



## EVALUACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL EN UN TRAMO DEL CAUCE PRINCIPAL DEL RÍO PARANÁ

Florencia Peruzzo<sup>(1)(2)(4)</sup>, Gerardo Riccardi<sup>(1)(2)(3)</sup>, Pedro A. Basile<sup>(1)(2)</sup>, Marina García<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. Teléfono: (0341) 153286027  
 E-mail: fperuzzo@fceia.unr.edu.ar

### RESUMEN

En este trabajo se presenta la implementación de un modelo de simulación bidimensional empleando una grilla triangular irregular 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. Se analizaron dos tamaños de grilla y se realizaron simulaciones para estados de flujo permanente e impermanente para tres intervalos de integración temporal diferentes. En flujo permanente se utilizaron caudales aforados comprendidos entre 11640 m<sup>3</sup>/s y 28600 m<sup>3</sup>/s, mientras que, en flujo impermanente se empleó la serie de caudales registrada en el período 01/01/2004 al 31/12/2004. Las variables de ajuste fueron los niveles observados en los hidrómetros de Rosario (ROS-km 416) y Puerto San Martín (PSM-km 448). El rango de valores del coeficiente de rugosidad de Manning, que proporcionó el mejor ajuste, estuvo comprendido entre 0.025 s/m<sup>1/3</sup> y 0.022 s/m<sup>1/3</sup>. Los resultados de las modelaciones se contrastaron con caudales aforados por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) y con los resultados de dos modelos aplicados satisfactoriamente en el mismo tramo. A partir de la buena aproximación obtenida entre niveles y caudales observados versus valores simulados se concluye que los resultados han sido aceptables.

### ABSTRACT

In this paper the implementation of a two-dimensional simulation model using a triangular irregular mesh to characterize the hydrodynamics of a stretch of the Low Parana River between the km 410 and the km 452 of the Santa Fe – Ocean waterway is presented. Two sizes of mesh were analyzed and steady and unsteady flow simulations were performed for three different time-steps. In steady flow measured discharges between 11640 m<sup>3</sup>/s and 28600 m<sup>3</sup>/s were used, whereas in unsteady flow the series of discharges registered in the period 01/01/2004 to 31/12/2004 were considered. The variables of adjustment were the water levels observed at Rosario (ROS-km 416) and Puerto San Martin (PSM-km 448). The range of values of the Manning's roughness coefficient that provided the best adjustment was between 0.025 s/m<sup>1/3</sup> and 0.022 s/m<sup>1/3</sup>. The results of the simulations were verified by measured discharges performed by the Faculty of Engineering and Water Sciences (FICH) and with the results obtained by two models applied satisfactorily in the same reach. From the good approximation obtained between observed and calculated water levels and discharges it can be concluded that the results have been acceptable.

## **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, 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, el Bañado la Estrella y la gran planicie aluvial propia del río. 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). 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 (Singh y Woolhiser, 2002). El tramo del río Paraná que se estudia en el presente 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 Lamberti, 2013; Basile et al., 2015) y modelos cuasi-bidimensionales de baja complejidad (Peruzzo et al., 2016). También, 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, sector que incluye el tramo en estudio, se realizó una modelación unidimensional del cauce principal y cuasi-2D de la planicie de inundación (García et al., 2013).

## **OBJETIVOS**

El objetivo del trabajo es indagar acerca de las potencialidades de uso de un modelo con grilla triangular irregular en la simulación 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. Se contrastaron los resultados obtenidos con los de un modelo bidimensional completo aplicado por Basile et al. (2015) y con los de un modelo cuasi-2D implementado por Peruzzo et al. (2016), constituidos también en el tramo. Además, se realizó un análisis de sensibilidad variando el tamaño de grilla y el intervalo de integración temporal. Se analizaron 2 tamaños de grilla y se realizaron simulaciones con 3 diferentes pasos de tiempo, para flujo impermanente.

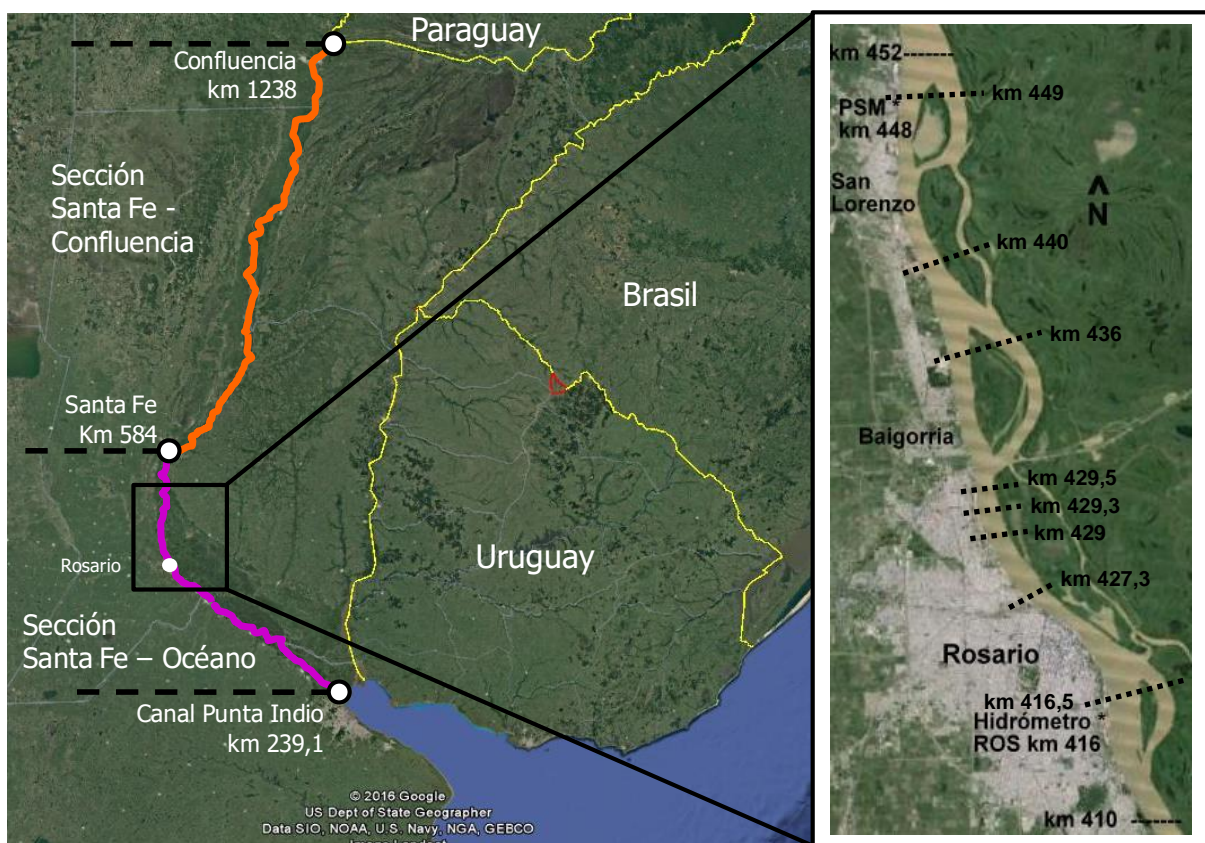
## **TRAMO EN ESTUDIO**

En el Bajo Paraná, formado por el Paraná Medio y el Paraná Inferior, se desarrolla la mayor parte de las actividades agrícolas e industriales del país, cerca del 70 % de su población se asienta en esta zona (SAyDS, 2013). El área en estudio, la cual se presenta en la Figura 1, 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 contando con aproximadamente 42 km de extensión. El cauce principal en este tramo se desarrolla sobre la margen santafesina abarcando distintas

localidades como Puerto San Martín, San Lorenzo, Fray Luis Beltrán, Capitán Bermúdez, Granadero Baigorria, Rosario y Villa Gobernador Gálvez, a lo largo de la cual se desarrolla un importante cordón industrial junto con la presencia de numerosas instalaciones portuarias.

El río fluye 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 m<sup>3</sup>/s según caudales registrados en Puerto San Martín (PSM, km 448) durante el período 1970-2014 (Basile et al., 2015). Durante la crecida extraordinaria de 1983 el mayor caudal de agua fue cerca de 60000 m<sup>3</sup>/s, casi 30000 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s (Basile et al., 2015). La pendiente hidráulica que se verifica en el tramo es de  $2 \times 10^{-5}$  m/m para aguas bajas y de  $3.5 \times 10^{-5}$  m/m para aguas altas.



**Figura 1.-** (a) Vía Navegable Troncal Confluencia - Océano, imagen extraída de Google Earth©. (b) Ubicación del tramo en estudio comprendido entre el km 410 y el km 452 de la ruta de navegación Santa Fe – Océano, imagen extraída de Basile et al., 2015.

## 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© (CHC-NRC, 2011). 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 (Galland et al., 1991). El planteo de las ecuaciones hidrodinámicas de gobierno que el código resuelve simultáneamente son (Lang et al., 2014):

Continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(h) + h \operatorname{div}(\vec{u}) = S_h \quad (1)$$

Momentum en dirección x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad (2)$$

Momentum en dirección y:

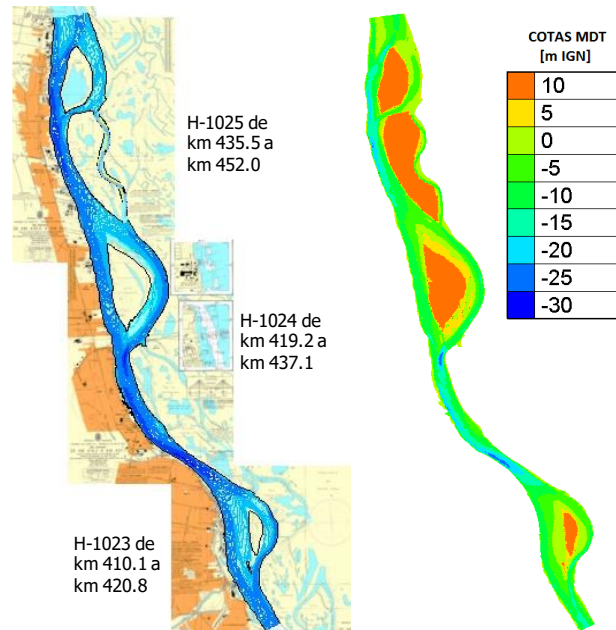
$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (3)$$

Donde  $h$ ,  $u$  y  $v$  son las incógnitas. Los términos de las ecuaciones de momentum  $S_x$  y  $S_y$  representan otras fuerzas tales como la fuerza de Coriolis, la fricción en el fondo, la acción del viento, etc.

La aplicación del modelo se inició con la definición topobatimétrica del cauce principal. Para esto, 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 Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas - UNL entre los años 2004 y 2006 (FICH, 2004 y 2006). El Riacho Paraná Viejo se completó con datos relevados por la Dirección Nacional de Vías Navegables - Delegación Paraná Inferior 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 con cotas referidas al cero IGN. 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 2a). Luego se crearon dos representaciones espaciales del fondo del cauce principal utilizando mallas computacionales de distinto tamaño. Mediante el software Blue Kenue©, se construyeron dos grillas triangulares irregulares, una con una distancia máxima entre nodos igual a 100 (M100) y otra con una distancia máxima de 50 (M50), ambos niveles de detalle permitieron capturar toda la información disponible de relevamientos existentes del fondo del cauce principal. La información topobatimétrica obtenida de la digitalización de las curvas de nivel se importó al mismo programa y se interpolaron los datos de cotas a los nodos de ambas mallas. La constitución M100 quedó conformada por 10361 nodos y 19788 elementos, mientras que la constitución M50 por 40712 nodos y 79501 elementos. En la Figura 2b se presenta una imagen de la constitución M50 donde se observan los niveles del lecho expresados en m referidos al cero IGN, la misma fue obtenida desde la plataforma Blue Kenue©.

El modelo fue calibrado y validado en ambas constituciones para estados de flujo permanente en un rango de aguas bajas a altas, comprendiendo caudales entre 11640 m<sup>3</sup>/s hasta 28600

m<sup>3</sup>/s. Los caudales empleados en las simulaciones corresponden a caudales aforados por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH, 2004 y 2006) y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en la estación Paraná-Timbúes. El parámetro de calibración considerado fue el coeficiente de rugosidad de Manning  $\eta$  y las variables hidráulicas contrastadas fueron los niveles calculados y observados en los hidrómetros de Puerto San Martín (PSM, km 448) y Rosario (ROS, km 416). Asimismo, se realizaron simulaciones en flujo impermanente reproduciendo la serie de niveles observada en el período 01/01/2004 al 31/12/2004 con intervalos de integración temporal igual a 5, 10 y 30 s. Para llevar a cabo estas simulaciones se contó con todos los registros diarios de caudales y niveles de los hidrómetros de PSM y ROS para el período de estudio.



**Figura 2.-** (a) Curvas de nivel digitalizadas según relevamientos de la FICH (2004) junto con las cartas náuticas del SHN; (b) Constitución del modelo M50 y MDT.

Para las simulaciones en flujo permanente, los caudales aforados fueron ingresados como condición de borde aguas arriba y la condición de borde aguas abajo se constituyó con la correspondiente altura de agua asociada al caudal entrante. Esta altura de agua se obtuvo extrapolando niveles desde el Hidrómetro de Rosario empleando la pendiente de la superficie libre calculada entre PSM y ROS para la fecha de aforo. A partir de estas simulaciones con flujo permanente se determinó una relación altura-caudal que se empleó como condición de borde aguas abajo en las simulaciones con flujo impermanente, mientras que, aguas arriba se ingresó la serie de caudales diarios aforados para el período 01/01/2004 al 31/12/2004.

El modelo fue testado respecto a su capacidad de reproducir la derivación de caudales en las cuatro bifurcaciones que presenta el tramo en estudio: 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 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). También se compararon con los caudales estimados en el trabajo de Basile et al. (2015) y Peruzzo et al. (2016). Las cuatro bifurcaciones consideradas se muestran en la Figura 1a. Además, se testó la capacidad del modelo de reproducir la distribución transversal de caudales específicos en distintas secciones transversales donde se contó con distribuciones

observadas en mediciones de campo con ADCP realizadas también por la FICH en el período noviembre-diciembre 2004 y febrero-marzo 2006 (FICH, 2006).

## EVALUACIÓN DE RESULTADOS

### Simulaciones en flujo permanente

En flujo permanente, el rango de valores del coeficiente de rugosidad de Manning que proporcionó el mejor ajuste en términos de niveles estuvo comprendido entre 0.023 para aguas bajas y 0.022 para aguas altas para la constitución M100, mientras que, para la constitución M50 estuvo entre 0.025 y 0.024 respectivamente. El error relativo porcentual entre niveles observados y simulados se acota en 2.29 % para M100, siendo el valor medio 0.61 %. Mientras que para M50 resulta 2.07 % y 0.59 % respectivamente. Los niveles calculados se encuentran dentro del entorno de variación obtenido a partir de caudales y niveles aforados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación en la estación Paraná-Timbúes en el período 2000-2016. Respecto al coeficiente de rugosidad hallado en la calibración para la constitución M100 se evidencia que ha resultado un 8 % inferior a los hallados en la constitución M50, hecho vinculado con el tamaño de grilla adoptado en cada una. En la Tabla 1 se muestra una síntesis de los parámetros observados y calculados para cada simulación para la constitución M100 y en la Tabla 2 para la constitución M50.

**Tabla 1.- Niveles Observados, Calculados y Errores porcentuales para constitución M100.**

Fecha	Q [m <sup>3</sup> /s]	z <sub>w</sub> [m] IGN observado (z <sub>wo</sub> )		η [s/m <sup>1/3</sup> ]	z <sub>w</sub> [m] IGN calculado (z <sub>wc</sub> )		E <sub>r</sub> = 100  (z <sub>wc</sub> /z <sub>wo</sub> )-1  [%]	
		PSM	ROS		PSM	ROS	PSM	ROS
31/08/2001	11640	5.17	4.46	0.023	5.21	4.46	0.70	0.09
21/02/2006	14310	6.05	5.23	0.023	6.08	5.22	0.55	0.17
09/06/2005	17490	7.12	6.23	0.023	7.19	6.23	1.01	0.02
21/12/2004	19570	7.92	6.93	0.023	7.92	6.91	0.05	0.23
02/04/2003	22740	8.59	7.52	0.023	8.69	7.55	1.18	0.37
16/08/1982	26760	9.16	8.03	0.022	9.37	8.05	2.29	0.22
04/01/1983	28600	9.98	8.85	0.022	10.13	8.87	1.50	0.17

**Tabla 2.- Niveles Observados, Calculados y Errores porcentuales para constitución M50.**

Fecha	Q [m <sup>3</sup> /s]	z <sub>w</sub> [m] IGN observado (z <sub>wo</sub> )		η [s/m <sup>1/3</sup> ]	z <sub>w</sub> [m] IGN calculado (z <sub>wc</sub> )		E <sub>r</sub> = 100  (z <sub>wc</sub> /z <sub>wo</sub> )-1  [%]	
		PSM	ROS		PSM	ROS	PSM	ROS
31/08/2001	11640	5.17	4.46	0.025	5.18	4.47	0.19	0.22
21/02/2006	14310	6.05	5.23	0.025	6.07	5.24	0.33	0.19
09/06/2005	17490	7.12	6.23	0.025	7.18	6.25	0.84	0.32
21/12/2004	19570	7.92	6.93	0.025	7.90	6.93	0.25	0.01
02/04/2003	22740	8.59	7.52	0.025	8.68	7.56	1.05	0.53
16/08/1982	26760	9.16	8.03	0.024	9.35	8.07	2.07	0.50
04/01/1983	28600	9.98	8.85	0.024	10.12	8.88	1.40	0.34

Además en la Figura 3 se muestran los perfiles de la superficie libre del agua calculados sobre el eje del canal de navegación conjuntamente con los niveles observados en ROS y PSM, para

cada escenario estudiado y el perfil de fondo para la constitución M100, mientras que para la constitución M50 se presentan en la Figura 4.

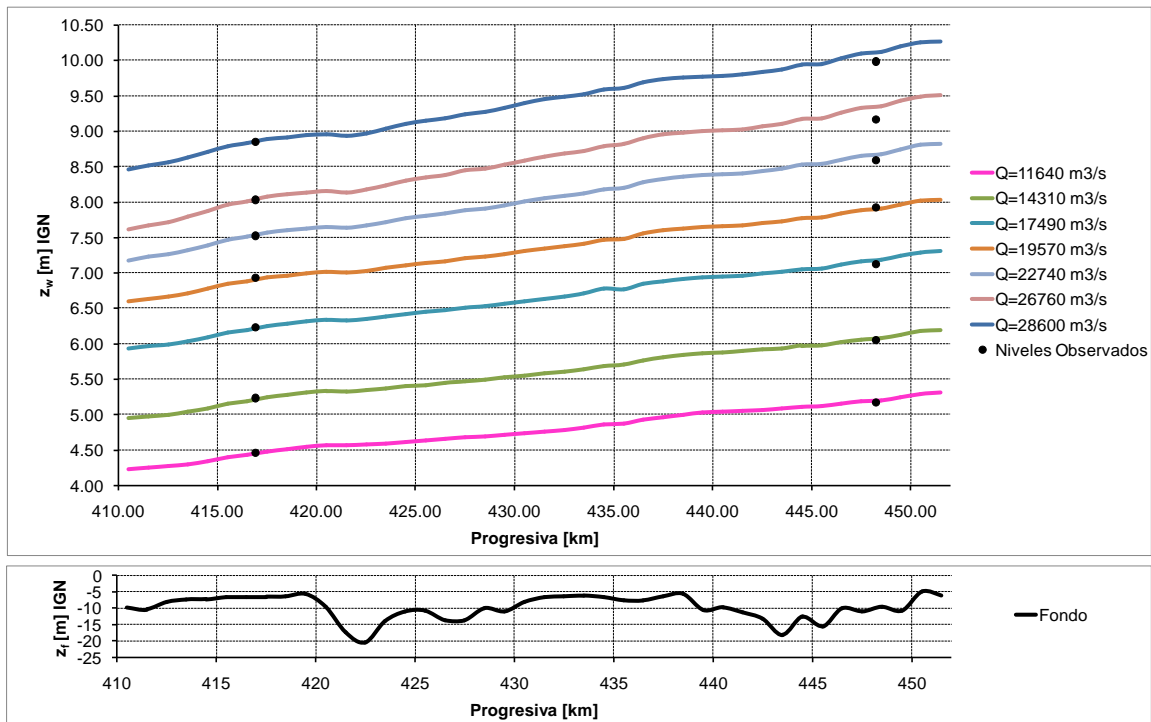


Figura 3.- Niveles Observados, perfiles de Superficie Libre Calculados sobre eje canal de navegación y perfil del fondo para la constitución M100.

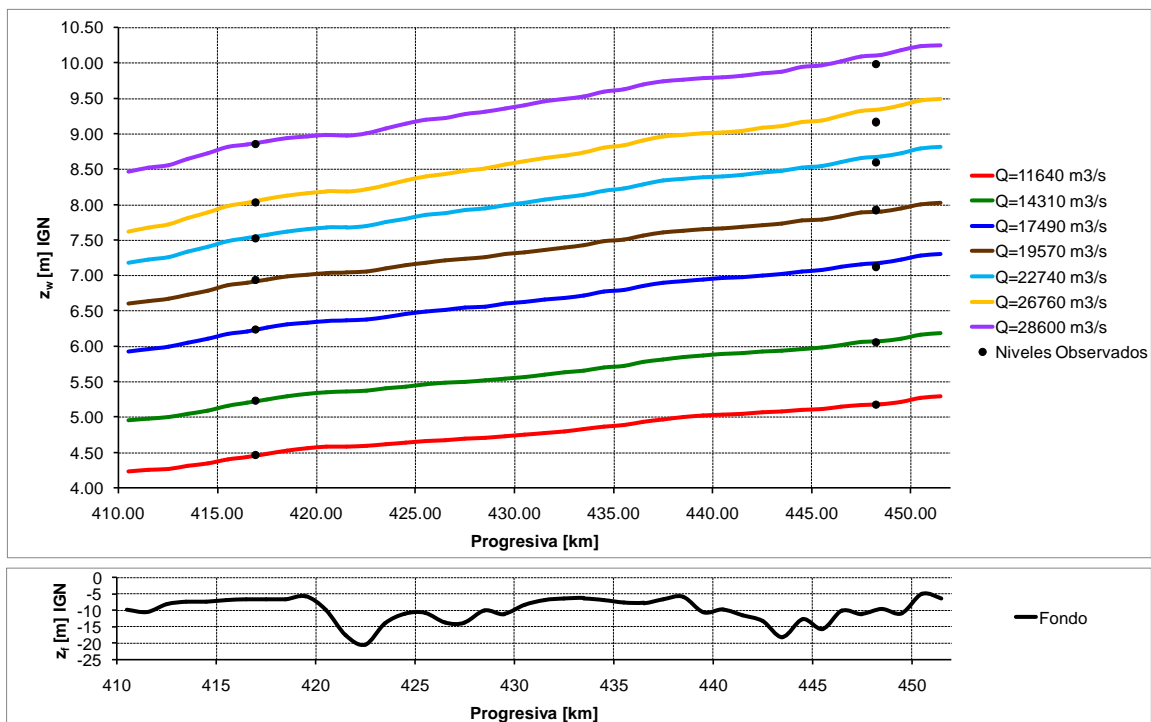


Figura 4.- Niveles Observados, perfiles de Superficie Libre Calculados sobre eje canal de navegación y perfil del fondo para la constitución M50.

A los efectos de estudiar la capacidad de distribuir los caudales en las cuatro bifurcaciones que presenta el tramo de río en estudio, se procedió en primera instancia a estimar los

caudales derivados en las distintas secciones para cada uno de los 7 escenarios de flujo permanente simulados para cada constitución. Estas secciones, que se indican en la 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 3 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 simulación para la constitución M100. En la Tabla 4 se presentan los resultados para la constitución M50. Se observa que para ambas constituciones en las secciones correspondientes a los km 449, 440 y 436 el porcentaje del caudal total derivado por el brazo derecho es superior para aguas bajas que para aguas altas, mientras que en la sección correspondiente al km 416.5 este porcentaje es similar para ambos estados. En las cuatro secciones analizadas el brazo derecho corresponde al curso principal.

**Tabla 3.-** Porcentaje del caudal total Q derivado por BD y BI en las bifurcaciones para cada simulación - Constitución M100.

Fecha	Q [m <sup>3</sup> /s]	Bifurcación 1		Bifurcación 2		Bifurcación 3		Bifurcación 4	
		BD (%)	BI (%)	BD (%)	BI (%)	BD (%)	BI (%)	BD (%)	BI (%)
31/08/2001	11640	83.91	16.09	95.07	4.93	66.55	33.45	73.79	26.21
21/02/2006	14310	81.21	18.79	92.81	7.19	65.46	34.54	73.07	26.93
09/06/2005	17490	79.22	20.78	92.08	7.92	64.28	35.72	72.85	27.15
21/12/2004	19570	78.17	21.83	91.70	8.30	63.50	36.50	72.97	27.03
02/04/2003	22740	77.05	22.95	91.27	8.73	62.66	37.34	73.13	26.87
16/08/1982	26760	76.20	23.80	90.99	9.01	61.99	38.01	73.31	26.69
04/01/1983	28600	74.73	25.27	90.60	9.40	61.50	38.50	73.75	26.25

**Tabla 4.-** Porcentaje del caudal total Q derivado por BD y BI en las bifurcaciones para cada simulación - Constitución M50.

Fecha	Q [m <sup>3</sup> /s]	Bifurcación 1		Bifurcación 2		Bifurcación 3		Bifurcación 4	
		BD (%)	BI (%)	BD (%)	BI (%)	BD (%)	BI (%)	BD (%)	BI (%)
31/08/2001	11640	83.13	16.87	94.33	5.67	65.88	34.12	73.42	26.58
21/02/2006	14310	80.93	19.07	93.10	6.90	65.07	34.93	72.80	27.20
09/06/2005	17490	78.86	21.14	92.25	7.75	64.02	35.98	72.63	27.37
21/12/2004	19570	77.62	22.38	91.75	8.25	63.39	36.61	72.88	27.12
02/04/2003	22740	76.39	23.61	91.39	8.61	62.73	37.27	73.15	26.85
16/08/1982	26760	75.44	24.56	91.01	8.99	62.25	37.75	73.44	26.56
04/01/1983	28600	74.33	25.67	90.51	9.49	61.63	38.37	73.87	26.13

Los caudales aforados por FICH (2004 y 2006) en las bifurcaciones corresponden a caudales distintos a los empleados en las simulaciones para la etapa de calibración. Para poder determinar los valores a comparar con los aforos, se procedió a ajustar relaciones lineales entre caudal total Q simulado versus los respectivos valores de porcentaje de caudal derivado por cada brazo en cada bifurcación. Una vez halladas estas relaciones se obtuvieron los porcentajes en función de los caudales aforados para luego calcular los errores relativos de su comparación con los porcentajes observados. Dado que se dispone de dos aforos por cada bifurcación, se estableció también un promedio de los valores absolutos de los errores porcentuales (PVAEP) para cada una. Para completar el análisis se contrastaron también los porcentuales de derivación con los que arroja los trabajos de modelación de Basile et al. (2015) y Peruzzo et al. (2016). En la Tabla 5 se presentan los resultados de las comparaciones realizadas en el brazo derecho para cada bifurcación para ambas constituciones. Se observa que el modelo distribuye adecuadamente los caudales en las bifurcaciones que presenta el



tramo de río en estudio para ambas constituciones. Analizando caudales observados y aforados se aprecia que el valor del error relativo máximo se acota en 5.01 % para la constitución M100 y 5.22 % para la constitución M50. El valor medio de los errores relativos porcentuales entre porcentajes de caudales derivados por el brazo derecho observados y modelados es de 2.74 % para la constitución M100 y de 2.12 % para la modelación M50. Se concluye que los valores se consideran aceptables. En lo que respecta a la comparación con los resultados obtenidos por Basile et al. (2015) y Peruzzo et al. (2016), que emplean un modelo bidimensional completo y un modelo cuasi-2D respectivamente, los valores de los errores relativos obtenidos con el modelo que aquí se presenta son similares para ambas constituciones. Podemos claramente concluir que en la reproducción de la derivación de caudales los tres modelos computan valores con el mismo rango de aproximación.

**Tabla 5.-** Porcentaje del caudal total Q derivado por el brazo derecho en las bifurcaciones del tramo en estudio, contrastación con datos observados y con resultados de modelos aplicados en el tramo de estudio.

Fecha Aforo	Q (m <sup>3</sup> /s)	Bifurc.	% derivado BD			M100		M50		Peruzzo et al. (2016)		Basile et al. (2015)	
			Obs.	Calc.		E <sub>r</sub> (%)	Prom.  E <sub>r</sub>   (%)	E <sub>r</sub> (%)	Prom.  E <sub>r</sub>   (%)	Er (%)	Prom.  Er  (%)	E <sub>r</sub> (%)	Prom.  E <sub>r</sub>   (%)
				M100	M50								
30/11/04	20790	1	74.30	78.03	77.53	5.01	3.90	4.35	3.26	6.07	4.92	5.77	4.36
21/02/06	13617	1	79.40	81.61	81.12	2.79		2.17		3.77		2.93	
30/11/04	19818	2	91.20	92.50	92.15	1.43	1.14	1.04	0.76	2.30	2.01	1.38	±1.81
08/03/06	14839	2	92.70	93.50	93.15	0.86		0.48		1.73		-2.23	
02/12/04	19075	3	61.40	63.84	64.60	3.98	± 2.77	5.22	± 3.17	2.44	± 3.07	4.08	±2.36
08/03/06	14315	3	66.30	65.27	65.56	-1.55		-1.12		-3.70		-0.64	
25/11/04	16901	4	70.00	73.23	71.69	4.62	3.14	2.42	± 1.30	2.84	1.57	8.80	7.63
26/05/06	12634	4	72.00	73.20	71.86	1.66		-0.19		0.29		6.47	

A su vez, con los resultados obtenidos en las simulaciones para caudales  $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$  se calcularon las distribuciones de caudales específicos en distintas secciones transversales y se compararon con distribuciones observadas en mediciones de campo con ADCP realizadas por la FICH en el período noviembre-diciembre 2004 y febrero-marzo 2006 (FICH, 2006). En las Figuras 5 y 6 se presenta la comparación entre caudales específicos aforados con los resultados obtenidos en las simulaciones para caudales  $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$  respectivamente para ambas constituciones. La calidad del ajuste fue evaluada con el coeficiente de correlación  $R^2$  el cual quedó comprendido entre 0.74 y 0.96 para la constitución M100 y 0.77 y 0.96 para la constitución M50, demostrando una buena capacidad del modelo en reproducir las distintas distribuciones aforadas. En la Figura 1 se muestra la ubicación de las secciones transversales estudiadas que se corresponden a los km 452, 440, 429.5, 429.3, 429 y 427.3.

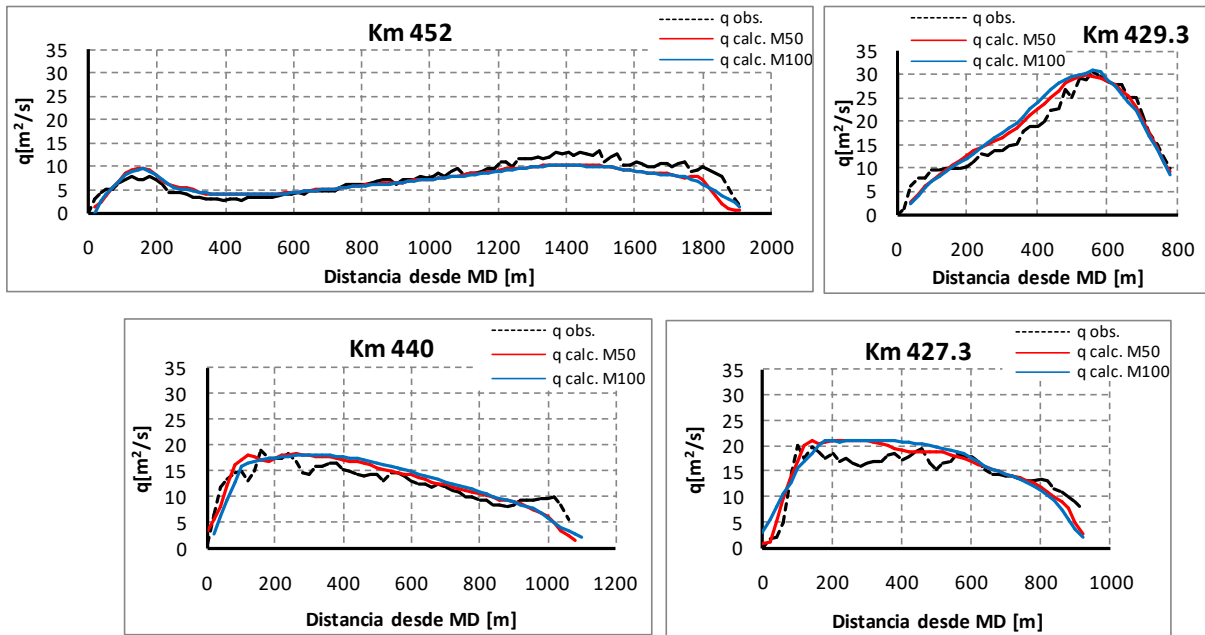


Figura 5.- Simulación  $Q=14310 \text{ m}^3/\text{s}$ . Comparación de la distribución de caudales unitarios  $q$  calculados y observados (FICH,2006) para las constituciones M100 y M50.

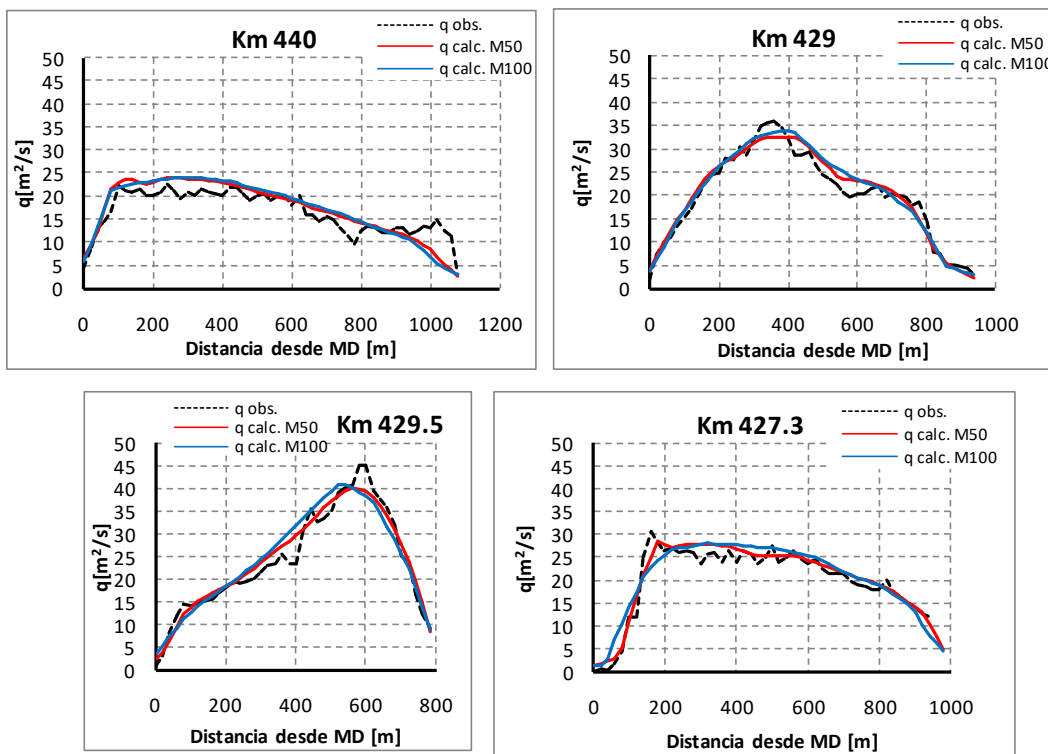


Figura 6.- Simulación  $Q=19570 \text{ m}^3/\text{s}$ . Comparación de la distribución de caudales unitarios  $q$  calculados y observados (FICH,2006) para las constituciones M100 y M50.

Simulaciones en flujo impermanente

Se realizaron simulaciones en flujo impermanente a modo de validación y recalibración de parámetros de rugosidad reproduciendo la serie de niveles observada en el período 01/01/2004 al 31/12/2004. Se realizaron simulaciones con el coeficiente de rugosidad de

Manning variando entre  $0.022 \leq \eta \leq 0.025$ . Para cuantificar la comparación de las series de niveles simuladas versus las series observadas se utilizaron los siguientes indicadores: el error típico (ET), la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) y el coeficiente de correlación  $R^2$ . En la Tabla 6 se presentan los valores de referencia para evaluar el ajuste según los distintos indicadores.

**Tabla 6.-** Valores de referencia para la evaluación de ajuste según distintos indicadores.

Condición	Error Típico ET (m)	Eficiencia de Nash-Sutcliffe NS	Coficiente de Correlación $R^2$
Muy Bueno (MB)	$\leq 0.05$	$\geq 0.75$	$\geq 0.85$
Bueno (B)	0.05-0.10	0.74-0.65	0.84-0.65
Satisfactorio (S)	0.10-0.15	0.64-0.50	0.74-0.50
Pobre (P)	$>0.15$	$< 0.50$	$<0.50$

La simulación que mejor calidad de ajuste ha alcanzado al utilizar los calificadores de errores referidos, correspondió a un coeficiente de rugosidad  $\eta=0.023$  para la constitución M100 y  $\eta=0.025$  para la constitución M50. En las Tablas 7 y 8 se muestran los valores calculados de los indicadores para estas simulaciones mientras que en las Tablas 9 y 10 se presentan las condiciones alcanzadas para cada una según la calificación adoptada. En las Figuras 7 y 8 se exponen las variaciones de niveles observadas y simuladas en los dos sitios de comparación para los tres intervalos de integración temporal para las constituciones M100 y M50 respectivamente. También, en este estado de flujo, los niveles calculados se encuentran dentro del entorno de variación obtenido a partir de caudales y niveles aforados en la estación Paraná-Timbúes.

**Tabla 7.-** Valores de indicadores de error en simulación con  $\eta = 0.023$  - Constitución M100.

Indicador	$\Delta t = 5$ s		$\Delta t = 10$ s		$\Delta t = 30$ s	
	PSM	ROS	PSM	ROS	PSM	ROS
Error Típico	0.089	0.096	0.089	0.097	0.131	0.093
NS	0.927	0.968	0.974	0.976	0.925	0.977
$R^2$	0.986	0.980	0.986	0.980	0.970	0.965

**Tabla 8.-** Valores de indicadores de error en simulación con  $\eta = 0.025$  - Constitución M50.

Indicador	$\Delta t = 5$ s		$\Delta t = 10$ s		$\Delta t = 30$ s	
	PSM	ROS	PSM	ROS	PSM	ROS
Error Típico	0.083	0.093	0.084	0.093	0.084	0.094
NS	0.959	0.973	0.955	0.973	0.966	0.974
$R^2$	0.988	0.981	0.988	0.981	0.988	0.983

**Tabla 9.-** Calificación de los errores para simulación con  $\eta = 0.023$  - Constitución M100.

Indicador	$\Delta t = 5$ s		$\Delta t = 10$ s		$\Delta t = 30$ s	
	PSM	ROS	PSM	ROS	PSM	ROS
Error Típico	B	B	B	B	S	B
NS	MB	MB	MB	MB	MB	MB
$R^2$	MB	MB	MB	MB	MB	MB

**Tabla 10.-** Calificación de los errores para simulación con  $\eta = 0.025$  - Constitución M50.

Indicador	$\Delta t = 5 \text{ s}$		$\Delta t = 10 \text{ s}$		$\Delta t = 30 \text{ s}$	
	PSM	ROS	PSM	ROS	PSM	ROS
Error Típico	B	B	B	B	B	B
NS	MB	MB	MB	MB	MB	MB
R2	MB	MB	MB	MB	MB	MB

En régimen impermanente, el modelo reproduce adecuadamente las series de niveles observados en PSM y ROS. Para la constitución M100 se clasifica entre buena y muy buena la aproximación para intervalos de tiempos de cálculo de 5 y 10 s, y entre satisfactorio y muy bueno para 30 s. Mientras que, para la constitución M50 el ajuste resultó entre bueno y muy bueno, para los tres intervalos de tiempos de cálculo utilizados en las simulaciones.

Se estimó en ambas constituciones, para el entorno de tiempos de cálculo adoptado los valores máximos que toma el número de Courant (CFL) para el día que circula por el cauce principal el mayor caudal en el año simulado (18/12/2004,  $Q = 20041 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En la Tabla 11 se muestran los correspondientes valores obtenidos. La experiencia exhibe que la calidad de los resultados disminuye si este número se encuentra por encima de 7 u 8 (Lang et al., 2014), por lo que los valores se consideran aceptables.

**Tabla 11.-** CFL máximo para 18/12/2004 -  $Q = 20041 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Constitución	Tiempo de cálculo	CFL <sub>max</sub>
M100	$\Delta t = 5 \text{ s}$	0.19
	$\Delta t = 30 \text{ s}$	1.77
M50	$\Delta t = 5 \text{ s}$	0.39
	$\Delta t = 30 \text{ s}$	2.34

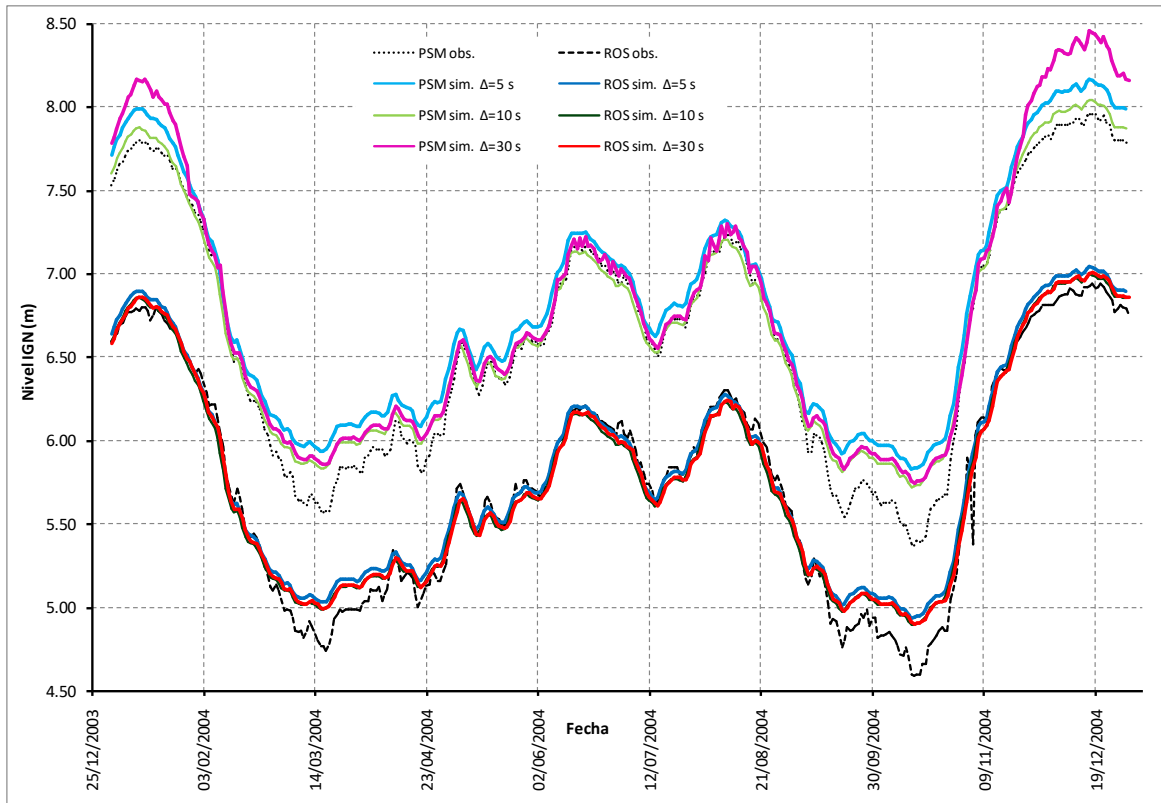


Figura 7.- Perfiles de superficie libre observados y simulados para serie 01/01/2004 al 31/12/2004 - Constitución M100.

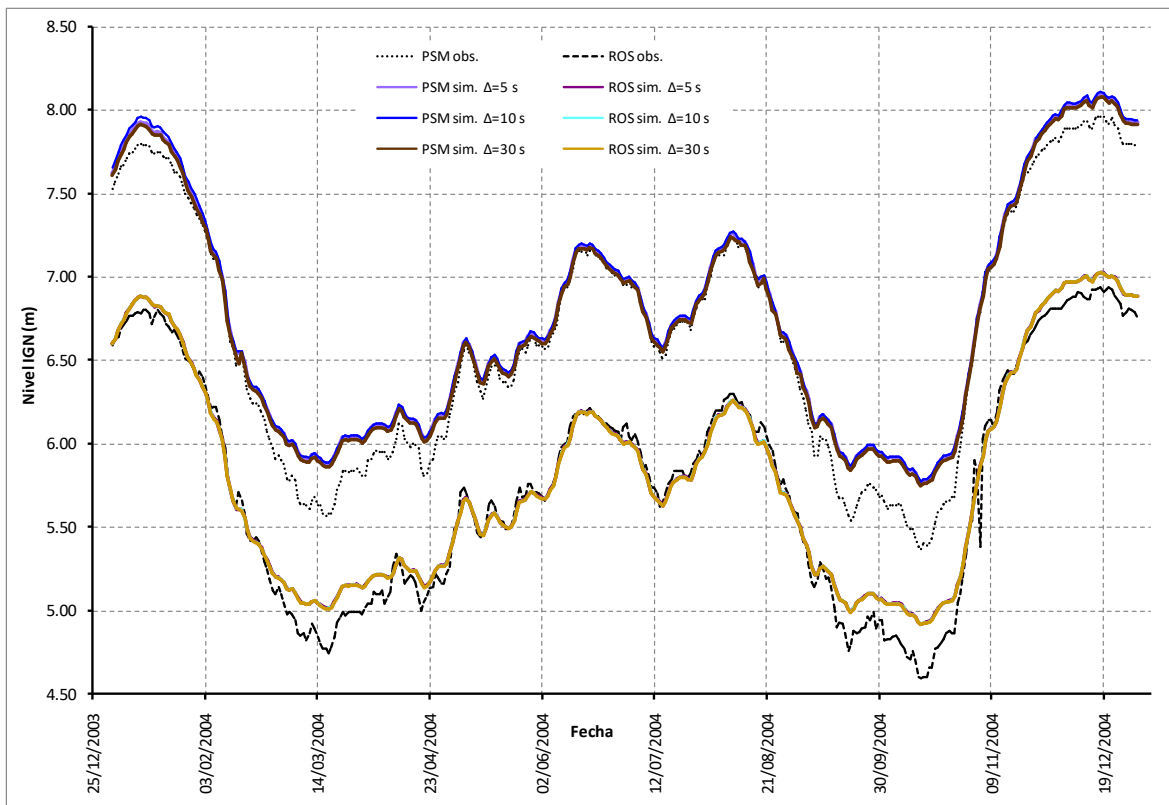


Figura 8.- Perfiles de superficie libre observados y simulados para serie 01/01/2004 al 31/12/2004 - Constitución M50.

CONCLUSIONES

El modelo bidimensional TELEMAC-2D fue implementado para simular la hidrodinámica en régimen permanente e impermanente de un tramo del río Paraná Inferior que abarca desde el km 452 hasta el km 410 de la ruta de navegación troncal Santa Fe – Océano. A partir del grado de aproximación obtenido entre niveles y caudales observados versus simulados se concluye que los resultados han sido aceptables, lográndose reproducir en forma satisfactoria niveles hidrométricos en dos puntos de contrastación, caudales específicos en 6 secciones transversales del dominio y derivación de caudales en 4 bifurcaciones del tramo. En lo que respecta al tamaño de la grilla, se observa que los resultados alcanzados para ambas constituciones presentan diferencias poco significativas. En vistas a que las diferencias de los niveles simulados para el entorno de intervalos de cálculo examinados no son relevantes y teniendo en consideración un menor gasto computacional se considera adecuado la utilización del máximo  $\Delta t = 30$  s, habiéndose constatado una performance de resultados calificados como satisfactorios o superiores.

*Agradecimiento.* Los autores desean expresar su agradecimiento a la UNR por el apoyo brindado en el marco de los PID IING509 Y IING514 y a la DNVN-DPI por los datos topobatimétricos e hidrológicos facilitados.

#### LISTA DE SÍMBOLOS

$h$ (m)	profundidad de flujo
$u$ (m/s)	velocidad media en vertical en dirección x
$v$ (m/s)	velocidad media en vertical en dirección y
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	aceleración de la gravedad
$v_t$ (m <sup>2</sup> /s)	coeficiente de difusión
$Z$ (m)	nivel de la superficie libre
$t$ (s)	tiempo
$x,y$ (m)	coordenadas horizontales espaciales
$S_h$ (m/s)	Fuente o sumidero en la ecuación de continuidad
$S_x,S_y$ (m/s <sup>2</sup> )	Fuente o sumidero en las ecuaciones de cantidad de movimiento
$\vec{\nabla}$	Gradiente
$div$	Divergencia
$\eta$	Coefficiente de rugosidad de Manning

#### 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.

**CHC-NRC - Canadian Hydraulics Centre-National Research Council (2011).** *Blue Kenue, Reference Manual.*

**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.* FICH, UNL.

**FICH (2006).** *Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de la Invernada. Informe final.* FICH, 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.

**Lang, P., Desombre, J., Ata, R., Goeury, C., Hervouet, J.M. (2014).** *TELEMAC-2D Software, User Manual.*

**Peruzzo, F., Riccardi, G., Basile, P.A. (2016).** " Modelación cuasi-bidimensional de escurrimiento superficial en cauce principal del tramo Paraná inferior km 410-452", *Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos IFRH2016*, Ezeiza, Argentina.

**SAyDS - Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable (2013).** *Inventario de los humedales de Argentina: Sistemas de paisajes de humedales del Corredor Fluvial Paraná-Paraguay*, Proyecto GEF 4206 - PNUD ARG/10/003, 1° Edición, Buenos Aires, Argentina.

**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>

**Singh, V.P. y Woolhiser, D.A. (2002).** "Mathematical Modeling of Watershed Hydrology", *Journal of Hydrologic Engineering*, 7 (4), pp. 270–292.