z_w-Q en el borde aguas abajo conjuntamente con las correspondientes a los puestos de aforos de niveles.

En términos de intervalo de cálculo el modelo se ha mostrado estable y convergente para un $\Delta t=30$ seg. En lo que concierne al campo de velocidades el modelo cuasibimensional resulta ser completamente dependiente de las profundidades por no considerar mecanismos inerciales. No obstante una comparación con valores aforados de velocidad y/o obtenidos con modelos bidimensionales será efectuada en etapas futuras.

Tabla 3.- Porcentaje del caudal total Q derivado por el brazo derecho en las cuatro bifurcaciones del tramo en estudio, contrastación con datos observados y con resultados de modelo bidimensional completo aplicado en el área de estudio

Fecha Aforo	Q [m ³ /s]	Bifurcación	% derivado BD		E _r [%]	Prom. E _r [%]	Basile et al. (2015)	
			Obs.	Calc.			E _r [%]	Prom. E _r [%]
30/11/2004	20790	1	74.30	78.81	6.07	4.92	5.77	4.36
21/02/2006	13617	1	79.40	82.39	3.77		2.93	
30/11/2004	19818	2	91.20	93.30	2.30	2.57	1.38	±1.81
08/03/2006	14839	2	92.70	94.30	2.83		-2.23	
02/12/2004	19075	3	61.40	62.90	2.43	±3.07	4.08	±2.36
08/03/2006	14315	3	66.30	63.85	-3.70		-0.64	
25/11/2004	16901	4	70.00	71.99	2.85	1.57	8.80	7.63
26/05/2006	12634	4	72.00	72.21	0.29		6.47	

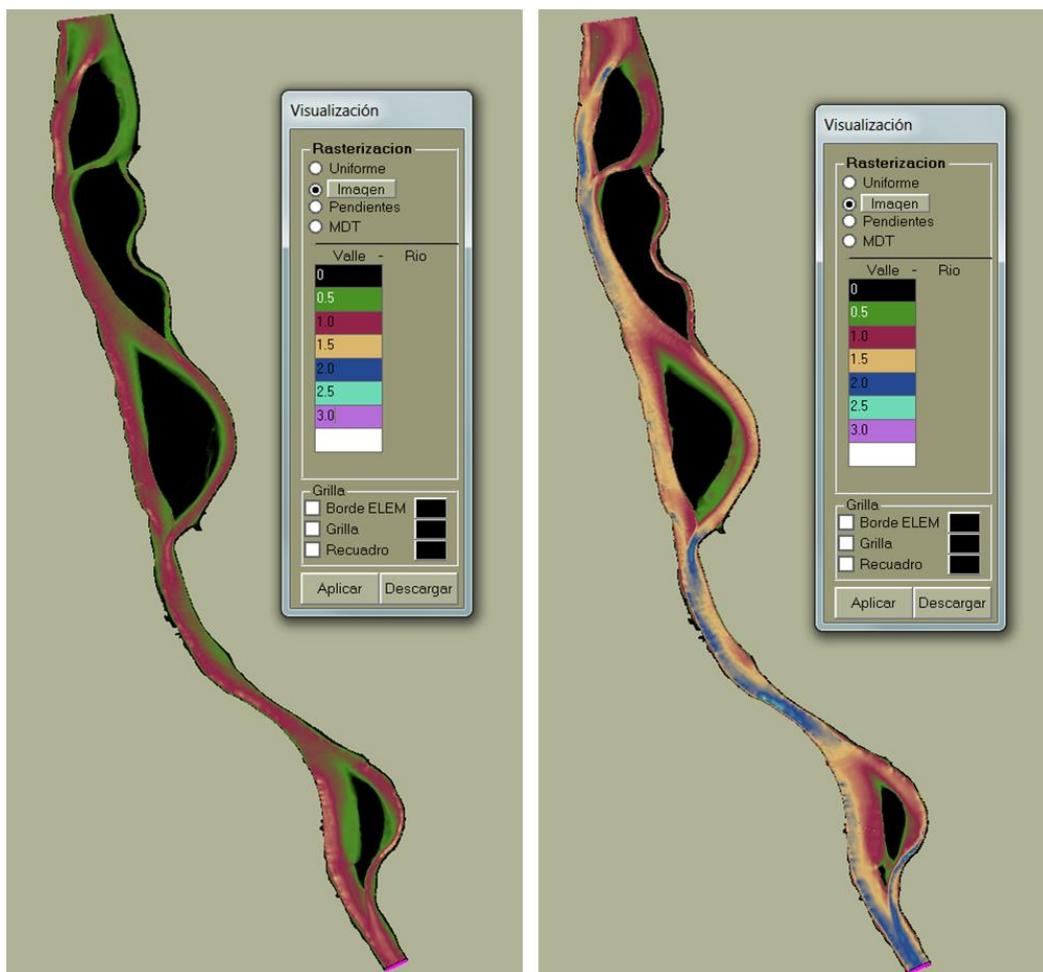


Figura 7.- (a) Campo espacial del modulo de velocidades. Aguas bajas para un caudal de 11640 m³/s; (b) Aguas altas para un caudal de 28600 m³/s

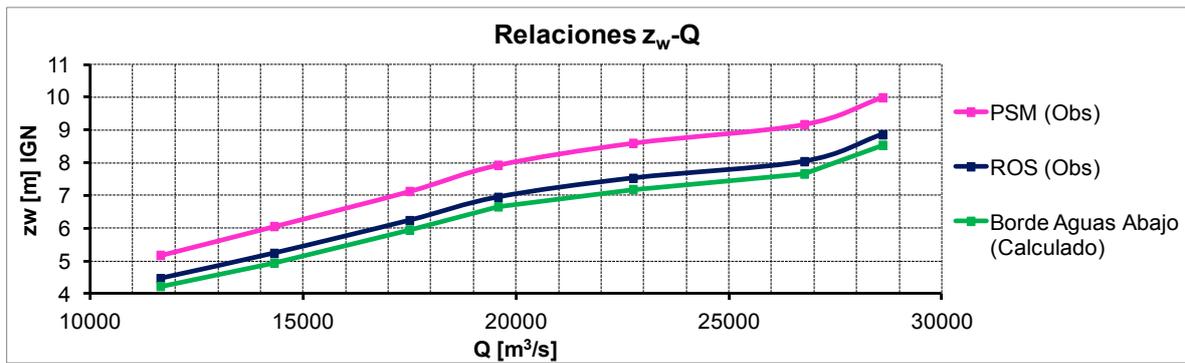


Figura 8.- Relaciones niveles- caudales en sitios de hidrómetros y en borde aguas abajo.

Agradecimiento. Los autores desean expresar su agradecimiento a la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID 19-I368 y 19-I358 y a la DNVN-DPI por los datos topobatimétricos e hidrológicos facilitados.

CONCLUSIONES

El modelo de baja complejidad CTSS8RIO fue implementado para simular la hidrodinámica en régimen permanente de un tramo del río Paraná Inferior. Tanto para la calibración como para la validación los resultados obtenidos en relación a niveles de agua se aproximan aceptablemente con los correspondientes valores registrados en los hidrómetros de Puerto San Martín (PSM, km 448) y Rosario (ROS, km 416) para un rango de aguas bajas a altas comprendiendo caudales entre $11640 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 28600 \text{ m}^3/\text{s}$. El rango de valores del coeficiente de resistencia de Manning que proporcionó el mejor ajuste estuvo comprendido desde 0.031 para aguas bajas y 0.0285 para aguas altas. El error relativo porcentual medio es de 0.24%, considerándose admisible. Se verifica además una buena capacidad del modelo en reproducir distribuciones de caudales unitarios en diferentes secciones transversales contrastando valores calculados con aforados con un coeficiente de correlación R^2 comprendido entre 0.73 y 0.92. Por último, se observa que el modelo distribuye adecuadamente los caudales en las bifurcaciones que presenta el tramo de río en estudio con errores relativos promedio iguales a 4.92%, 2.57%, ± 3.07 y 1.57 para las bifurcaciones kms 449, 440, 436 y 416,5 respectivamente. En etapas siguientes se avanzará en la simulación de flujo impermanente y en la contrastación de niveles, velocidades y distribución de caudales obtenidos de la aplicación de un modelo bidimensional completo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basile, P.A. y Riccardi, G., 2002. A Quasi-2D Hydro-Morphological Mathematical Model: An Application to the Argentinean Paraná River. *International Journal of Sediment Research*, 17 (1), pp. 20-30.
- Basile, P.A., Riccardi, G., Peruzzo, F. y Trivisonno F., 2015. Modelación Hidrodinámica de un tramo del Río Paraná Inferior. *Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*. Montevideo, Uruguay.
- DNVN-DPI - Dirección Nacional de Vías Navegables Delegación Paraná Inferior, 2014. Cartografía de río Paraná. Datos topobatimétricos tramo km 232 – 480. *Comunicación institucional*. Rosario.
- FICH, 2004. *Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de la Invernada, Río Paraná. Informe final*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – UNL, Diciembre 2004.
- 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.
- 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.
- Nicholas, A.P., Sandbach, S.D., Ashworth, P.J., Amsler, M.L., Best, J.L., Hardy, R.J., Lane, S.N., Orfeo O., Parsons, D.R., Reesink, A.J.H., Sambrook Smith, G.H. y Szupiany, R.N., 2012. Modelling hydrodynamics in the Rio Paraná, Argentina: An evaluation and inter-comparison of reduced-complexity and physics based models applied to a large sand-bed river. *Geomorphology*, 169–170, 192–211.
- Riccardi, G., 2001. Un Sistema de Simulación Hidrológica – Hidráulica Cuasi-2D Multicapa para Ambientes rurales y urbanos. *Tesis Doctoral*, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba.
- SAyDS - Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2013. Proyecto GEF 4206 PNUD ARG 10/003. *Inventario de los humedales de Argentina: sistemas de paisajes de humedales del corredor fluvial Paraná Paraguay*. Buenos Aires.
- Singh, V.P. y Woolhiser, D.A., 2002. Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7 (4), pp. 270–292.
- SHN – Servicio de Hidrografía Naval, 2014. Base de Datos Digital de Cartas Náuticas de Río Paraná Inferior, <http://www.hidro.gov.ar/cartas/cartasnauticas.asp>
- Stenta, H., Rentería, J. y Riccardi, G., 2005. Plataforma computacional para gestión de información en la simulación hidrológica – hidráulica del escurrimiento superficial. *XX Congreso Nacional del Agua*, Mendoza, Argentina, 1, T74, pp. 13.