

Estudio de la dinámica superficial de la red de canales del Delta Medio del río Paraná

Martín Sabarots Gerbec

Instituto Nacional del Agua

msabger@gmail.com

RESUMEN:

El área geográfica comprendida entre la ciudad de Diamante (Entre Ríos) y las proximidades de la desembocadura del río Paraná en el Río de la Plata es comúnmente conocida como Delta Medio. Dentro de este marco se encuentra una vía fluvial comercial estratégica para Argentina y países limítrofes e importantes actividades agrícola-ganadera-forestal desarrolladas en la zona de islas. Dada la singular geomorfología del Delta del río Paraná, vastas áreas productivas quedan expuestas a frecuentes inundaciones.

Por lo expuesto, resulta de particular interés la aplicación de una herramienta simple, que permita conocer la dinámica del escurrimiento en el Delta Medio, para comprender la interacción entre los principales cursos de agua.

Para dar respuestas a requerimientos técnicos del INA e INTA, se aplicó un modelo hidrodinámico unidimensional de la red de canales que busca representar las principales características geométricas e hidráulicas del sistema. El software empleado es el reconocido HEC-RAS (USACE).

El alcance de la modelación es limitado ya que se dispone de información de entrada básica, permitiendo tener una idea del funcionamiento global del sistema, siendo susceptible a constantes mejoras según se incorporen datos de entrada de mayor certidumbre.

Los resultados obtenidos de la aplicación del modelo HEC-RAS, han mostrado una bondad aceptable en la representación de la variabilidad temporal de los niveles observados, para el período 2000-2012, en los puertos de Rosario, Villa Constitución, San Nicolas, Ramallo, San Pedro, Baradero, Victoria, Puerto Ruiz y Puerto Ibicuy..

OBJETIVO

El presente trabajo describe la metodología propuesta para el abordaje de la modelación hidrodinámica del Delta del Río Paraná mediante el software HEC-RAS. Basado en una modelación unidimensional de la red de canales se busca representar las principales características geométricas e hidráulicas del sistema.

El alcance de la modelación es acotado ya que se cuenta con información de entrada básica, pero permite tener una idea del comportamiento global del sistema y será susceptible a constantes mejoras según se cuente con datos de entrada de mayor certidumbre.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

La información disponible con la que se cuenta para encarar la modelación consiste:

- Modelo digital de elevación (MDE) de las planicies de inundación. Para esto se utiliza la versión 4.1 del SRTM (Figura 3.1)
- Cartas Náuticas de la ruta de navegación del Río Paraná, desde Santa Fe hasta la desembocadura en el Río de la Plata (Figura 3.2)
- Secciones transversales aisladas del modelo hidrodinámico utilizado por el Sistema de Información y Alerta Hidrológico (SIyAH) del Instituto Nacional del Agua (INA), desde Diamante hasta Villa Constitución.

Por otra parte se contó con series de nivel hidrométrico en distintos puertos que permitieron la calibración del modelo.

Metodología

Para llevar a cabo la modelación hidrodinámica del Delta se propone inicialmente la construcción de un Modelo Digital de Elevación (MDE) Topobatimétrico, integrando la información del SRTM con la de las Cartas Náuticas y batimetrías complementarias. En los cursos de agua en los que no se cuenta con información batimétrica se apela a información provista por habitantes del lugar, baqueanos y productores de la zona del Delta Medio. Con este tipo de información se pretende tener un valor aproximado de la profundidad media del curso para una condición de aguas “normales”.

A partir de la construcción del MDE Topobatimétrico es posible proponer un esquema de modelación en red de canales con secciones transversales (Figura 1) que comprendan la zona de interés y realizar “cortes” sobre el MDE para obtener la geometría trasversal del modelo.

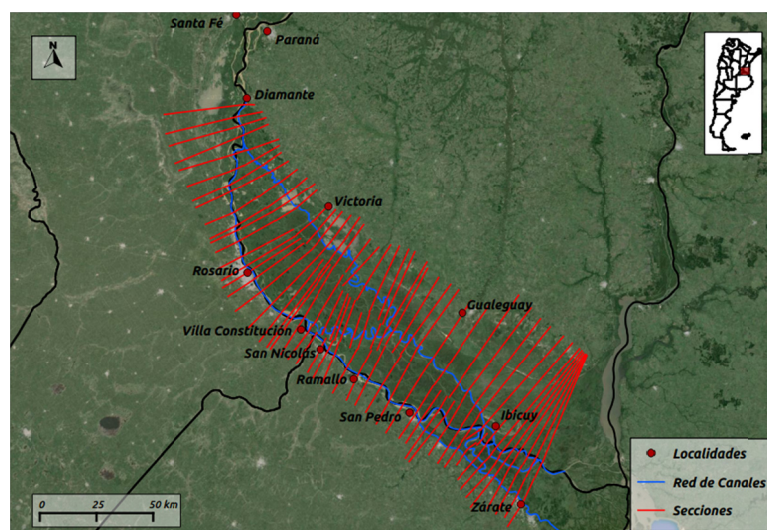


Figura 1.- Trazas de secciones con las que se corta el MDE

CONSTRUCCIÓN DEL MDE

Para la construcción del MDE se parte de la digitalización de las curvas de nivel de profundidad de todas las Cartas Náuticas disponibles para las cotas 2, 5, 10 y 20 metros. Adicionalmente se incorporaron algunos puntos acotados de profundidad.

En la Figura 2 se ilustran el proceso de construcción del MDE para las proximidades de la Vuelta de Obligado.

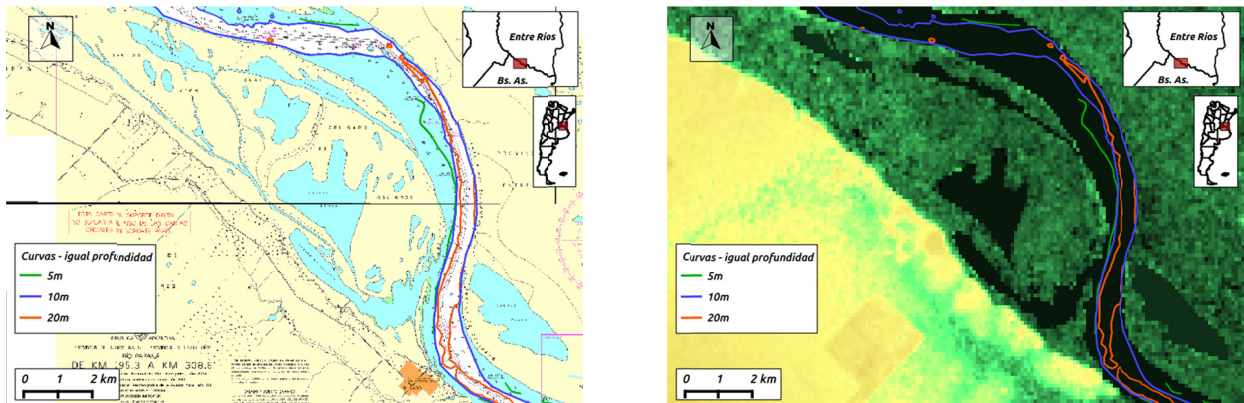


Figura 2: Digitalización de las curvas de nivel de profundidad. Carta náutica (izq.) y SRTM (der.)

Luego de la digitalización de las curvas se realiza una interpolación de los datos batimétricos lo que conforma un MDE del cauce. Posteriormente, se transforma a cotas batimétricas (IGN) para ensamblar con el SRTM.

Para la transformación de los datos de batimétrica referidos a ceros locales como profundidades, se construye una superficie que representa la cota altimétrica respecto del 0 IGN de cada cero de escala local. Esta superficie, la cual se denominara Superficie de Reducción (SupRed), se genera bajo la hipótesis de variación lineal de las cotas IGN de los ceros de escalas hidrométricas entre estaciones. De esta forma, se resta a la SupRed el MDE del cauce (relativo a los ceros locales) y se obtiene un MDE batimétrico referido a cota IGN, el cual es compatible con el SRTM. Un ensamblaje final permite la construcción de un MDE Topobatimétrico, base de las secciones geométricas del Modelo Hidrodinámico, Figura 3.

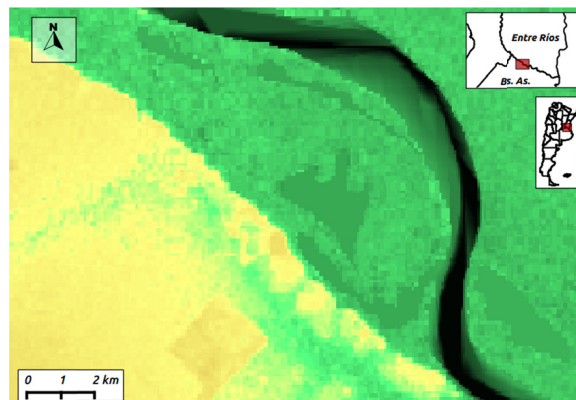


Figura 3: MDE Topobatimétrico – Vuelta de Obligado

MODELO HIDRODINÁMICO

La red de canales propuesta incluye la rama principal del Paraná y la rama del río Victoria. El Paraná Pavón surge como una bifurcación del Paraná aguas arriba de Villa Constitución y cruza el Delta, de sur a norte, para confluir con el Victoria dando lugar al Ibicuy. Los tramos finales (hacia la desembocadura) incluyen el Paraná Guazú (junto con el Talavera) y el Paraná de las Palmas, con cierre en Canal Nuevo y Zarate respectivamente (Figura 4), coincidente aproximadamente con la traza del puente Zarate-Brazo Largo.



Figura 4: Topología de la red de canales adoptada

Como se dijo anteriormente, las secciones transversales son construidas a partir del MDE, del cual se obtienen las elevaciones topobatemétricas a lo largo de las diferentes transectas que se muestran en la Figura 5. Las secciones fueron trazadas de manera que el espaciamiento entre ellas fuera aproximadamente 10km. Además, dado que el área de estudio esta esquematizado bajo dos grandes filamentos, al norte: Victoria, Ibicuy y Paraná Guazú, al sur: Paraná Inferior, Paraná de las Palmas, se buscó que las secciones abarquen el ancho de todo el Delta Medio.

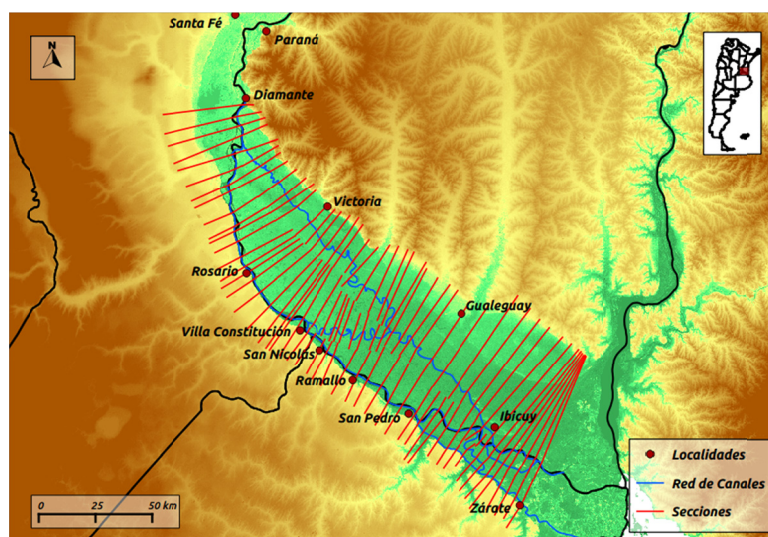


Figura 5: Topología de la red de canales adoptada y secciones propuestas

Para el tramo del río Victoria, donde no se definió una batimetría en la construcción del MDE por falta de datos, se supuso una sección de cauce de ancho constante y pendiente longitudinal uniforme. Dichas características resultan de un proceso iterativo durante la instancia de calibración.

Para la construcción de la geometría en el formato requerido por el HEC-RAS se utilizó un programa desarrollado por el Ing. Juan Giacosa (SIyAH del INA) que permite traducir la información procesada en GIS.

Además de la geometría, también es necesario indicar la rugosidad de cauce y planicie, la cual está directamente asociada a la resistencia hidráulica del escurrimiento. Para esto se asignan valores al coeficiente de Manning n según sea cauce o planicie siguiendo la literatura.

En cuanto a los forzantes del sistema se contó con series de niveles diarios aguas abajo Zarate y Canal Nuevo (Figura 6) y con caudales aguas arriba, en Diamante (Figura 7). Adicionalmente se ingresó como el aporte lateral el caudal del río Gualeguay (Figura 8). Todos los datos fueron provistos por el SIyAH del INA.

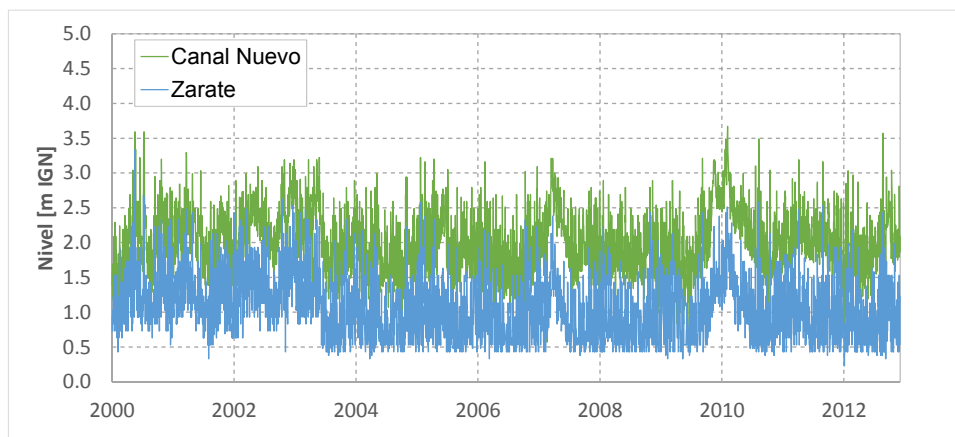


Figura 6: Serie de niveles en Zarate y Canal Nuevo

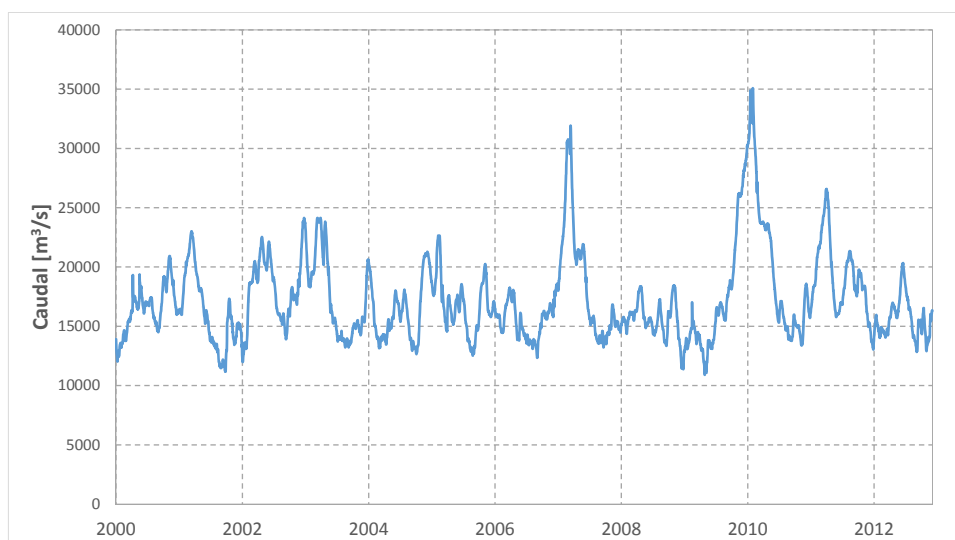


Figura 7: Serie de caudales y niveles en Diamante

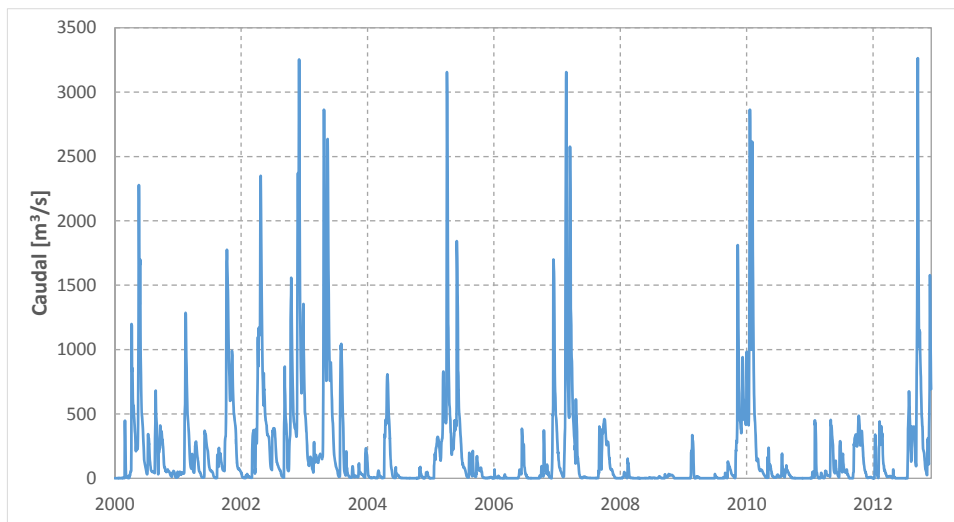


Figura 8: Serie de caudales del río Gualeguay a la altura de Rosario del Tala

CALIBRACIÓN

Como se indicó anteriormente, las variables de ajuste resultan:

- Coeficiente de Manning, n
- Donde los datos son pobres o inexistentes, como es el caso de Victoria – Pavón – Ibicuy, se realizaron ajustes sobre la sección de cauce

El caso del río Victoria tuvo un tratamiento particular, dado a que el agua que llega a las lagunas no lo hace por un único punto de bifurcación (García, 2012), como está representado en el modelo fue necesario controlar el volumen de agua ingresante en esa rama de manera que los niveles de cada rama (Victoria y Paraná) sean consistentes con los registrados. Para eso se modificó las profundidades de cauce de la primera sección del tramo Victoria de modo de controlar el volumen de agua.

Como valor de arranque se adoptó un $n = 0,022$, correspondiente, según la literatura a cursos de agua mayores con secciones regulares y $n = 0,2$ correspondiente a zona de forestación tupida.

El periodo de calibración comprende una ventana de tiempo que cuenta con condiciones hidrológicas variadas y permite el ajuste para caudales altos, medios y bajos. Se tomó el periodo 2000-2012.

Las estaciones hidrométricas donde se contrastó lo observado versus lo simulado se presentan en la Tabla 1. Los ceros de escala de las reglas fueron obtenidos de la Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables, con excepción de Victoria y Puerto Ruiz, cuya información fue provista por el Sistema de Información y Alerta Hidrológico del INA (SIyAH). En la Figura 9 se puede ver la disposición geográfica de las estaciones.

Tabla 1 Estaciones Hidrométricas

Estación	Río	Cero [IGN m]	Progresiva [km]
Rosario	Paraná	3,600	227,8
Villa Constitución	Paraná	2,684	193
San Nicolás	Paraná	2,468	179,1
Ramallo	Paraná	2,063	152,2
San Pedro	Paraná	1,450	107,4
Baradero	Baradero	1,712	86,7
Victoria*	Victoria	2,221	83
Puerto Ruiz**	Guauguay	0,898	65
Puerto Ibicuy**	Ibicuy	1,669	0

* Se refiere a la progresiva relativa, con cero en la confluencia Pavón-Victoria (cabecera del Ibicuy)

** Se refiere a la progresiva relativa, con cero en la confluencia Ibicuy-Paraná Guazú

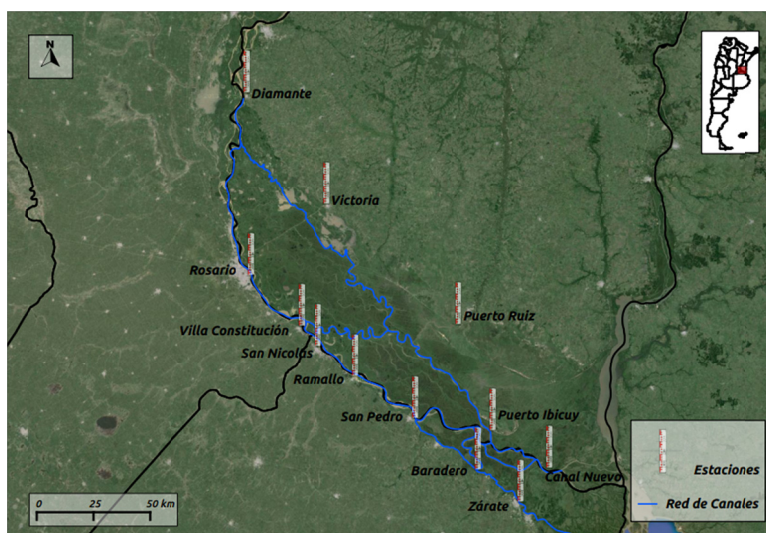


Figura 9: Ubicación de escalas hidrométricas

Como resultado de la calibración se muestran las series de niveles simulados y observados en la Figura 10. En general se observa un acuerdo aceptable.

En lo que respecta al brazo Paraná, desde Diamante hasta Villa Constitución lo simulado y observado resulta altamente compatible. A partir de San Nicolás se comienzan a ver diferencias más marcadas siendo siempre por exceso de los niveles simulados excepto en Baradero, donde la tendencia se revierte.

En el tramo Victoria, se destaca que en la media los niveles resultan compatibles, sin embargo se aprecia una marcada amortiguación de la onda.

Los resultados en Puerto Ruiz deben ser interpretados con el debido cuidado. Los niveles observados se registran sobre el río Guauguay a unos 40 km de la confluencia con el río Ibicuy y los resultados simulados corresponden a la progresiva aguas abajo de dicha confluencia. Si bien las bajas pendientes permiten suponer que el remanso es dominante, en los periodos de crecida del Guauguay se ven las mayores diferencias.

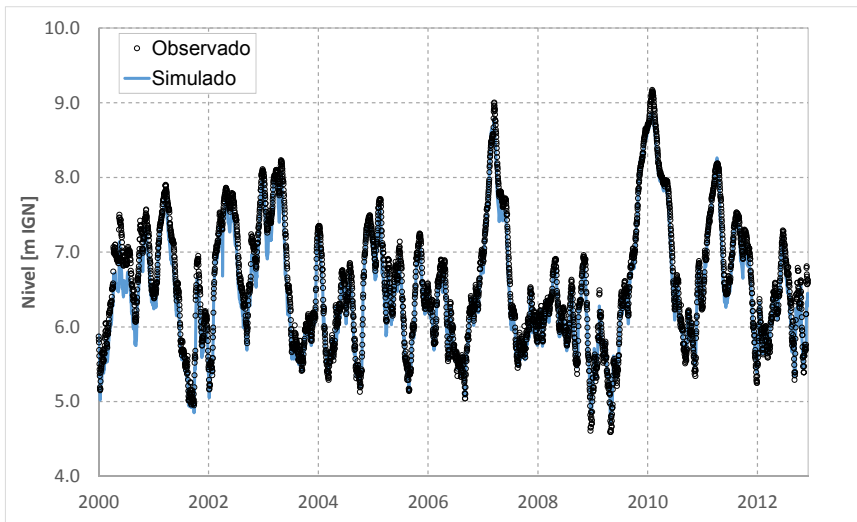


Figura 10.a: Serie de niveles simulados y observados en Rosario

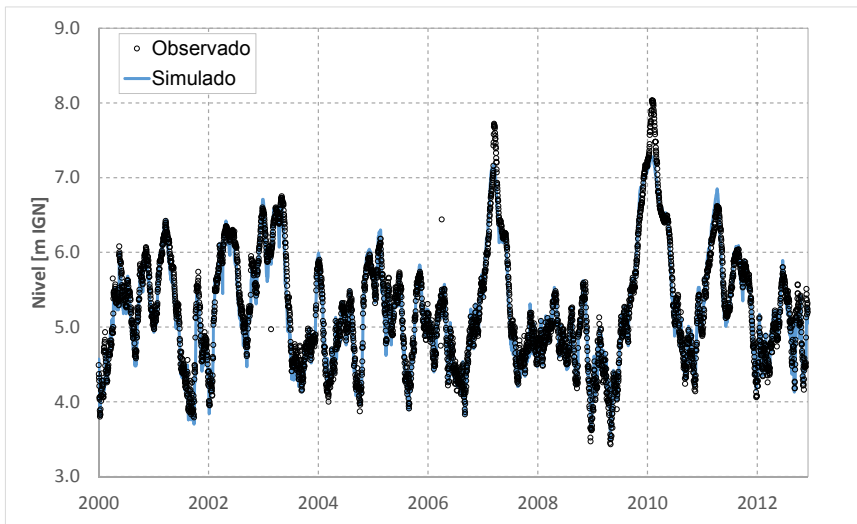


Figura 10.b: Serie de niveles simulados y observados en Villa Constitución

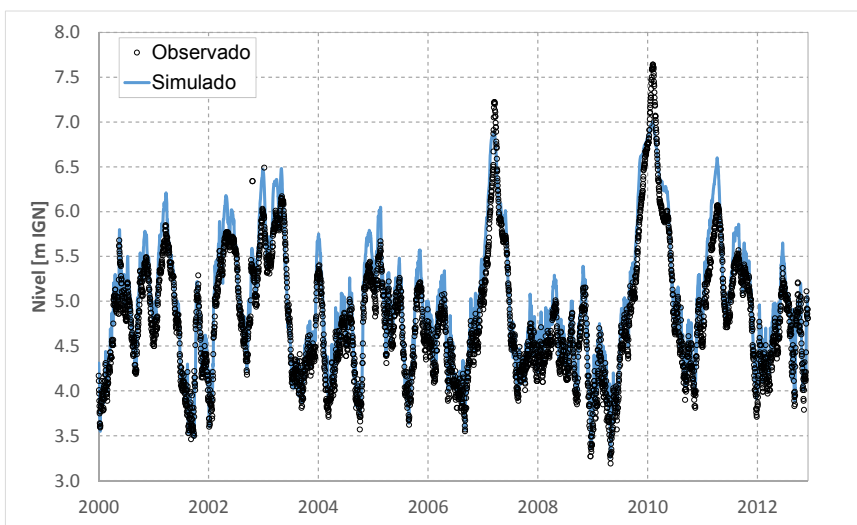


Figura 10.c: Serie de niveles simulados y observados en San Nicolás

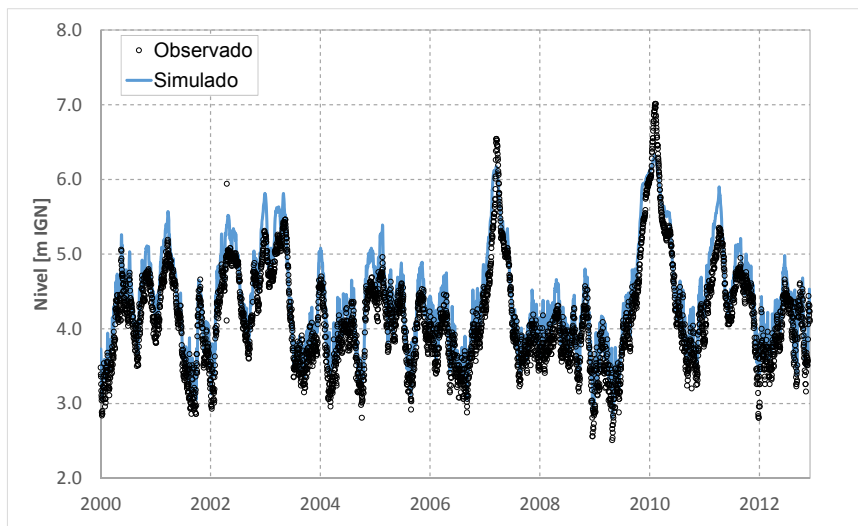


Figura 10.d: Serie de niveles simulados y observados en Ramallo

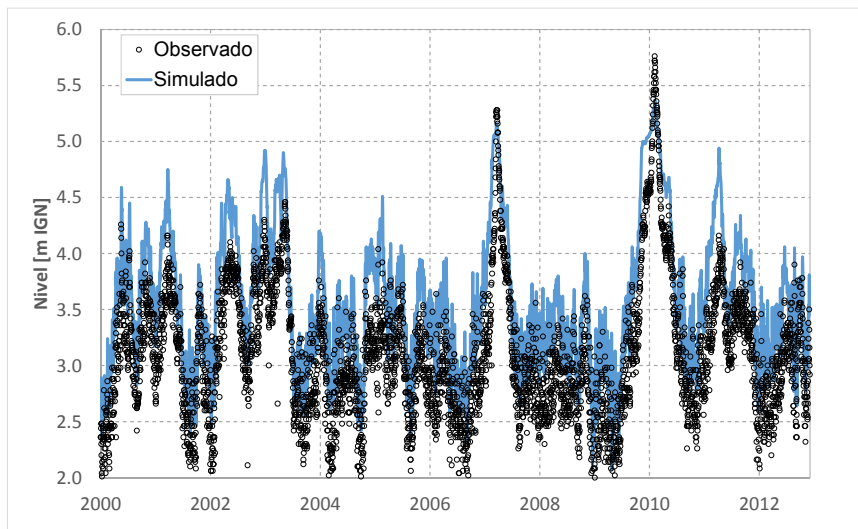


Figura 10.e: Serie de niveles simulados y observados en San Pedro

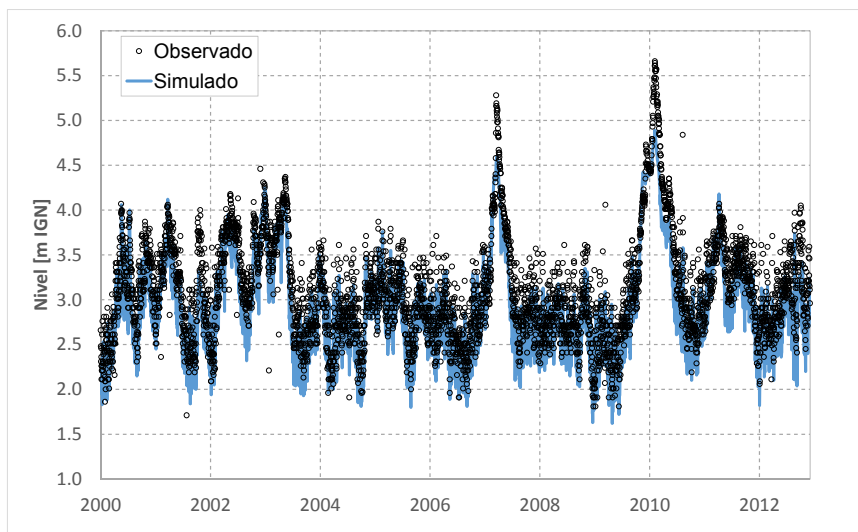


Figura 10.f: Serie de niveles simulados y observados en Baradero

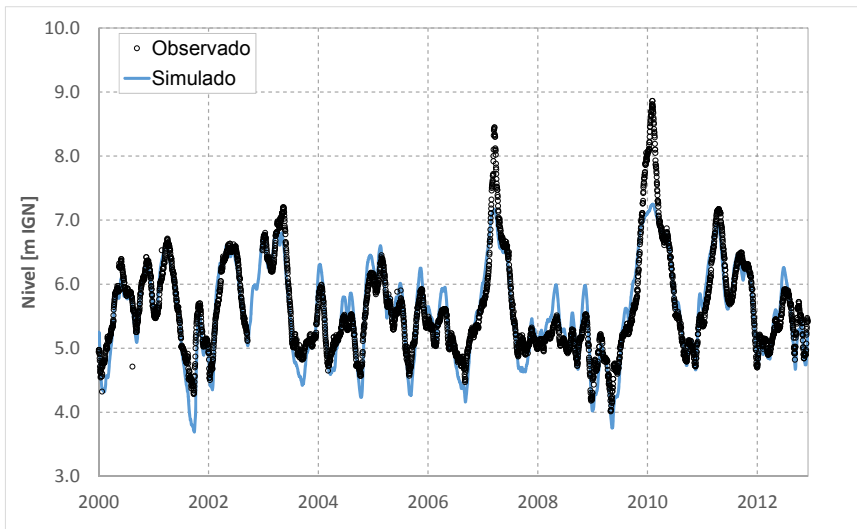


Figura 10.g: Serie de niveles simulados y observados en Victoria

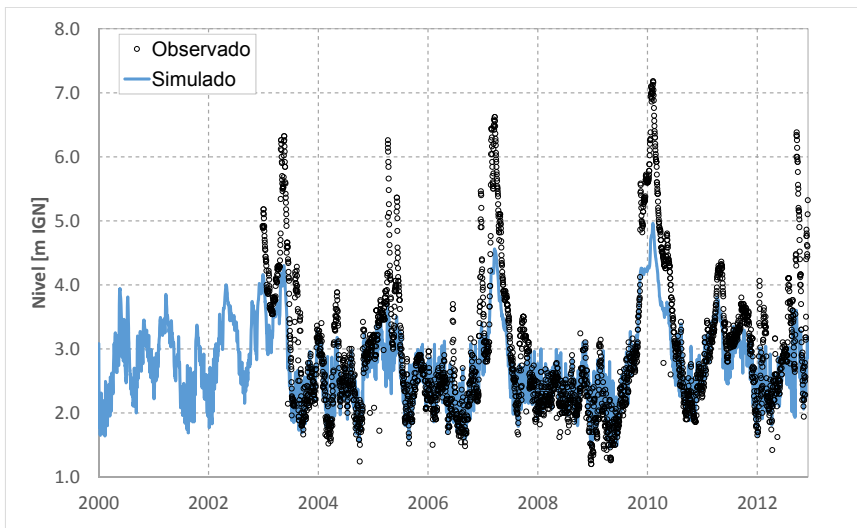


Figura 10.h: Serie de niveles simulados y observados en Puerto Ruiz

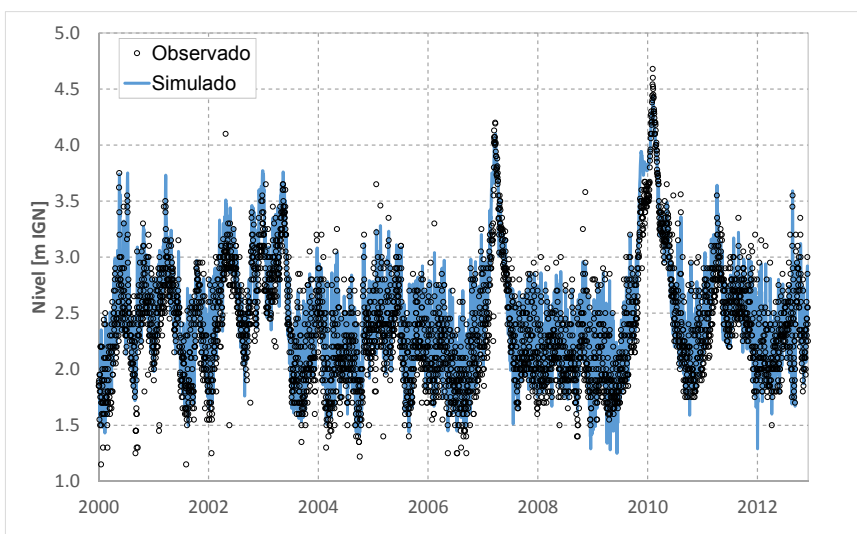


Figura 10.i: Serie de niveles simulados y observados en Puerto Ibicuy

Figura 10: Serie de niveles simulados y observados para las distintas estaciones hidrométricas

EVALUACIÓN DE ERRORES

A fin de comprender las limitaciones del modelo hidrodinámico, se efectuó una evaluación de los errores entre los niveles simulados y los observados. En primer lugar se grafican los errores en función de los niveles simulados, Figura 11. Posteriormente se evaluó de forma global la performance del modelo en función de ciertos indicadores de ajuste.

En lo que respecta a los errores en función del nivel (definido como el $N_{\text{simulado}} - N_{\text{observado}}$), se pueden observar distintos comportamientos según el tramo en estudio:

- Diamante - Villa constitución: se cuenta con la estación en Rosario, donde los errores quedan acotados entre +0,25m y -0,50m, con una clara tendencia del modelo a subestimar los niveles.
- Villa Constitución - San Pedro: los errores están en el rango +/- 0,50m, para el primer tramo, pero progresivamente van sesgando hacia 0,0-1,0m, en San Pedro. Esto implica que además de sobreestimar los niveles en este tramo, hacia aguas abajo la tendencia se acentúa. Por otra parte se observa un cambio de tendencia para niveles mayores a lo largo de todo el tramo.
- Cercano a Baradero: la tendencia de sobreestimación de los niveles se revierte y los errores se acotan entre -0.75 y +0.25.
- Tramo Victoria: si bien el rango de variación medio del error se encuentre entre +/- 0,50m, para estiaje y crecidas se aprecian sensibles diferencias. Esto resulta esperable teniendo en cuenta la inexistencia de datos confiables para este tramo.
- Puerto Ruiz: teniendo en cuenta que se compara con niveles de una estación ubicada sobre el Gualeguay, es de esperar diferencias en las crecidas, como se ve. Para condiciones medias los errores quedan acotados en +/- 0,50m.
- Ibicuy – desembocadura: los niveles se encuentran fuertemente controlados por la condición de borde de aguas abajo. Los errores quedan acotados en +/- 0,50m.

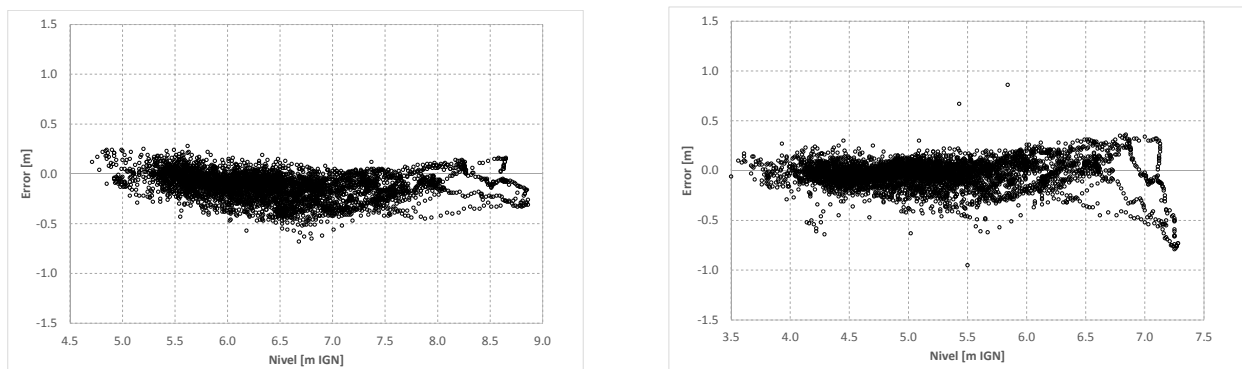


Figura 11.a: Errores entre lo observado y lo simulado. Rosario (izq.) y Villa Constitución (der.)

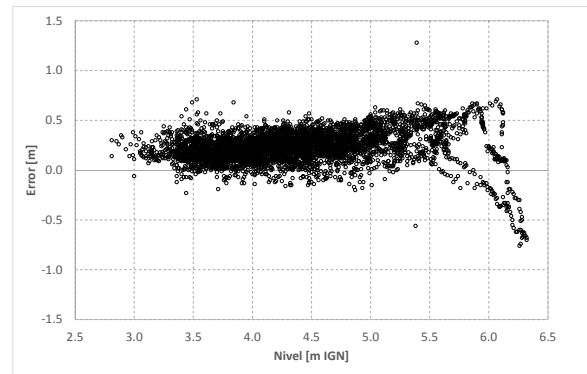
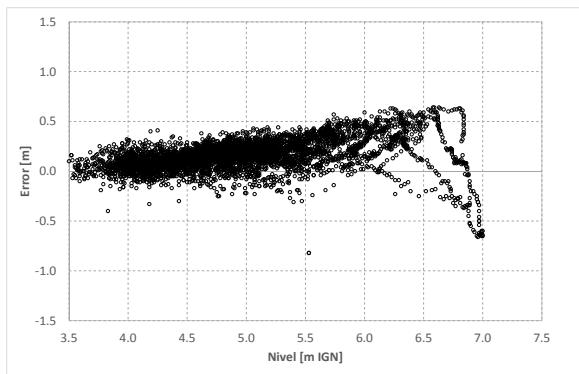


Figura 11.b: Errores entre lo observado y lo simulado. San Nicolás (izq.) y Ramallo (der.)

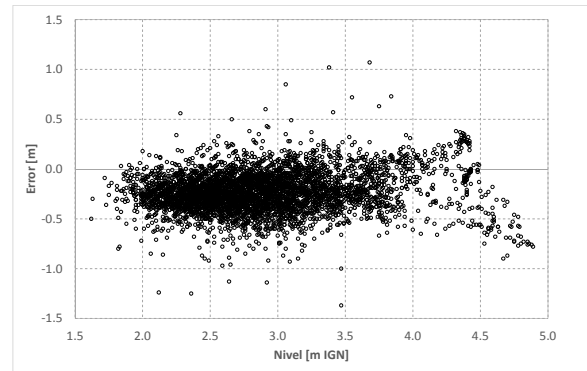
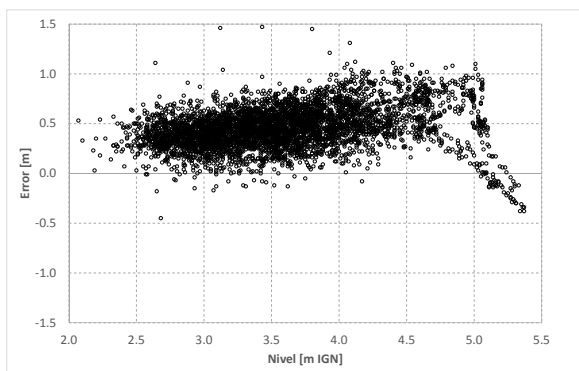


Figura 11.c: Errores entre lo observado y lo simulado. San Pedro (izq.) y Baradero (der.)

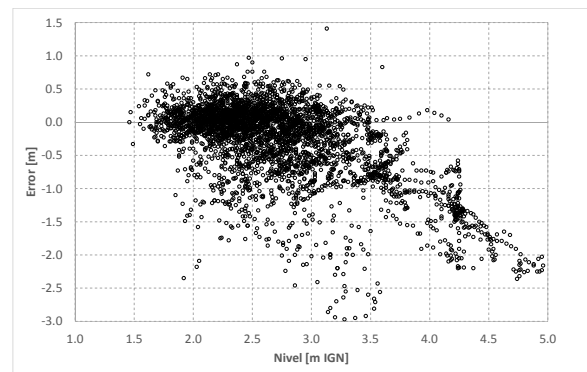
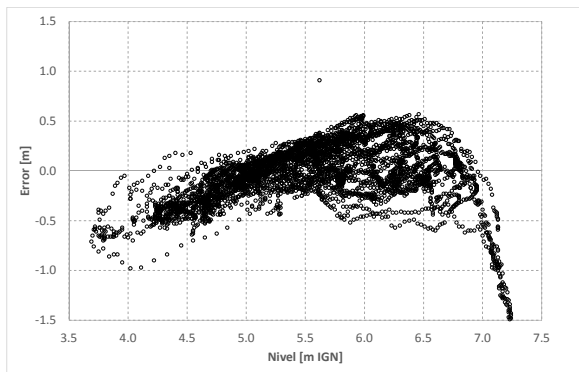


Figura 11.d: Errores entre lo observado y lo simulado. Victoria (izq.) y Puerto Ruiz (der.)

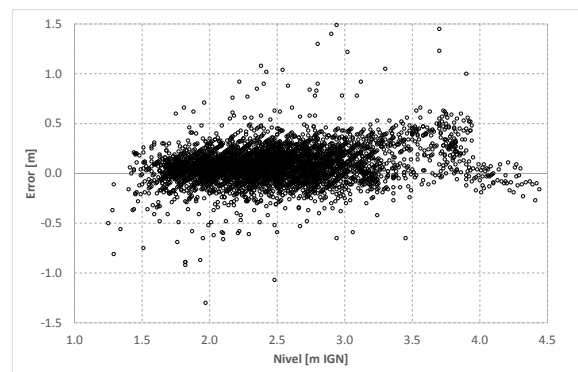


Figura 11.e: Se Errores entre lo observado y lo simulado. Puerto Ibicuy

Figura 11: Serie de niveles simulados y observados para las distintas estaciones hidrométricas

Los indicadores de ajuste propuestos para la evolución de la performance del modelo surgen del trabajo de García, 2012 y se detallan a continuación:

- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE):

Este indicador relaciona la diferencia entre valores observados y simulados con la varianza de los valores simulados [Nash J. E., Sutcliffe J.V., 1970], como muestra la siguiente fórmula:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \overline{Q_i^{obs}})^2}$$

El rango del NSE abarca desde 1 (ajuste perfecto) a $-\infty$, donde un NSE menor a 0 indica que utilizar la media de los valores observados hubiera sido un mejor predictor que el modelo utilizado.

La desventaja de este indicador es que, a mayores valores de la variable observada (Q_i^{obs}), el NSE resulta mayor, lo que conduce a creer que el modelo predice mejor en períodos de crecida que en bajantes.

- Root Mean Square Error (RMSE):

El Error Cuadrático Medio resulta ser un indicador de la concordancia global entre la forma de los gráficos de niveles simulados y observados a lo largo del tiempo. Se expresa mediante la fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - Q_i^{obs})^2}$$

Un mayor valor de RMSE se relaciona con un mayor desvío entre los valores simulados y los valores observados. Su rango comienza en 0, siendo éste el caso ideal [Shrestha, R., Nestmann, F., 2009].

- Mean Absolute Error (MAE):

El Error Medio Absoluto es una cantidad utilizada para medir qué tan cerca están las predicciones de los valores observados [Shrestha, R., Nestmann, F., 2009].

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Q_{sim,i} - Q_{obs,i}|$$

- Maximum error (MAXE):

Se determina como el error máximo positivo de la serie. Indica la máxima sobreestimación del modelo por sobre los datos observados.

$$MAXE = \max\{Q_{sim,i} - Q_{obs,i}\}$$

En este caso, un alto valor de MAXE indicaría que el modelo predice un nivel del río mucho mayor que el

real.

- Minimum Error (MINE):

Se determina como el error máximo negativo de la serie. Indica la máxima subestimación del modelo por debajo de los datos observados.

$$MINE = \min\{Q_{sim,i} - Q_{obs,i}\}$$

En este caso, un bajo valor de MINE (negativo) indicaría que el modelo predice un nivel del río mucho menor que el real.

En la Tabla 2 se muestra la cuantificación de los indicadores. En lo que respecta al *RMSE*, se ve como para las primeras estaciones sobre el Paraná (desde Rosario a San Pedro) los errores se van incrementando hacia aguas abajo. En todos los casos resulta aproximadamente menor a 0,50m, con excepción de Puerto Ruiz donde el indicador está próximo a la unidad. En cuanto al *NSE*, se ve un comportamiento aceptable para la mayoría de las estaciones, siendo desde Rosario hasta Ramallo cercano a la unidad. El resto de los indicadores acompañan la tendencia que se menciona anteriormente para las diferentes estaciones.

Tabla 2 Indicadores de ajuste

Estación	<i>RMSE</i>	<i>NSE</i>	<i>MAE</i>	<i>MINE</i>	<i>MAXE</i>
Rosario	0.155	0.982	0.123	-0.390	0.220
Villa Constitución	0.233	0.955	0.158	-0.780	0.360
San Nicolás	0.277	0.930	0.219	-0.650	0.650
Ramallo	0.297	0.916	0.243	-0.750	0.680
San Pedro	0.459	0.725	0.411	-0.390	0.980
Baradero	0.395	0.775	0.343	-1.370	0.320
Victoria*	0.526	0.807	0.322	-1.620	0.570
Puerto Ruiz**	0.947	0.603	0.725	-2.360	0.820
Puerto Ibicuy**	0.209	0.915	0.152	-1.070	1.000

CONCLUSIONES

Se pudo construir un modelo hidrodinámico del Delta Medio a partir de un mínimo de información de base, la cual tiene como característica común ser de fácil acceso y disponibilidad.

El estado de desarrollo del modelo permite realizar análisis conceptuales sobre el comportamiento de la red de canales. Durante el proceso de calibración, se pudo observar las claras dependencias a la rugosidad de cauce, planicie y geometría de la sección, características que condicionan fuertemente la capacidad de conducción de cada tramo.

Durante las simulaciones que se llevaron a cabo se pudo observar una interdependencia entre los niveles entre la rama norte y sur. En principio es muy importante cual es el volumen de agua que se deriva al sistema de lagunas del Victoria, lo cual está condicionado por las características de la bifurcación Paraná – Victoria. Aguas abajo también resulta determinante el Paraná Pavón, en lo que respecta al volumen de agua conducido por la rama norte y la sur. La capacidad de conducción de este nexo es la que permite transmitir información sobre una crecida en el Gualeguay hacia la rama del Paraná. En el tramo final del modelo, cerca de la desembocadura, los niveles son claramente condicionados por la condición de borde de aguas abajo.

Si bien los errores en la simulación de los niveles no son menores, el traslado de la onda de crecida queda bien representado según se puede ver en ciertos indicadores de ajuste como el *NSE*, donde en la mayoría de los casos el indicador es próximo a la unidad.

Finalmente, cabe destacar que en tanto y en cuanto se disponga de mayor información batimétrica, se puede progresivamente mejorar los resultados.

REFERENCIAS

Marina L. Garcia y otros, 2012, “*Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de tramo del río Paraná Inferior*”. IFRH 2012, Ezeiza, Argentina

García, P.E., Re, M., Latessa, G., 2012. *Modelo hidrodinámico del río Paraná para pronóstico hidrológico: Adecuación geométrica del modelo*. Proyecto Interno 336. Informe LHA 01-336-12. Ezeiza, Julio de 2012

Ven Te Chow, 1959. *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York.