

MODELACIÓN MATEMÁTICA HIDRO-SEDIMENTOLÓGICA A GRAN ESCALA ESPACIAL DEL SISTEMA CAUCE-PLANICIE DEL RÍO PARANÁ

Marina L. Garcia^{(1),(2)}, Pedro A. Basile^{(1),(2)} y Gerardo A. Riccardi^{(1),(2),(3)}

⁽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.

Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina.

e_mail: mgarcia@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio de los registros de caudales líquidos y sólidos del río Paraná, y la posterior aplicación de un modelo hidro-sedimentológico en el tramo Diamante-Ramallo, comprendiendo el cauce principal y la planicie de inundación, abarcando un área aproximada de 8100 km² del río Paraná Inferior. En primer lugar, se generaron los hidrogramas y sedimentogramas ingresantes al dominio modelado. La recopilación de registros de niveles hidrométricos y caudales (líquidos y sólidos) es una tarea necesaria, tanto para la generación de los ingresos en las simulaciones como para evaluar resultados. Se seleccionaron datos de caudales, publicados por la SSRH de la Nación, observados en el tramo medio del río Paraná, a la altura de la transecta Santa Fe-Paraná y en la zona de la confluencia de los ríos Bermejo-Paraguay-Paraná. Se plantearon diversas hipótesis de distribución de caudales para generar los hidrogramas de ingreso. Además, con los registros de transporte de sedimentos en suspensión, se generó un sedimentograma, que se propagó hasta el contorno aguas arriba del tramo modelado, y se lo contrastó con aforos sólidos disponibles en la zona. Posteriormente, se realizó la aplicación del modelo hidro-sedimentológico CTSS8-FLUSED, para el período Septiembre 2010-Agosto 2015. Los resultados de la modelación hidrodinámica son satisfactorios, lográndose una aceptable reproducción de caudales y niveles hidrométricos en los puntos de control. Los resultados de las deposiciones indican que las mismas variarían de 10 a 16×10⁶ t/año dentro del área de estudio, siendo la eficiencia de atrape de la planicie aluvial entre el 21% al 43%.

Palabras clave: río Paraná, caudales, aforos sólidos, modelación hidro-sedimentológica.

ABSTRACT

A study of water and sediment measurements in the Paraná River and the subsequent application of a hydro-sedimentological model at the Diamante-Ramallo reach are presented. The study area comprises the main channel and the floodplain, covering an approximate extension of 8100 km² of the Lower Paraná River. In a first stage, the hydrographs and sedigraphs entering to the modeling domain were generated. The collection and processing of records of levels and discharges (liquid and solid) is necessary, both for the generation of input signals in the simulations and for the evaluating results. A data collection of recorded discharges was carried out in the middle section of the Paraná River at the Santa Fe-Paraná transect and at the confluence zone of the Bermejo-Paraguay-Paraná rivers. These data are published periodically by the SSRH of the Nation. In addition a sedigraph was generated with records of suspended sediment transport, which was propagated up to the contour upstream and it was compared with solid measurements available in the area. Subsequently, the hydro-sedimentological model CTSS8-FLUSED was applied, for the period September 2010-August 2015. The hydrodynamic results are satisfactory, an acceptable fit is achieved in the reproduction of flows and water levels in the checkpoints. The sediment deposition results in the floodplain vary between 10 and 16×10⁶ t/year, and its trapping efficiency varies between 21% and 43%.

Keywords: Paraná river, flow rates, gaugings, sedimentological hydrodynamic model.

INTRODUCCION

El río Paraná es el más importante del país y uno de los más importantes de Sudamérica. Desde sus orillas se despachan entre el 78% y el 80% de las exportaciones argentinas de aceites, granos y subproductos, contabilizando la actividad comercial de los puertos fluviales del Gran Rosario (desde Timbúes hasta Arroyo Seco), embarcándose anualmente de 55 a 57 millones de toneladas (BCR, 2016). Dentro del aspecto ambiental, el río es sumamente valorado por sus características singulares, el cual posee una red hidrográfica interna de múltiples cauces, con diferentes órdenes de tamaño, conectividad y actividad hidrosedimentológica (Iriondo, 1972; Drago, 2007; Ramonell et al., 2011, citados en Alberdi y Ramonell, 2013). La diversidad biológica que se presenta en el río es destacable: la flora del Delta del Paraná consigna 643 especies de plantas vasculares, de las cuales 77 son especies exclusivas de la región; el 4% de la región está ocupado por bosques nativos que presentan una importante variedad de tipos diferentes; se cuenta con 430 registros de especies de vertebrados, de las cuales 36 especies resultan exclusivas; hay más de 200 especies de peces observadas; se destacan más de 30 especies de aves, 10 clases de mamíferos, etcétera (Taller Ecologista, 2010). Es por esto que resulta sustancial contribuir al conocimiento en lo que respecta a los procesos hidrodinámicos sobre este tipo de sistemas cauce-planicie, donde son considerables los procesos de deposición de la carga de lavado, y poder estimar cantidades anuales de sedimentos finos depositados.

Los ecosistemas presentes en los grandes ríos de llanura, de conformación cauce principal-planicie aluvial, tienen anegamientos periódicos durante las crecidas, las cuales son cruciales para mantener la biodiversidad e integridad ecológica de estas áreas. Por otra parte, las llanuras aluviales producen la atenuación de las crecidas al conducir flujo de desborde desde el cauce principal. Las partículas sólidas que ingresan con éste al sistema, son las principales determinantes de los cambios (deposiciones) en las cotas de fondo de la llanura aluvial. Dentro del sistema, al disminuir la velocidad en el flujo, se presentan condiciones factibles para que las partículas de la carga de lavado sedimenten en estos ambientes, especialmente en áreas lagunares donde se reducen aún más las velocidades. Debido a la deposición a largo plazo y los procesos de consolidación, las llanuras de inundación pueden convertirse en sumideros de sedimentos y contaminantes asociados a estas partículas (Walling et al., 1996).

La modelación matemática es un buen recurso para cuantificar los fenómenos hidrodinámicos que se presentan, evaluando el comportamiento integral del sistema; así como también los procesos sedimentológicos, estimando las deposiciones producidas y el rol de almacenador que cumple la planicie aluvial.

Hasta el momento han sido escasos los estudios de sedimentación de finos en esta amplia zona, la mayoría de ellos se dan sobre el tramo medio del río (Drago y Amsler, 1988; Paoli et al., 2000; Alarcón et al., 2003; Amsler et al., 2007) y también sobre su tramo final, en la desembocadura (Sarubbi, 2007; Re et al., 2009). Además, en el área que nos atañe, el transporte de sedimentos más estudiado es el que se desarrolla en el cauce principal (Paoli et al., 2000; Basile y Riccardi, 1998, 2002; Latosinski et al., 2012), ó sobre un área limitada en torno a la transecta Rosario-Victoria (Serman y asociados S. A., 2000), quedando poco explorados los procesos que involucran integralmente el cauce principal y su valle de inundación.

Los modelos computacionales de flujo y transporte de sedimentos son herramientas muy valiosas, que tienen distintas simplificaciones, de acuerdo al grado de representación del fenómeno que se busque estudiar y del área involucrada. Dado que la aplicación se realiza en un gran río de llanura de conformación cauce-planicie, la magnitud del mismo (longitudes del orden de cientos de kilómetros, ancho de la llanura aluvial del orden de decenas de kilómetros, ancho del cauce principal del orden de kilómetros), y que las crecidas que se presentan pueden tener duraciones de meses, con un llenado gradual y lento de la planicie de inundación (que se da a través del desborde del flujo del cauce principal y de los canales secundarios interiores a la planicie); es que la implementación de los modelos cuasi-2D es una de las mejores opciones para las simulaciones hidro-sedimentológicas en este ambiente. Estos modelos pueden capturar las características fundamentales del flujo de agua y de la dinámica de los sedimentos finos suspendidos en estas áreas, donde los procesos hidráulicos son compatibles con las hipótesis en que se basan los modelos cuasi-2D (Cunge, 1975). En particular, el modelo hidráulico cuasi-2D CTSS8 (Riccardi, 2001) aplicado sobre el río Paraná produjo perfiles transversales de velocidad similares a los obtenidos con un modelo 2D completo promediado en la vertical (Basile y Riccardi, 2002). Los modelos cuasi-bidimensionales logran un buen compromiso

entre el costo computacional y la representación de los procesos físicos involucrados. Los mismos pueden ser aplicados para estudiar dicha dinámica a gran escala espacial y a largo plazo, con un bajo costo computacional.

Sobre el área de estudio se ha implementado y aplicado el modelo hidrodinámico cuasibidimensional CTSS8 (Riccardi, 2001), físicamente basado y espacialmente distribuido, que simula numéricamente los procesos de inundación en el sistema cauce-planicie. Las ecuaciones para calcular el flujo de agua se representan a través de un esquema de celdas irregulares (amorfas) interconectadas. Se utilizan diferentes simplificaciones de las ecuaciones 1D de Saint Venant para representar las leyes de descarga entre las celdas río. Posteriormente, al modelo hidrodinámico se le ha acoplado el módulo sedimentológico FLUSED (Basile et al., 2007), para simular el transporte y deposición de sedimentos finos. Se ha planteado el ingreso de caudales sólidos, desde registros de las principales fuentes de aporte.

Las aplicaciones anteriores del modelo en un área de aproximadamente 8100 km² del sistema cauce-planicie del río Paraná (García et al., 2012, 2013; García et al., 2013a y b; García et al., 2015), tuvieron resultados muy satisfactorios. En ellas los hidrogramas de ingreso se conformaban en función de los caudales informados en una de las estaciones de registro dentro del dominio, y los concentrogramas del flujo ingresante se plantearon, en un principio, anuales genéricos, teniendo en cuenta las características principales de la distribución típica. Posteriormente, se consideró variar este ingreso sólido, teniendo en cuenta la relación entre caudales líquidos y sólidos confeccionada por la principal fuente de aporte sólido al río, y propagado hasta el ingreso del modelo.

En este trabajo se lleva adelante la aplicación del modelo hidrosedimentológico cuasi-2D CTSS8-FLUSED sobre un tramo de 208 km del río Paraná Inferior, entre las ciudades de Diamante y Ramallo para el período reciente de 2010-2015. El estudio incluye un análisis específico en lo que concierne a la distribución de los hidrogramas y sedimentogramas ingresantes al tramo, avanzando en un mejoramiento de la distribución mediante la propuesta de diversas hipótesis de distribución. A partir de contar con los registros que publica la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH), se procede a realizar un estudio de aquellas que están involucradas en los

aportes líquidos por un lado, y por otro las que atañen al ingreso de caudal sólido. Así, se confeccionan hidrogramas para la condición de borde aguas arriba, independientes de los registros internos del dominio, para evaluar de forma más segura la eficacia del modelo aplicado, específicamente en los caudales que transporta el cauce principal. También se elaboran concentrogramas en los ingresos al modelo, donde se toma en cuenta una relación actualizada entre caudales líquidos y sólidos de la fuente principal de sólidos del Paraná, se lo propaga hasta el borde aguas arriba del modelo, y se van comparando los valores con los registros recientes de aforos sólidos en el cauce principal.

OBJETIVOS

El objetivo del trabajo, en primer lugar, es determinar una metodología de distribución de caudales líquidos y sólidos a partir de registros recientes en estaciones aguas arriba del tramo. En segundo lugar, evaluar el comportamiento del sistema cauce-planicie, mediante la modelación hidro-sedimentológica para el período Septiembre 2010 a Agosto 2015 (5 años). Paralelamente se objetivó la cuantificación de las deposiciones de sedimentos y retención de sólidos, a través de un análisis integral de un área de aproximadamente 8100 km² del sistema cauce-planicie del río Paraná Inferior.

MATERIALES Y METODOS

Modelo CTSS8-FLUSED

Modelo Hidrodinámico

El modelo matemático hidrológico-hidráulico, físicamente basado y espacialmente distribuido, CTSS8 (Riccardi, 2001) está basado en los esquemas de celdas originalmente propuestos por Cunge (1975). El modelo permite la simulación del flujo a superficie libre multidireccional, y en cada celda es posible plantear el ingreso de flujo proveniente de precipitación neta (no considerada en la aplicación), aporte de caudales externos e intercambio de caudales con celdas adyacentes. La propagación cuasi-2D de caudales se realiza mediante un conjunto de leyes de descarga entre celdas, las cuales han sido derivadas a partir de la ecuación de Saint Venant (aproximación de onda difusiva). El modelo es particularmente apropiado para la simulación dinámica a gran escala espacial y temporal, y especialmente para flujos con

variaciones lentas en el tiempo de caudales y alturas, donde los términos inerciales resultan despreciables. La ecuación de continuidad para la j -ésima celda se expresa como:

$$A_{s_j} \frac{\partial z_j}{\partial t} = P_j(t) + \sum_{k=1}^N Q_{j,k} \quad (1)$$

donde z_j es el nivel de agua; A_{s_j} es el área mojada superficial de la celda, t es la coordenada temporal; P_j es la lluvia, intercepción, almacenamiento superficial, infiltración e intercambio externo de caudales en la celda; $Q_{j,k}$ es el caudal líquido intercambiado entre las celdas j y k ; y N es el número de celdas interconectadas a la celda j . Los caudales líquidos son expresados en función de los niveles de agua entre las celdas de origen y destino: $Q_{j,k} = Q(z_j, z_k)$. Para considerar condiciones de flujo particulares en aquellas zonas del área en estudio que presentan albardones, terraplenes artificiales, etcétera, se utilizan leyes de descarga específicas para vertederos. El sistema de ecuaciones resultante, planteado entre la ecuación de continuidad y las distintas leyes de descarga entre celdas, se resuelve mediante aproximaciones en diferencias finitas, con un esquema numérico de tipo implícito.

La distribución espacial de los parámetros del modelo y de las variables hidrodinámicas se realiza a través de la subdivisión del dominio del modelo de celdas irregulares (amorfas), que van adaptándose a la configuración planimétrica del área a representar planialtimétricamente (cauce principal, cursos secundarios, relieve del valle, bajos y lagunas, albardones). Las celdas se pueden especificar de tipo Río o tipo Valle, según representen sectores de flujo encauzado o áreas tributarias a éstos, respectivamente.

En la Figura 1 se visualiza la representación de las variables en la grilla de discretización con celdas amorfas. La configuración de celdas del sistema está estructurada en diferencias finitas, y las variables discretas del flujo z (cota del pelo de agua) y Q (caudal líquido) son escalonadas en el espacio. Los niveles hídricos z se determinan para el baricentro de cada celda utilizando el algoritmo implícito y sucesivamente se calculan los caudales Q en el punto medio de la vinculación establecida, mediante las leyes de descarga correspondientes. Asimismo, a partir de los niveles y caudales, se obtienen otras variables de flujo como profundidad del agua en la celda, área transversal mojada y radio hidráulico

entre vinculaciones y velocidad media en el punto medio entre vinculaciones.

Las condiciones de borde aguas arriba son hidrogramas de entrada (Q - t). En el contorno aguas abajo se imponen leyes altura-caudal (H - Q) en las celdas de salida. Las condiciones iniciales utilizadas fueron alturas de agua en las celdas. Éstas se obtuvieron a partir de su estabilización en corridas previas, en donde se comenzó con alturas iguales a cero en todas las celdas, y con caudales ingresantes aguas arriba de aumento gradual hasta hacerse constante, igual al inicial de los hidrogramas considerados para cada escenario.

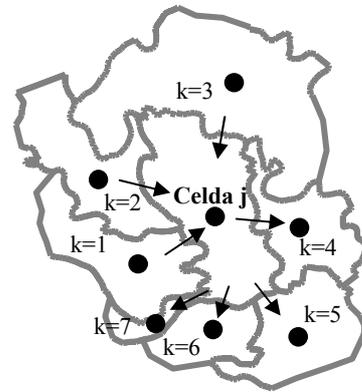


Figura 1. Representación de variables en la grilla de celdas amorfas.

Modelo Sedimentológico

El módulo sedimentológico FLUSED (Basile et al., 2007), acoplado al modelo CTSS8, simula el transporte de sedimentos finos y los procesos de deposición mediante la resolución de la ecuación de continuidad sólida cuasi-2D. La ecuación de continuidad para la j -ésima celda se expresa como:

$$A_{s_j} \frac{\partial (h C_s)_j}{\partial t} = (A_s \phi_s)_j + \sum_{k=1}^N (Q C_s)_{j,k} \quad (2)$$

donde h es la profundidad del flujo hídrico (m), C_s es la concentración de sedimentos en suspensión (m^3/m^3), ϕ_s es el flujo vertical de sedimentos asociado a deposición (m/s), y el resto de las variables ya fueron definidas. El flujo vertical de sedimentos (tasa de deposición), ϕ_s , se expresa como:

$$\phi_s = P_d w_s C_s \quad (3)$$

donde P_d es la probabilidad de deposición de las partículas y w_s es la velocidad de sedimentación de

las partículas (m/s). La probabilidad P_d viene dada por el criterio de Krone (1962), y se expresa mediante:

$$P_d = \begin{cases} 1 - \left(\frac{U}{U_{cd}}\right)^2 & ; U < U_{cd} \\ 0 & ; U \geq U_{cd} \end{cases} \quad (4)$$

donde U es la velocidad media del flujo hídrico (m/s) y U_{cd} es la velocidad media para inicio de sedimentación (m/s).

Las condiciones iniciales vienen dadas por los niveles de agua y caudales en cada celda del dominio, de los resultados de las simulaciones hidrodinámicas, y las concentraciones de sedimentos suspendidos. Se especifica también el transporte de sedimentos en suspensión entrante en el extremo de aguas arriba, y los parámetros sedimentológicos necesarios.

Las ecuaciones se resuelven mediante un esquema numérico de diferencias finitas. Las concentraciones de sedimentos suspendidos, el flujo vertical y horizontal de sedimentos son determinados por un algoritmo implícito. Además, se calculan en cada celda las deposiciones medias y totales acumuladas (en peso y volumen), así como también los incrementos en las cotas de fondo de las celdas.

Área en estudio

El modelo se aplicó sobre 208 km del río Paraná, Argentina, desde Diamante (km 533 de la vía navegable) a Ramallo (km 325 de la vía navegable), y comprende al cauce principal y llanura de inundación, cubriendo un área de aproximadamente 8100 km² (Figura 2a). El ancho del valle aluvial varía entre 30 y 60 km, y el del canal principal varía de 0.5 a 3 km, el cual es bien definido, con uno o dos brazos importantes; y ambos generalmente están separados por albardones naturales costeros. El caudal medio anual en Rosario (km 416 de la vía navegable) es 17000 m³/s aproximadamente. La relación entre caudales líquidos máximos (60000 m³/s, crecida extraordinaria de 1983 donde la planicie se presentó completamente inundada) y mínimos (6700 m³/s, en 1970) es de 9, valor bajo, característico de los grandes ríos. El lecho del río está formado por arena con d_{50} que varía entre 0.26 mm a 0.32 mm. Las capas superiores del suelo del valle de inundación y las islas, de 1 a 3 m de espesor, están formadas por sedimentos muy finos,

en el rango de limos y arcillas. La llanura aluvial es morfológicamente compleja, donde se presenta una red de canales bien desarrollados, de distintas jerarquías, espejos de agua en espiras de meandros, lagunas, bajos permanentes y temporarios, y se presentan diferentes tipos de vegetación.

El régimen del Paraná es principalmente gobernado por los aportes provenientes de aguas arriba, los afluentes laterales incrementan en poco porcentaje el caudal total. La principal entrada de volumen de agua y sedimentos a la zona en estudio, es a través del cauce principal del río, en Diamante. El otro aporte significativo viene dado por el río Coronda, conformado aguas arriba del dominio por un sistema de depresiones lagunares, que culminan en un flujo encauzado. Estos dos ingresos se consideran diferenciadamente.

En el tramo en estudio, el agua que ingresa a la planicie, lo hace a través de cursos de agua menores originarios en el cruce del cauce principal, presentándose dos principales escurrimientos: encauzado sobre la margen derecha (cauce principal) y sobre el valle aluvial (a través de cursos, bajos y lagunas interconectados).

Entre 1997 y 2003, se construyó la Conexión Física (CF) Rosario-Victoria, que consiste en un terraplén vial de 56 km de largo, y que atraviesa completamente la llanura aluvial. El terraplén incluye un puente sobre el cauce principal y 12 puentes menores en la planicie. Las luces que dejan libres estas obras otorgan una transparencia geométrica algo mayor al 18%.

La fuente dominante del material fino que predomina en el río Paraná Inferior es la cuenca alta del río Bermejo. El transporte de sedimentos promedio que ingresa al sistema es de 150×10^6 t/año, de los cuales el 83% son limos y arcillas transportadas en suspensión como carga de lavado (Amsler y Drago, 1999).

Las máximas concentraciones de sedimentos suspendidos del río Paraná, se registran con cierto retardo con respecto a los máximos caudales líquidos provenientes del Alto Paraná (Drago y Amsler, 1988), siendo éste cuantificado en aproximadamente 10 días (hasta la sección del Túnel Subfluvial, en el tramo Medio) según lo evaluado de datos de aforos en Alarcón et al. (2003). Las máximas concentraciones de sedimentos suspendidos ocurren generalmente

entre Marzo y Abril (Amsler et al., 2007). Las concentraciones de sedimentos suspendidos representativas de la carga sólida tienen significativa complejidad, pudiéndose encontrar distintos trabajos al respecto (Bertoldi de Pomar, 1984; DH-FCEIA, 1997; Serman y asociados S. A., 1999; Sarubbi, 2007), donde se informan de los resultados de muestreos realizados, siendo los mismos fraccionados. En líneas generales, las concentraciones de sedimentos suspendidos

varían, estacionalmente, entre 50 o 60 mg/l hasta valores de 500 o 600 mg/l en los picos de caudales sólidos. Los valores medios anuales están dentro del intervalo de los 150 a 250 mg/l aproximadamente. Los indicados son los valores típicos sobre el cauce principal, sobre los que se han efectuado la mayoría de las mediciones. Sobre la planicie de inundación las magnitudes son menores, inferiores a 100 mg/l, donde las mediciones realizadas fueron muy aisladas.

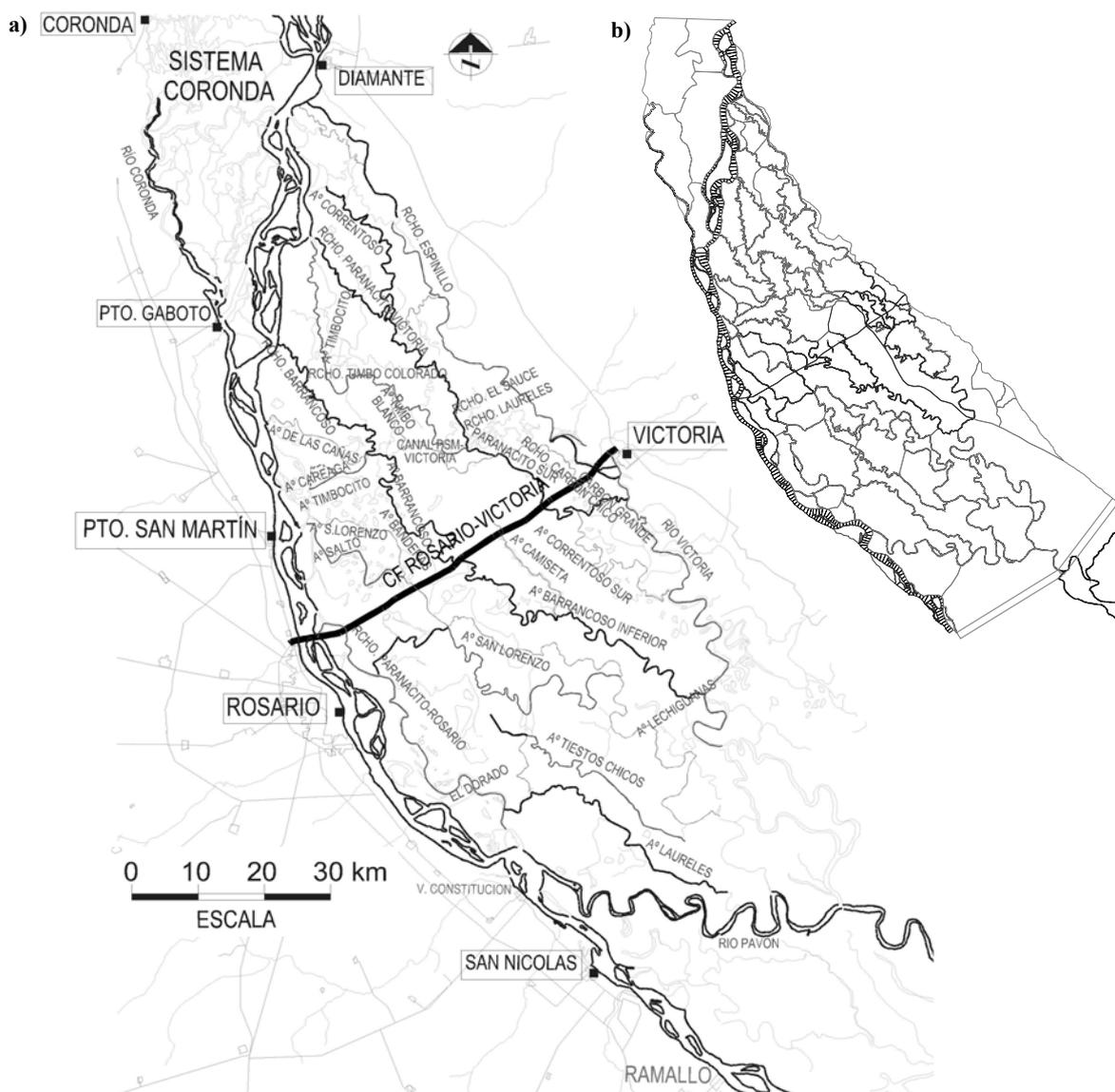


Figura 2. a) Área en estudio, b) Visualización de la constitución del modelo matemático.

Aplicación del modelo Hidro-Sedimentológico

La discretización topológica del modelo matemático conformado sobre el área de aplicación, se realizó

mediante la definición de celdas Río, celdas Valle y distintas vinculaciones entre ellas, donde se representan características topográficas especiales (albardones naturales, terraplenes de caminos,

puentes, etc.). El modelo constituido (teniendo en cuenta la presencia de la CF Rosario-Victoria) tiene 1443 celdas Río y 152 celdas Valle, con 4366 vinculaciones entre ellas (Figura 2b).

El mismo fue calibrado (para aguas bajas, medias y altas, con eventos hidrológicos registrados) y validado (considerando las décadas del '80; '90 y del 2000) con resultados muy satisfactorios (García et al., 2012; García, 2013), donde los coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) fueron superiores a 0.65 (y la mayoría de éstos superiores a 0.8) y los errores promedios entre los limnigramas calculados y observados menores al 10%. Asimismo, se definieron los principales parámetros sedimentológicos necesarios para las simulaciones sedimentológicas ($U_{cd} = 0.15$ m/s, para la w_s se trabaja con el rango: 1×10^{-5} - 1×10^{-4} - 4×10^{-4} m/s), a través de valores plausibles desde mediciones y de análisis de sensibilidad (García, 2013), para determinar las deposiciones promedio a largo plazo. Posteriormente, el modelo fue aplicado para predecir el comportamiento del sistema frente a crecidas extraordinarias (García et al., 2013a,b; García et al., 2015).

En este trabajo, el modelo CTSS8-FLUSED se aplica para simular los 5 años recientes: desde Septiembre de 2010 a Agosto de 2015. Se evaluará si el modelo sigue dando un buen desempeño en las simulaciones hidrodinámicas, y se cuantificarán las deposiciones medias anuales para este período.

En las aplicaciones anteriores (García et al., 2012; García, 2013; García et al., 2013a,b; García et al., 2015), los dos ingresos (el del cauce principal en Diamante y el del sistema del río Coronda) se consideraban vinculados entre sí, a través de una relación. Dada la escasez (o prácticamente ausencia) de datos respecto a los caudales de entrada en el área en estudio, los hidrogramas se plantearon en función de los caudales que se informan (en la SSRH) en PSM: en el cauce principal directamente trasladados aguas arriba a Diamante, y en Coronda a partir de una relación ad hoc ($Q_{Coronda}$ función de Q_{PSM}), realizada a través de simulaciones previas (García, 2013), donde los ingresos fueron los limnigramas registrados en Coronda, y obteniendo los caudales que allí se generaban. A partir de contar con mayor cantidad de registros de caudales aguas arriba del área estudiada, se pretende en este trabajo obtener los hidrogramas de ingreso al sistema desde registros independientes de los presentes en el dominio. Posteriormente se realiza el estudio para poder generar las entradas sobre Diamante y el sistema

Coronda, y así obtener hidrogramas de ingreso no vinculados entre sí, ni con los registros de PSM, pasando éstos a conformar un punto de control más fidedigno de la performance del modelo.

Con respecto a los caudales sólidos ingresantes en el sistema, anteriormente (García, 2013) se consideraron elaborando un concentrograma anual genérico, teniendo en cuenta las características principales de la distribución típica anual, atendiendo a los máximos, mínimos y valores medios clásicos registrados. Posteriormente en las aplicaciones (García et al., 2013b, 2015), se consideró variar este ingreso sólido, teniendo en cuenta la relación entre caudales líquidos y sólidos confeccionada por Re et al. (2009) para el río Bermejo (principal fuente de sedimentos finos al río Paraná), se elaboró un concentrograma de sólidos suspendidos en la zona de Confluencia (teniendo en cuenta valores globales de carga de sedimentos finos provenientes del Alto Paraná y del río Paraguay) y se lo propagó hasta la frontera del modelo (estimando un atrape de sólidos en el Paraná Medio del orden del 17%, y se tuvo en cuenta máximos y mínimos de aforos sólidos en ese tramo). Para la entrada de sedimentos en Coronda, al ser escasos los datos, se elaboró un concentrograma sintético teniendo en cuenta el período típico de mayores aportes sólidos (Febrero-Mayo), registros máximos de 195 mg/l, y que la cantidad total anual de sólidos se estipula dentro del entorno de 4.7×10^6 a 8.6×10^6 t/año, presentados en Amsler et al. (2007) para dicha zona. Se toma en cuenta una concentración mínima de 60 mg/l en los períodos de bajos aportes sólidos, para ambos ingresos.

Gracias a la actualización de las publicaciones de aforos sólidos, y por la incorporación de estaciones de registro, se decide: reconstruir la relación adoptada entre los caudales sólidos y líquidos considerada para el río Bermejo, estipular las cargas de sedimentos provenientes del río Paraguay y del Alto Paraná para el período de análisis, contrastar las concentraciones de sedimentos finos que surgen en la zona de Confluencia, con las que resultan de los aforos sólidos, y realizar lo mismo aguas abajo, en la zona de la transecta Santa Fe-Paraná, una vez propagado el concentrograma. De esta forma, se va a generar el ingreso sólido al tramo en estudio, para el período analizado.

Estudio de registros de caudales aguas arriba

Para las simulaciones hidrodinámicas y sedimentológicas, los registros de alturas y caudales son fundamentales a la hora de generar las entradas a

los modelos, así como para la evaluación de resultados. La recopilación de estas variables es una tarea que por lo general resulta laboriosa, de difícil alcance y en ocasiones la información obtenida termina siendo fragmentada.

Desde principio de este decenio, la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SSRH) comenzó a publicar en su página web los registros de caudales y alturas de agua (entre los parámetros más destacados) de las principales estaciones sobre los ríos del país. Este hecho resulta particularmente importante para poder trabajar con los registros en conjunto y analizar las variables que atañen al flujo de agua en grandes áreas, y así poder relacionar los registros de cursos de agua con sus tributarios. A medida que pasa el tiempo, la SSRH sigue incorporando más estaciones de registros y amplía las series publicadas. A partir de esto, es que se decide realizar un análisis de aquellas que están involucradas en los aportes líquidos del área en estudio por un lado, y por otro las que atañen al ingreso sólido.

Todos los registros de alturas, caudales líquidos y sólidos aquí considerados fueron obtenidos de la página de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) de la SSRH.

Ingreso de caudales líquidos

Los caudales que ingresan en el área en estudio provienen inmediatamente del Paraná Medio, y de aportes menores de los cursos de agua afluentes. El principal aporte líquido viene dado a través del cauce principal del sistema cauce-planicie aluvial. Los registros de caudales medios diarios que se encuentran publicados, aguas arriba del sector estudiado, son de las estaciones siguientes (Figura 3), de las cuales las primeras cuatro pueden ubicarse en una transecta Santa Fe-Paraná (SF-P):

- Paraná - Túnel Subfluvial – Estación 3050: situada directamente sobre el cauce principal. Los caudales medios diarios publicados cubren el período 25/01/1904 al 31/08/2016.
- Colastiné – Ruta Nacional N°168 – Estación 3249: se sitúa sobre uno de los cursos de agua secundarios más importantes sobre la planicie aluvial. Los caudales medios diarios publicados cubren el período 25/08/1903 al 31/08/2016.
- Sistema Setúbal – La Guardia – Estación 3339: se sitúa sobre la laguna Setúbal. Los caudales medios diarios publicados cubren el período 01/01/1905 al 31/08/2015.

- Salado – Ruta Provincial N°70 – Estación 3216: se sitúa sobre el río Salado, afluente del río Coronda, donde finalmente tributa al Paraná. Los caudales medios diarios publicados cubren el período 01/01/1954 al 31/08/2015.
- Corrientes – Estación 3805: se sitúa sobre la localidad de dicho nombre, donde todo el volumen de agua del río fluye por el cauce principal, por lo cual en esta sección puede contabilizarse todo el caudal circulante. Se ubica a 640 km aproximadamente del borde aguas arriba del modelo. Los caudales medios diarios publicados cubren el período 01/01/1904 al 31/08/2015.

La suma de los registros indicados en la transecta SF-P es parte de los aportes principales de ingreso en el dominio en estudio. Los caudales registrados en las estaciones de Túnel, Colastiné y Setúbal parecieran cubrir a priori la mayoría de los aportes encauzados del sistema, quedando sin registrar el flujo de desborde por la planicie que podría ocasionarse frente a crecidas. Los caudales del río Salado aportan directamente al sistema Coronda.



Figura 3. Ubicación de las estaciones de registro en la transecta Santa Fe-Paraná.

Para el período que nos atañe (Septiembre 2010 – Agosto 2015), se han compilado los registros de los caudales medios diarios informados por la SSRH, y donde hubo falta de los mismos (en algunas estaciones faltaron los datos solamente de algunos días, las series de registros fueron bastante continuas) se interpoló linealmente entre los disponibles inmediatos. La Figura 4 muestra los registros obtenidos en cada una de las estaciones, en el período a estudiar.

Para evaluar si la suma de los caudales en la transecta SF-P (Túnel+Colastiné+Setúbal) representa aproximadamente el flujo que ingresa al área de estudio, se la comparó con los volúmenes de agua que se contabilizan en la sección de Corrientes. Para el período indicado (considerando a los registros de Corrientes con una antelación de 10 días, que es aproximadamente el retardo hasta llegar a la sección SF-P), el volumen total de agua

resulta de $2.96 \times 10^6 \text{ hm}^3$, mientras que la suma de las tres estaciones en SF-P es de $2.93 \times 10^6 \text{ hm}^3$. Los valores resultan muy similares (diferencia menor al 0.88%), siendo lógico que este último sea menor, al no tener en cuenta en los registros del flujo sobre la planicie en SF-P, por lo tanto se acepta como válido considerar la suma en SF-P. En la Figura 5 se presenta una comparación de los caudales registrados en Corrientes versus la suma en SF-P.

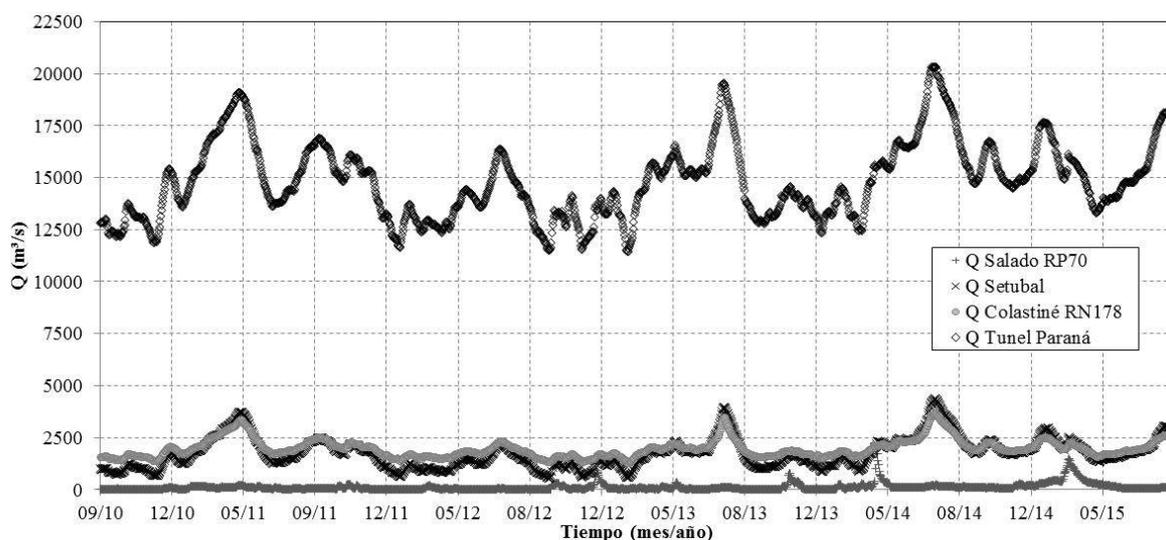


Figura 4. Registros de la SSRH de aforos de las estaciones de Túnel, Colastiné, Setúbal y Salado, para el período de estudio.

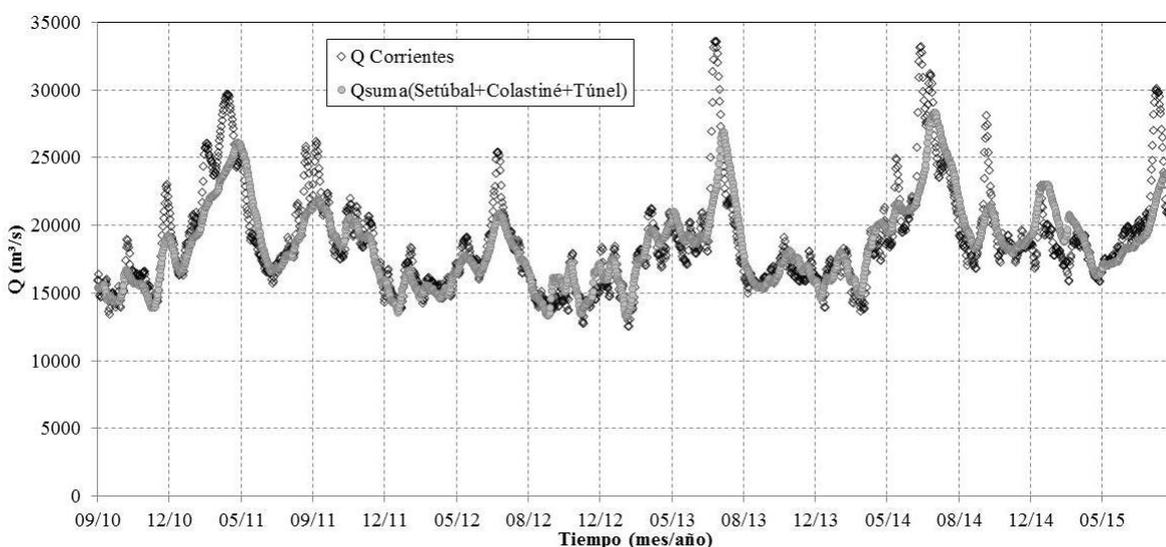


Figura 5. Comparación de registros de caudales en Corrientes versus suma de registros en SF-P (Túnel + Colastiné + Setúbal).

Para conformar los hidrogramas de entrada al dominio del modelo, se establecen diferentes hipótesis de distribución de caudales a partir de los registros de las estaciones en la transecta SF-P. De la visualización del

sistema en las imágenes de Google Earth® (Figura 6), pueden realizarse algunas suposiciones:

- Los caudales registrados en la sección Túnel parecieran fluir solo sobre el cauce principal,

aportando directamente al hidrograma de ingreso en Diamante.

- Los caudales de la sección Colastiné podrían tributar tanto al cauce principal, como al Coronda en presencia de crecidas, donde los aportes a través de este sistema lagunar aumentan considerablemente, llegando incluso a ser similares a los que circulan por el cauce principal, tendiendo a igualarse las alturas entre las estaciones de Coronda y Diamante (García, 2013).

El volumen registrado en el sistema Setúbal, llega a una bifurcación aguas abajo (a la altura de Alto Verde), donde se inicia el canal de acceso al Puerto de Santa Fe sobre la izquierda, y a la derecha son los inicios del río Coronda, donde 3 km aguas abajo aproximadamente tiene su desembocadura el río Salado. En este estudio no se contó con información de secciones de ambos ramales, pero a priori la sección del canal de acceso al puerto se supone de mayor importancia que la de los inicios del Coronda, además debe contar con un dragado habitual de mantenimiento para su funcionamiento. Por lo tanto, no hay una distribución definida entre lo que

se aporta al sistema Coronda y al cauce principal (Diamante).

Teniendo en cuenta lo indicado, se han planteado en total 15 hipótesis de distribuciones de caudales, maximizando y minimizando los aportes en ambos ingresos. Dentro de las principales evaluadas se pueden citar:

- Hipótesis 01: Ingreso por Diamante: Túnel + Colastiné. Ingreso por Coronda: Setúbal + Salado.
- Hipótesis 02: Ingreso por Diamante: Túnel. Ingreso por Coronda: Colastiné + Setúbal + Salado.
- Hipótesis 08: Ingreso por Diamante: Túnel + Colastiné + 2/3 Setúbal. Ingreso por Coronda: 1/3 Setúbal + Salado.
- Hipótesis 14: Ingreso por Diamante: Túnel + Colastiné + 4/5 Setúbal; e ingreso por Coronda: 1/5 Setúbal + Salado, si $Q_{\text{sumaSF-P}} < 22000 \text{ m}^3/\text{s}$; cuando $Q_{\text{sumaSF-P}} > 22000 \text{ m}^3/\text{s}$, varían proporcionalmente, hasta que $Q_{\text{sumaSF-P}}$ llega a su máximo, quedando: ingreso por Diamante: Túnel; e ingreso por Coronda: Colastiné + Setúbal + Salado.



Figura 6. Registros de la SSRH de aflujos de las estaciones de Túnel, Colastiné, Setúbal y Salado, para el periodo de estudio.

Para cada una de éstas, se han realizado las simulaciones hidrodinámicas, y se evalúan los resultados comparando los registros de alturas de agua en las 7 estaciones internas del dominio, y los caudales en PSM. Para considerar los ingresos líquidos al sistema a partir de los registros en SF-P, se decide adoptar aquella hipótesis de distribución de caudales que proporcione mejores resultados en cuanto a los coeficientes NS.

En paralelo a estas simulaciones, se realizó la corrida hidrodinámica para el mismo período temporal, pero con los ingresos de caudales líquidos que se consideraban en las aplicaciones anteriores (los generados a partir de los registros de PSM). En la Figura 7 se presentan estos hidrogramas, junto a los de los ingresos de las principales hipótesis planteadas.

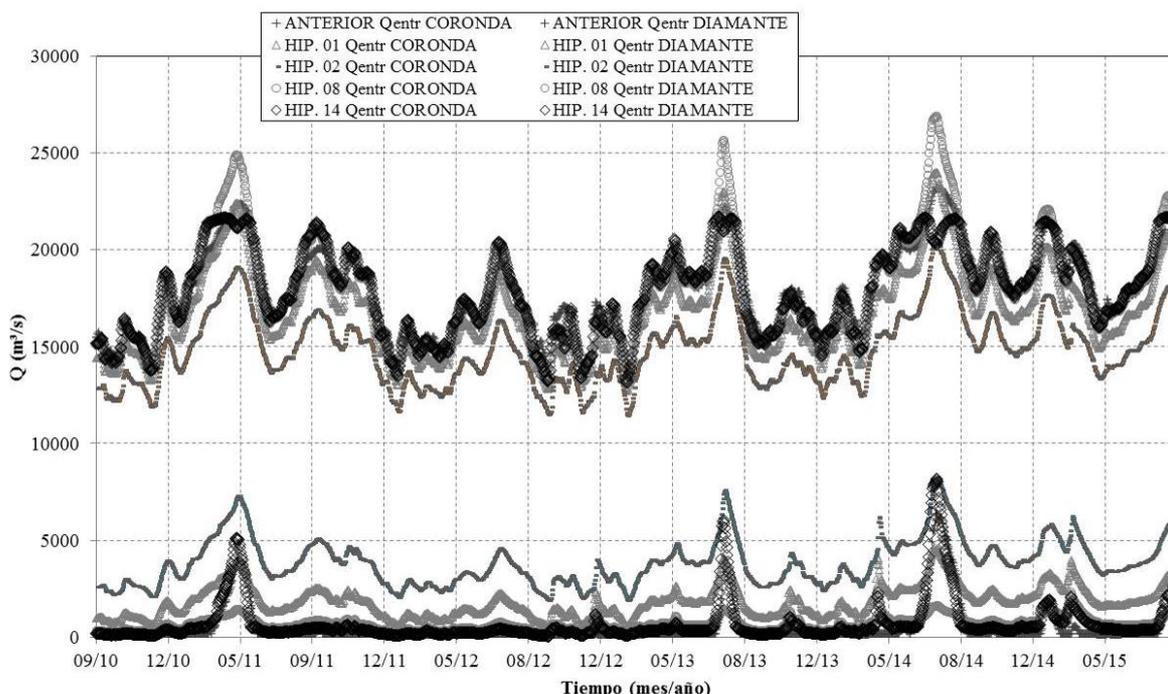


Figura 7. Comparación de hidrogramas de ingreso de caudales líquidos en Diamante y sistema Coronda, los considerados anteriormente en las aplicaciones y los planteados en las hipótesis principales.

Ingreso de caudales sólidos

Para considerar los concentrogramas de ingreso en el dominio, se tuvieron en cuenta los registros de aportes sólidos que convergen al comenzar el Paraná Medio, en Confluencia: desde el río Bermejo, el Alto Paraná y el río Paraguay. Para contrastar el concentrograma elaborado, se observaron los aforos de las estaciones sobre el Paraná Medio. Los registros utilizados (publicados por la SSRH) de aforos sólidos (finos) y caudales líquidos, son de las estaciones siguientes (Figura 8):

- Río Bermejo – El Colorado – Estación 2602: situada en el río Bermejo, a 194 km aguas arriba de su desembocadura al río Paraguay, y a 925 km del borde aguas arriba del área modelada. Los caudales sólidos finos publicados (al momento de realizar el trabajo) cubren el período 03/11/1993 al 24/06/2016.

- Río Paraguay – Puerto Pilcomayo – Estación 2606: situada en el río Paraguay, sobre la localidad homónima (Formosa, Argentina), ubicada sobre la margen derecha de dicho río en el km 375.5, aproximadamente frente a Asunción del Paraguay. Se encuentra aguas arriba de la desembocadura del río Bermejo. Los caudales sólidos finos publicados (al momento de realizar el trabajo) cubren el período 30/09/1993 al 21/06/2016.
- Río Paraguay – Puerto Formosa – Estación 2608: situada en el río Paraguay, sobre la localidad homónima (Formosa, Argentina), ubicada sobre la margen derecha de dicho río en el km 207.5. Se encuentra aguas arriba de la desembocadura del río Bermejo. Los caudales sólidos finos publicados (al momento de realizar el trabajo) cubren el período 30/07/2009 al 20/06/2016. Es una estación de aforo de reciente aparición.

- Río Paraguay – Puerto Bermejo – Estación 2401: situada en el río Paraguay, sobre la localidad homónima (Chaco, Argentina), ubicada sobre la margen derecha de dicho río en el km 65. Se encuentra muy próxima a la desembocadura del río Bermejo, a 16 km aguas abajo de la misma. Los caudales sólidos finos publicados (al momento de realizar el trabajo) cubren el período 15/09/2015 al 20/06/2016. Es una estación de aforo de muy reciente aparición.
- Paraná – Posadas (Itacuí) – Estación 3402: es una estación que actualmente está inactiva (los registros se tomaron hasta el año 2008). Se situaba aguas arriba de la localidad homónima (Misiones, Argentina), en el Alto Paraná, ubicada sobre el cauce principal del río, en el km 1583 de la vía navegable, a 343 km aguas arriba de la desembocadura del río Paraguay en el Paraná. Los caudales sólidos finos publicados cubren el período 15/09/1993 al 03/01/2008.
- Paraná – Itatí – Estación 3862: situada a orillas de la localidad homónima (Corrientes, Argentina), en el Alto Paraná, ubicada sobre el cauce principal del río, a 38 km aproximadamente aguas arriba de la desembocadura del río Paraguay en el Paraná. Los caudales sólidos finos publicados (al momento de realizar el trabajo) cubren el período 24/11/1993 al 02/06/2016.
- Paraná - Corrientes – Estación 3805: situada a orillas de la localidad homónima (Corrientes, Argentina), en el comienzo del Paraná Medio, ubicada sobre el cauce principal del río, en el km 1208 de la vía navegable, a 32 km aproximadamente aguas abajo de la desembocadura del río Paraguay en el Paraná. Esta estación no cuenta con registros de caudales de sólidos finos. Se utilizan de la misma las publicaciones de los caudales medios diarios, que cubren el período 01/01/1904 al 31/08/2015.
- Paraná - Empedrado – Estación 3885: situada a orillas de la localidad homónima (Corrientes, Argentina), en el Paraná Medio, ubicada sobre el cauce principal del río, en el km 1140 de la vía navegable. Los caudales sólidos finos publicados (al momento de realizar el trabajo) cubren el período 18/02/2011 al 02/06/2016. Es una estación de aforo de reciente aparición.
- Paraná - Túnel Subfluvial – Estación 3050: situada a orillas de la localidad homónima (Entre Ríos, Argentina), en el Paraná Medio, ubicada sobre la margen izquierda del río, sobre el cauce principal, en el km 584 de la vía navegable, a 38 km aguas arriba del ingreso al área modelada. Los caudales

sólidos finos publicados (al momento de realizar el trabajo) cubren el período 27/09/1993 al 24/06/2016.

Para llegar a elaborar un concentrograma de ingreso al modelo sobre el cauce principal, se comienza con el análisis de los sólidos desde aguas arriba. En la zona de Confluencia, sobre el km 1240 de la vía navegable del río Paraná, descarga sus aguas el río Paraguay, sobre el cual, 90 km aguas arriba, tuvo su descarga el río Bermejo (fuente principal de los sólidos en suspensión). Por lo que aquí se van a contabilizar los sólidos provenientes de las tres fuentes de aporte: del río Paraguay aguas arriba de la afluencia del Bermejo, los de éste río, y los del Alto Paraná.



Figura 8. Ubicación de las estaciones de registro en la zona de Confluencia: ríos Bermejo, Paraguay y Alto Paraná; y sobre Paraná Medio.

En las aplicaciones anteriores (García et al., 2013b), para considerar el aporte sólido del río Bermejo, se ha trabajado con la relación entre caudales sólidos y líquidos establecida por Re et al. (2009), para la estación El Colorado (Formosa). Al disponer actualmente con mayor número de registros de aforos (casi se duplica la cantidad disponible), se actualiza esta relación. La

misma queda de la forma siguiente (período 03/11/1993 - 24/06/2016, Figura 9):

$$Q_s = \begin{cases} 0.000911 Q_l^{2.430106} ; & Q_l < 200 \text{ m}^3/\text{s} \\ 0.043956 Q_l^{1.725781} ; & Q_l \geq 200 \text{ m}^3/\text{s} \end{cases} \quad (5)$$

donde Q_s son los caudales sólidos (kg/s) y Q_l son los caudales líquidos (m^3/s), para dicha estación de registro. Los caudales líquidos considerados del río Bermejo tuvieron en cuenta un desfase temporal de 10 días, que sería el traslado aproximado hasta el borde aguas arriba del modelo en Diamante.

En las aplicaciones anteriores (García et al., 2013b) se consideraron los aportes desde el Alto Paraná y desde el río Paraguay estimados desde los transportes anuales promedio de la carga de lavado que se presentan en Alarcón et al. (2003). Para cada aporte se consideraron valores genéricos globales (4.5×10^6 t/año desde el Alto Paraná, y 5.0×10^6 t/año desde el río Paraguay) que se distribuyeron uniformemente en el año. Al disponer actualmente de registros de aforos sólidos publicados en ambos cursos de agua, se efectúa una valoración ajustada de cada carga sólida anual (Gw).

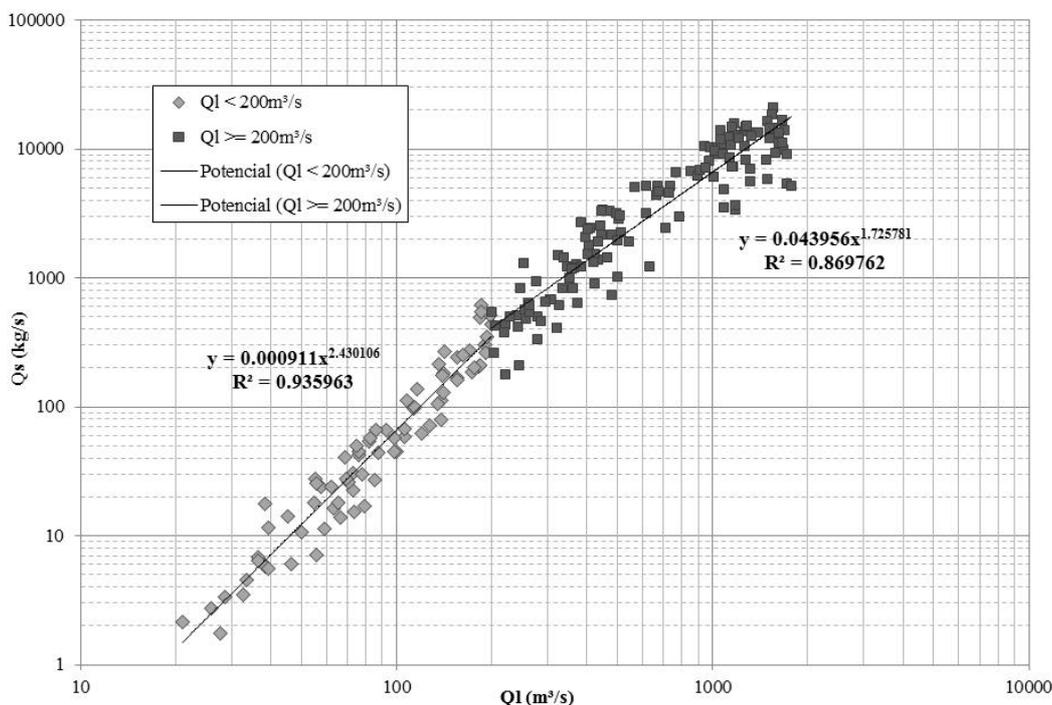


Figura 9. Relación entre caudales sólidos y líquidos para la estación El Colorado (Formosa) - río Bermejo. Período: 03/11/1993 - 24/06/2016.

De las tres estaciones indicadas del río Paraguay, se compilaron los registros de caudales de sólidos finos. En la Figura 10 se presenta una gráfica comparativa de los mismos. Se evalúa para cada estación, el caudal sólido promedio (Q_s), y se estima la carga sólida anual.

En los registros de Puerto Pilcomayo, se evidencia un cambio en los aforos realizados: si se considera el período completo, se obtiene un Q_s promedio diario de 88.69 kg/s, pero si se evalúa desde el año 2000, el promedio da 65.56 kg/s, siendo notoria la disminución. Tomando como referencia este último valor, la carga anual estimada es de 2.07×10^6 t/año.

Los registros de Puerto Formosa dan un Q_s promedio diario de 65.37 kg/s, similar al de la estación aguas arriba; y una carga anual estimada de 2.06×10^6 t/año. Los registros de la estación Puerto Bermejo, de escasa cantidad (ocho) y reciente aparición (desde Septiembre de 2015), se muestran en la Figura 10 a nivel indicativo, ya que aquí se cuenta con el aporte del río Bermejo (que en esta metodología se contabilizan aparte). Esta última estación cobrará importancia con el tiempo, a medida que se cuente con mayor cantidad de registros en la misma. El caudal sólido promedio para el período obtenido es de 142.94 kg/s, lógicamente mayor a los anteriores.

Desde lo presentado, se decide adoptar el valor global anual que surge de los aforos de Puerto Formosa (2061468 t/año), ya que es la estación ubicada aguas abajo sobre el río Paraguay, más cercana a la confluencia sin contar con los sólidos provenientes del Bermejo, cubriendo los registros del período a analizar. El Gw estimado se considera distribuido uniformemente en el año, siendo la carga

sólida diaria para el río Paraguay de 65.37 kg/s.

De las dos estaciones indicadas del Alto Paraná, se compilaron los registros de caudales de sólidos finos. En la Figura 11 se presenta una gráfica comparativa de los mismos. Se evalúa para cada estación, el caudal sólido promedio, y se estima la carga sólida anual.

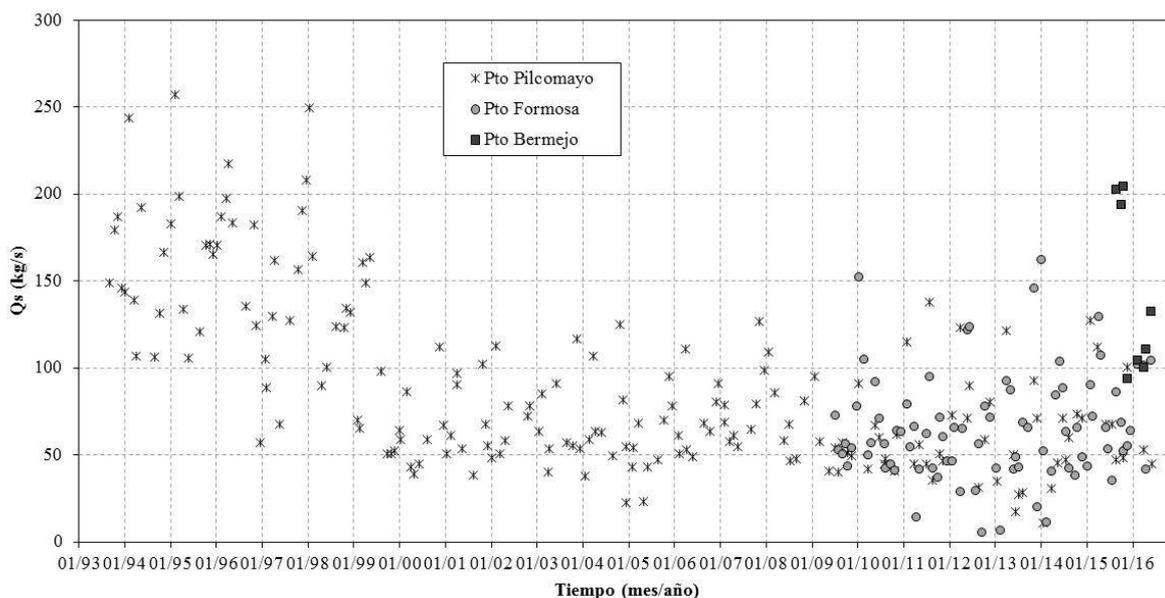


Figura 10. Registros de aforos sólidos publicados por la SSRH para las estaciones de Puerto Pilcomayo, Puerto Formosa y Puerto Bermejo, sobre el río Paraguay.

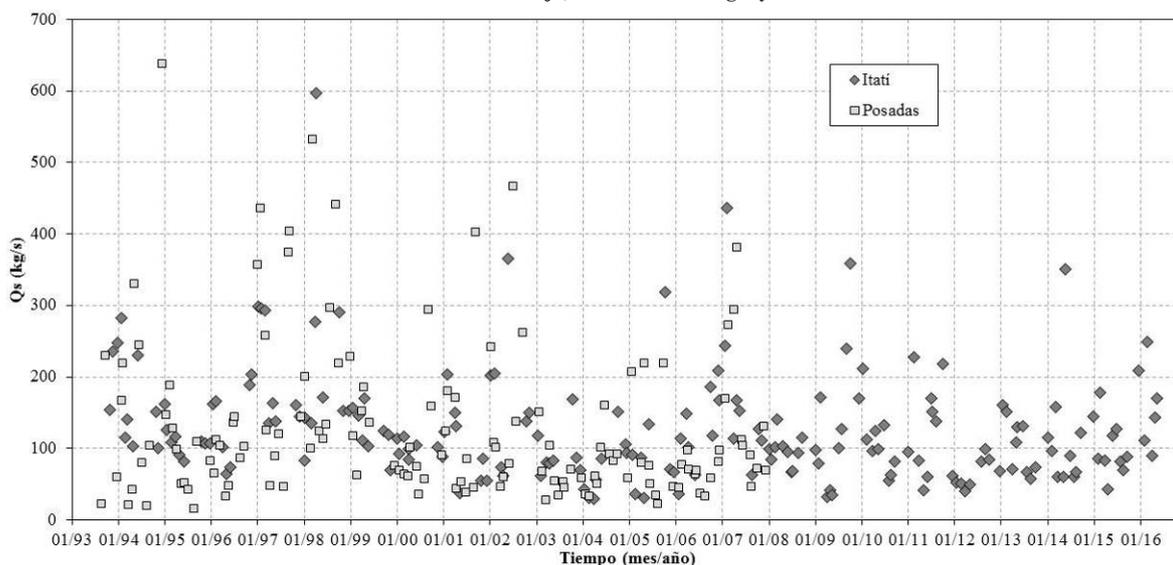


Figura 11. Registros de aforos sólidos publicados por la SSRH para las estaciones de Posadas e Itatí, sobre el río Alto Paraná.

La estación de Posadas está actualmente inactiva, debido a los cambios producidos desde el 2008, cuando la represa Yacretá comenzó a elevar la cota del

embalse (Bernal, 2014), que fue cuando se desactivó. Los registros igualmente se presentan en la gráfica, de forma indicativa. Los mismos otorgan un Qs promedio

de 130.19 kg/s, y la carga anual estimada es de 4.11×10^6 t/año. Los registros de la estación Itatí, activa, dan un Qs promedio de 127.28 kg/s, similar al de la estación aguas arriba y lógicamente algo menor; y una carga anual estimada de 4.01×10^6 t/año.

Se decide adoptar el valor global anual que surge de los aforos de Itatí (4014020 t/año), ya que además de ser la más cercana a la confluencia del Paraguay y Paraná, es la actualmente activa y los registros cubren el período evaluado. El Gw estimado se considera distribuido uniformemente en el año, siendo la carga sólida diaria para el Alto Paraná de 127.28 kg/s.

Si se comparan los valores anuales adoptados en este trabajo con los considerados en las aplicaciones anteriores, podremos ver que son definitivamente menores. Esto puede ser debido a incertidumbres en las estimaciones hechas, o que en este período las cargas sólidas pueden llegar a ser menores, por disminuir los aportes desde las fuentes de sedimentos.

Así, se sumaron temporalmente los tres aportes de sólidos finos (desde el río Bermejo, el río Paraguay y el Alto Paraná). Se utilizan los caudales medios diarios informados por la SSRH para la estación de Corrientes (que es una sección donde pasa todo el flujo de agua que llega a la confluencia aguas arriba), y con la carga sólida calculada, se determinan las concentraciones Cw al inicio del Paraná Medio.

A 100 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Paraguay y Paraná, se localiza la estación de Empedrado, que se encuentra relativamente cercana, donde hay publicados aforos sólidos desde el año 2011. Por lo tanto, se determinan las concentraciones Cw para este lugar y se los compara con los Cw calculados para la confluencia, contrastando si la metodología que se está siguiendo es adecuada. En la Figura 12 se pueden ver que los Cw tienen un ajuste aceptable, teniendo en cuenta que aún en Empedrado hay afectación de la longitud de mezcla de sedimentos (desde el ingreso de finos, provenientes del Bermejo, al Paraná), y en las primeras mediciones (en el 2011) puede haber dispersión. Sobre Junio-Julio-Agosto de 2013 hay registros que indican una elevada concentración (las mayores de la serie), que no parecen ser acordes al resto de los valores, y tampoco se conciben con lo que sucede en ese período en el río Bermejo, que es el aporte principal de los sólidos finos.

A continuación, sobre la carga sólida generada en la zona de confluencia, se considera una pérdida del 17% por el atrape de sólidos que se produciría en la planicie

del Paraná Medio (el porcentaje es estimado en base a valores que se obtienen de Alarcón et al., 2003, concordantes con los valores de retención sólida en la planicie en el Paraná Inferior calculados en las modelaciones anteriores hechas sobre el tramo en estudio). Así, se calculan los caudales sólidos que llegan al borde aguas arriba del modelo en Diamante, y a través de los caudales líquidos ingresantes considerados, se elabora el concentrograma de la carga de lavado. El mismo tiene una concentración promedio diaria de 108.15 mg/l, máximo de 729.21 mg/l y mínimo de 7.90 mg/l, valor excesivamente bajo, considerando que por lo general éstos están en el orden de los 60 a 80 mg/l (Drago y Amsler, 1988; Serman y asociados S. A., 1999; Alarcón et al., 2003; Sarubbi, 2007). Los valores máximos usuales llegan a ser del orden de hasta aproximadamente 900 mg/l (Bertoldi de Pomar, 1984; Sarubbi, 2007), con lo cual nos indica que el valor máximo calculado es acorde. Por lo tanto se realiza un ajuste, especialmente sobre los valores mínimos, teniendo en cuenta las concentraciones de sólidos finos que surgen de los aforos en la sección del Túnel Subfluvial, publicados por la SSRH.

De los registros de sólidos finos y caudales líquidos para dicha estación, se calculan las concentraciones, para el período a evaluar. Los resultados indican un mínimo de 37.62 mg/l, y un máximo de 1166.96 mg/l, siendo la concentración promedio de 144.82 mg/l, y la carga sólida promedio de 2177.65 kg/s. Para elaborar el concentrograma con los mínimos ajustados, no se va a considerar el mínimo minimorum de los aforos, sino para tener en cuenta un mínimo general, se adoptará el percentil 30 de la muestra, para el período Septiembre 2010 – Agosto 2015. Este valor resulta de 57.47 mg/l, el cual se adopta como mínimo del concentrograma. Se reelabora el mismo, obteniéndose el final que se va a considerar para la entrada de sólidos en las modelaciones sedimentológicas. El concentrograma resultante tiene un promedio diario de 133.92 mg/l, el máximo se mantiene en 729.21 mg/l y el mínimo considerado de 57.47 mg/l; la carga sólida promedio diaria es de 2378.16 kg/s, similar al valor indicado anteriormente que surge de los aforos en la estación del Túnel. La carga sólida media anual resulta de 74997640 t/año. En distintos trabajos se pueden encontrar valores de transporte anual de cargas de lavado, que ingresan en este tramo, que van desde los 67 a 145 millones de toneladas anuales (Alarcón et al., 2003; Amsler et al., 2007; Re et al., 2009; Sarubbi, 2009), y siendo el aquí calculado de aproximadamente 75 millones de toneladas anuales, se puede concluir que la carga sólida para este período es relativamente baja.

Para validar este concentrograma elaborado, se contrasta al mismo con las concentraciones de finos que surgen de los registros de aforos sólidos y líquidos para la estación Túnel-Paraná, en la Figura 13. Si bien ésta se encuentra a 38 km aguas arriba del borde del dominio del modelo, es la estación de aforos más cercana, y consideramos que sirve a los fines comparativos. La Figura 13 muestra que se logra una buena concordancia con los valores desde los aforos, con excepción de uno puntual de Mayo de 2011, que

parece discordante con los aportes desde el río Bermejo, o no fue capturado oportunamente en los registros, y además se puede considerar excesivo para los máximos usuales en la sección Túnel-Paraná. Más allá de esto, se aprecia en el gráfico comparativo que se reproducen bien las características generales del comportamiento de la concentración de carga de lavado, en especial las más relevantes, como la forma, tiempo al pico, concentración promedio, rama de ascenso/descenso y magnitud total anual del aporte sólido.

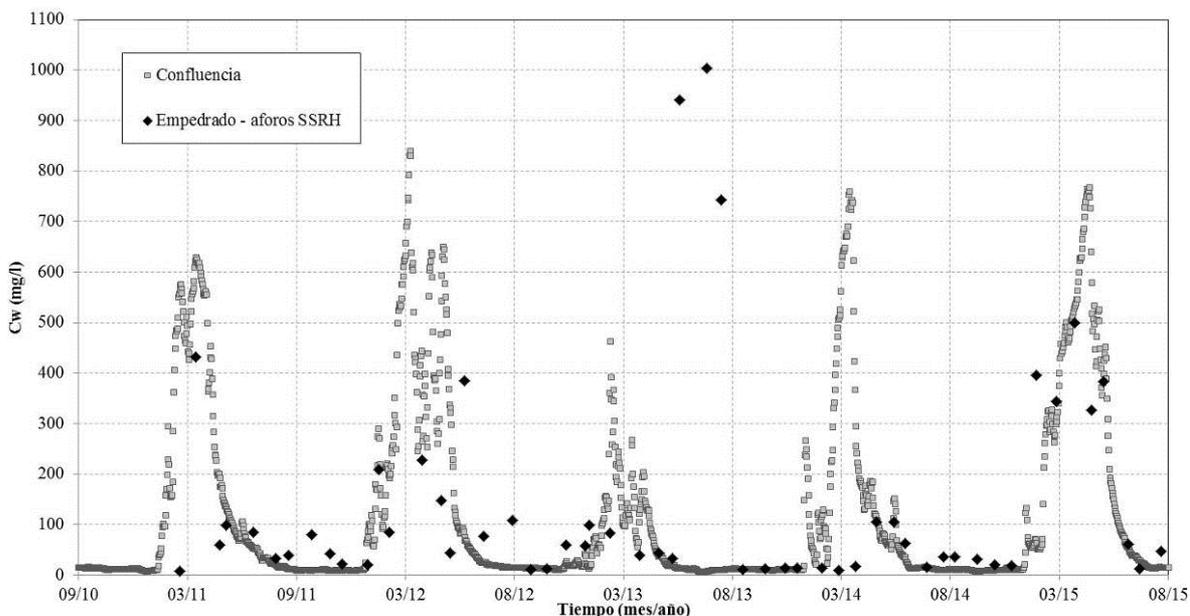


Figura 12. Comparación de concentraciones de sólidos finos, calculadas para la confluencia del río Paraná y Paraguay, y las que surgen de los aforos publicados por la SSRH para la estación Empedrado, sobre el río Paraná.

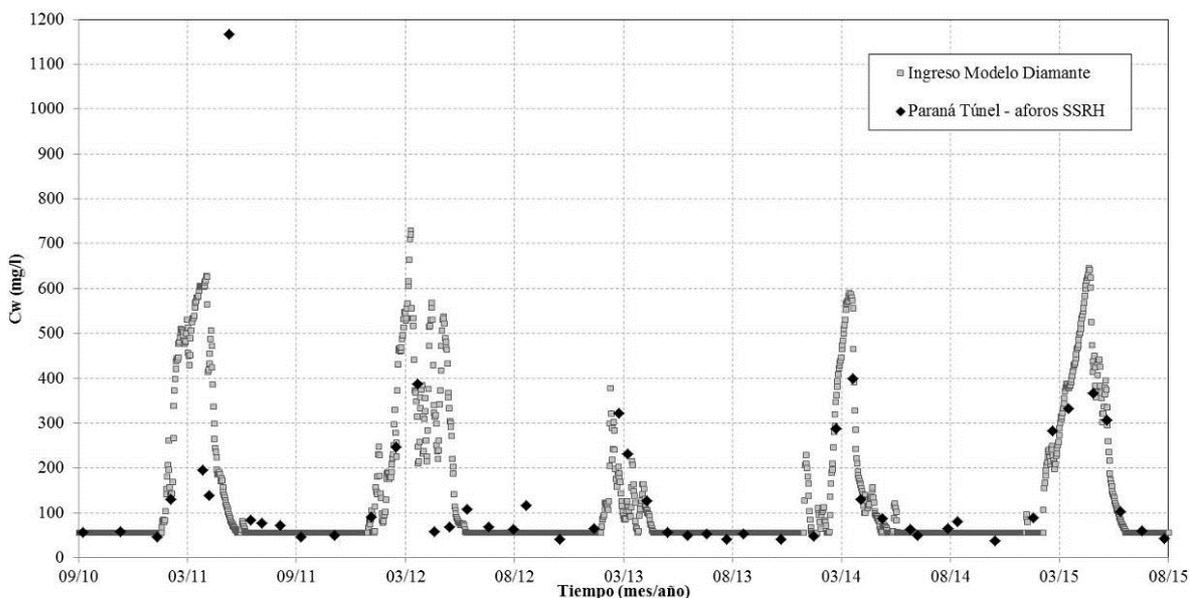


Figura 13. Comparación del concentrograma elaborado para el ingreso sólido al modelo en Diamante, y de las concentraciones que surgen de los aforos publicados por la SSRH para la estación Túnel Subfluvial, sobre el río Paraná.

Para la entrada de sedimentos en el sistema Coronda, al no contar con aforos sistemáticos específicos en el lugar o cercanías, y al ser escasas las mediciones allí realizadas (en el trabajo de Amsler et al., 2007, se indican sólo 11 mediciones para este río, hechas en los años 1971-1972), se elaboró un concentrograma a partir del generado para la entrada por el cauce principal sobre Diamante. Se adapta al mismo, considerando la misma forma, ya que respeta el período típico de mayores aportes sólidos (Febrero-Mayo), se considera el mismo valor mínimo que para el cauce principal (57.47 mg/l) en los períodos de bajos aportes sólidos y se tiene en cuenta los registros

máximos de 195 mg/l, presentado en Amsler et al. (2007) para dicha zona. Con estos valores máximos y mínimos considerados, se confecciona el concentrograma proporcional al elaborado anteriormente, el cual se presenta en la Figura 14. La concentración promedio que surge del mismo es de 73.12 mg/l. El transporte de sedimentos medio anual sobre el río Coronda, para todo el período evaluado, resulta de 1.71×10^6 t/año. Si se tiene en cuenta que en Amsler et al. (2007) se estipula que la cantidad total anual de sólidos se encuentra dentro del entorno de 4.7×10^6 a 8.6×10^6 t/año, el valor anterior indica un período de muy bajos aportes sólidos al sistema.

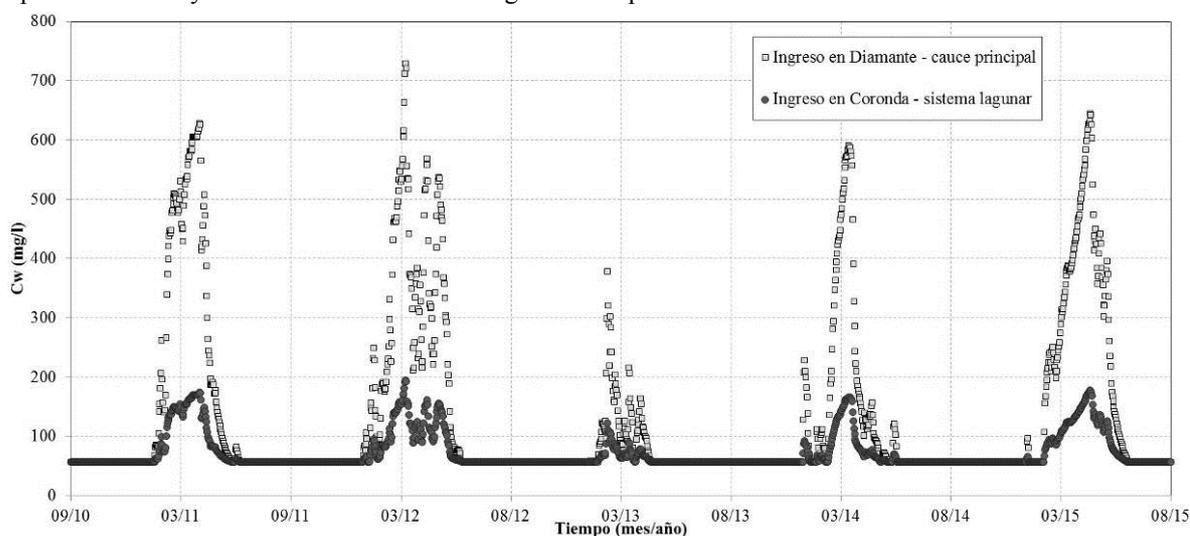


Figura 14. Concentrogramas elaborados para el ingreso sólido al dominio del modelo, sobre el cauce principal en Diamante, y sobre el sistema Coronda.

Los concentrogramas presentados en la Figura 14 son los ingresos sólidos al sistema, para realizar las simulaciones sedimentológicas. Se considera que los mismos están generados con una metodología que se basa en los registros de aforos de las fuentes de sólidos principales, y es propagado hasta el borde aguas arriba del dominio del modelo.

Las corridas sedimentológicas se realizan posteriores a las hidrodinámicas. Se aplica el modelo FLUSED sobre los resultados de la simulación seleccionada de las hipótesis planteadas, según el criterio anteriormente indicado.

RESULTADOS

Simulaciones Hidrodinámicas

Se realizaron las simulaciones hidrodinámicas a través del modelo CTSS8 (Riccardi, 2001), para el

período Septiembre 2010 a Agosto 2015, para cada una de las hipótesis planteadas de ingresos de caudales y con las entradas de caudales establecidas en las aplicaciones anteriores. El intervalo temporal utilizado fue de $\Delta t=60$ s, hasta cumplir con el tiempo de modelación total. El tiempo real que insumió cada simulación de cinco años, fue de aproximadamente 30 horas en un equipo Intel Core i7-3770 con CPU 3.4 GHz y 8 Gb de RAM.

En la Tabla 1 se presentan los coeficientes NS resultantes para las principales hipótesis evaluadas y las entradas de caudales anteriores. Los resultados para esta última son satisfactorios, con muy buenos valores en las estaciones de PSM, Rosario y San Nicolás (SN), y de menor calificación en Diamante y Victoria. Es decir, el modelo con los ingresos anteriores tiene un buen desempeño para la reproducción de la hidrodinámica a gran escala.

Dentro de las hipótesis evaluadas (15 en total), las que mejores resultados obtuvieron son las cuatro que aquí se presentan. La Hipótesis 01, que considera un caudal ingresando por el cauce principal igual a la suma del Túnel+Colastiné, da muy buenos resultados en las estaciones ubicadas sobre éste, en Diamante especialmente, PSM, Rosario y SN, dando resultados aceptables en Victoria y Puerto Gaboto, pero nada buenos en Coronda. En la Hipótesis 02, que considera un caudal mínimo por el cauce principal (igual al del Túnel solamente), sucede una situación de resultados similares a los de la 01, con mejores resultados aún para Diamante, pero empeora los de Coronda. En la Hipótesis 08, donde se plantea un caudal más reducido para Coronda (con el aporte del Salado + 1/3 Setúbal) y mayor para el cauce principal, los resultados en Coronda mejoraron, pero fue en detrimento de los de

Diamante, aunque en menor medida que la mejora que significó en Coronda. Finalmente, para la Hipótesis 14 se redujo aún más el ingreso por Coronda para caudales bajos (aporte del Salado + 1/5 Setúbal) y se incrementó el del cauce principal, incluyendo una variación en la distribución de los aportes a partir de un valor arbitrario estimado (22000 m³/s) donde se supone que el flujo ingresante al sistema Coronda crece mucho más que el que fluye por el cauce principal. Para la misma, los resultados son mejores en Coronda, Puerto Gaboto y Victoria, teniendo también muy buenos valores en PSM, Rosario y SN, y en Diamante sólo disminuye un poco la performance, dando de todas formas resultado aceptable. En todas las hipótesis los resultados de evaluación de caudales en PSM dan valores que indican un muy buen ajuste, por encima de 0.85.

Tabla 1. Coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), para la evaluación de diferentes hidrogramas de caudales líquido de ingreso.

Estaciones hidrométricas	Ingresos de caudales igual que en aplicaciones anteriores	Hipótesis 01	Hipótesis 02	Hipótesis 08	Hipótesis 14
Diamante	0.58	0.73	0.85	0.63	0.59
Puerto San Martín (PSM)	0.95	0.92	0.92	0.92	0.92
Rosario	0.85	0.90	0.90	0.89	0.90
San Nicolás (SN)	0.83	0.87	0.87	0.86	0.86
Victoria	0.44	0.53	0.48	0.55	0.56
Coronda	0.61	0.09	-0.29	0.48	0.58
Puerto Gaboto	0.75	0.59	0.57	0.61	0.61
QPSM	0.88	0.88	0.86	0.89	0.89

Nota: los sombreados grises remarcan los mejores valores obtenidos para cada estación dentro de las hipótesis planteadas, y los subrayados resaltan mejores ajustes obtenidos en los ingresos planteados en las aplicaciones anteriores.

Cabe la aclaración particular de la estación de Diamante, la cual no ha logrado (en ninguno de los casos, ni en el de las nuevas entradas ni en las anteriores) el desempeño que ha tenido en las simulaciones de las décadas del '80 y '90, donde los coeficientes NS dieron valores entre 0.90 y 0.92 (García, 2013). No se pudo conseguir una serie continua confiable para la década entera del '00, y los registros que aquí se consideran para la evaluación de la performance del modelo, los consideramos como válidos, no pudiendo realizarse un chequeo si son absolutamente fidedignos. Por lo tanto, el ajuste en esta estación no tuvo la relevancia que sí se le dio al resto de las estaciones de registro dentro del modelo.

Ahora, evaluando las entradas de caudales, independizadas de los registros internos del modelo, se ven resultados que son tan buenos como los de los ingresos anteriores. Se puede observar que los mejores coeficientes NS los brinda la Hipótesis 14, por lo que se decide optar por esta alternativa para considerar los hidrogramas de condición de borde aguas arriba del modelo. Los ajustes logrados son muy satisfactorios, donde las estaciones de Diamante, Victoria, Coronda y Puerto Gaboto tienen un desempeño aceptable, con valores NS superiores a 0.55, y sobre el cauce principal en PSM, Rosario y SN los ajustes son muy buenos con coeficientes superiores a 0.85. Los coeficientes de eficiencia NS logrados reflejan la alta correlación entre las

observaciones y las modelaciones. Los errores promedios entre los limnigramas calculados y observados son menores del 6.5%, y entre el hidrograma en PSM calculado y observado son del

4.1%. En las Figuras 15 y 16 se presentan las comparaciones entre limnigramas e hidrogramas calculados y observados, respectivamente, de las estaciones presentes en el dominio del modelo.

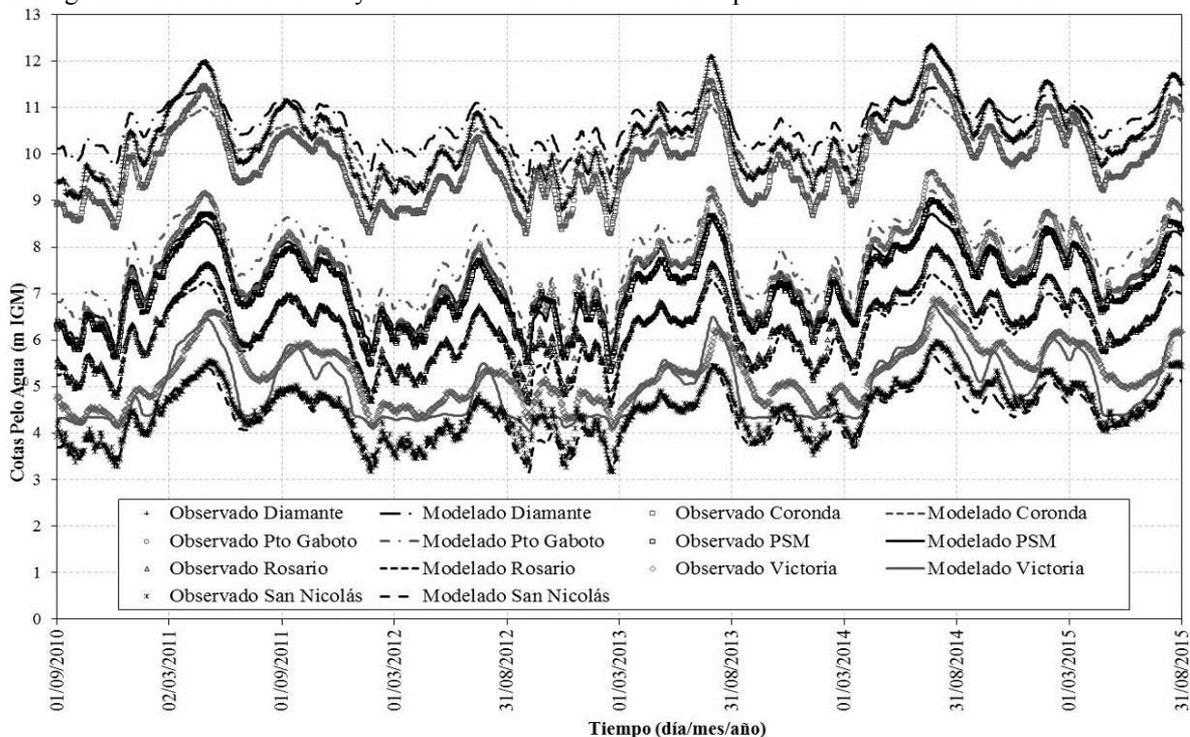


Figura 15. Comparación de limnigramas calculados (modelados) y observados en los puntos de control, para el período Septiembre 2010 – Agosto 2015.

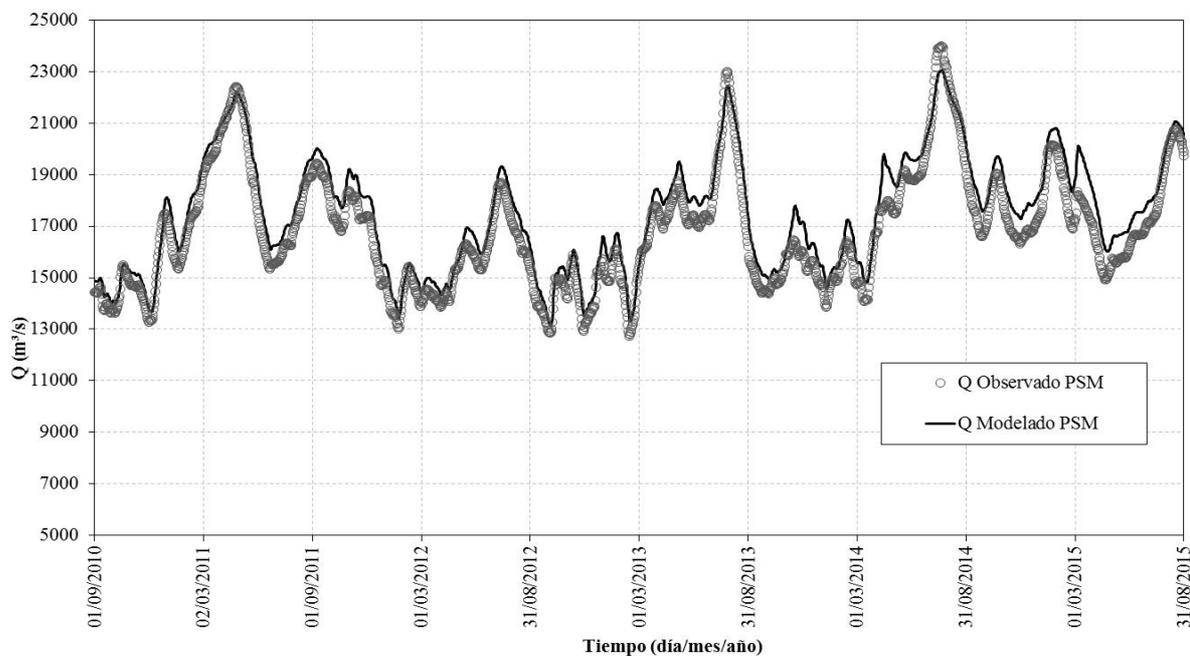


Figura 16. Comparación de hidrogramas calculado (modelado) y observado en Puerto San Martín, para el período Septiembre 2010 – Agosto 2015.

Así, desde los registros de la SSRH en las estaciones de la transecta SF-P, se van a considerar para los ingresos por Diamante a los caudales que se registran por: Túnel + Colastiné + 4/5 Setúbal, y las entradas al sistema Coronda se considera la suma de los registros de: 1/5 Setúbal + Salado, siempre que la suma de caudales en la transecta SF-P sea inferior a 22000 m³/s; y cuando dicha suma supera los 22000 m³/s, se varía cada ingreso proporcionalmente, hasta que la suma de caudales en SF-P llega a su máximo, quedando el ingreso por Diamante igual a los registros del Túnel, y la entrada por Coronda igual a la suma de los registros de: Colastiné + Setúbal + Salado. Esta variación se supuso debido a que cuando se incrementan los caudales, hay desborde y flujo circulando por el valle, que se va incrementando paulatinamente, y el caudal que fluye por el cauce principal llegaría a una capacidad máxima, derivando los excedentes a la planicie de inundación. Estas condiciones de borde generadas a partir de registros, constituyen un gran avance en la determinación de una posible distribución de caudales desde el Paraná Medio al Paraná Inferior, dentro de tan compleja estructura cauce-planicie.

Simulaciones Sedimentológicas

Se aplicó el módulo FLUSED (Basile et al., 2007) para el período Septiembre 2010-Agosto 2015. Las simulaciones sedimentológicas fueron realizadas utilizando un intervalo temporal de cálculo de 24 horas, hasta cumplir con el tiempo de modelación total. El tiempo real promedio que insumieron las simulaciones, para cada período de cinco años, fue de 2 minutos aproximadamente, trabajando en el equipo anteriormente descrito. Los resultados de las deposiciones (se informan rangos de valores, debido a las distintas w_s consideradas) se presentan en la Tabla 2.

De los resultados, la deposición promedio anual sobre todo el tramo en estudio (sistema cauce-planicie), en el período analizado, puede variar desde 10.2×10^6 a 16.1×10^6 t/año, pudiendo retener el mismo entre 13% a 21% aproximadamente de los sedimentos que ingresan. Estos valores son acordes a porcentajes usuales (entre el 5 al 21% para años de caudales medios, García, 2013) que pueden estimarse para estos grandes ríos de llanura con configuración similar. Sobre la planicie de inundación pueden depositarse desde 3.4×10^6 a 4.4×10^6 toneladas anuales promedio, siendo aquí la retención variable en un rango acotado de 4.5% a 5.7%. Así, en el valle se almacenó entre el 21% y 43% de los sedimentos depositados en el tramo. Estos sólidos generan incrementos en las cotas de fondo de la

planicie aluvial, que pueden variar desde 0.32 a 0.41 mm/año.

En la Figura 17 se presenta la visualización de la distribución espacial de las deposiciones, para la w_s de 0.0001 m/s (la intermedia de las analizadas). Los sedimentos depositados en el dominio en estudio se muestran en la Figura 17a, y en la Figura 17b los incrementos en las cotas de fondo promedio, ponderados sobre las áreas anegadas.

Tabla 2. Resultados de las simulaciones sedimentológicas.

Resultados	Sept. 2010– Ago. 2015	Promedio anual
Sólidos suspendidos ingresantes ($\times 10^6$ t)	383.7	76.7
Depósitos anuales Φ ($\times 10^6$ t) en el Dominio	51.0 – 80.4	10.2 – 16.1
Retención de sólidos en el Dominio (%)	13.3 – 20.9	
Depósitos anuales Φ ($\times 10^6$ t) en la Planicie	17.1 – 21.9	3.4 – 4.4
Retención de sólidos en la Planicie (%)	4.5 – 5.7	
Aumento en cotas de fondo (mm) sobre la Planicie	1.6 – 2.0	0.32 – 0.41

Los mayores depósitos se observan en las celdas correspondientes a las principales lagunas (Grande y Coronda), donde las velocidades han disminuido considerablemente, y donde se ensancha la planicie de inundación. Sobre el cauce principal no se contabilizan deposiciones. Así como los sólidos ingresantes en el dominio son de un promedio anual que puede clasificarse como escaso, en comparación con los valores usuales, también las cantidades de depósitos en la planicie resultan bajas. Esto es acorde a que en este período no sucedieron crecidas importantes (los máximos caudales por el cauce principal fueron menores a 25000 m³/s, lo cual no produce desbordes significativos sobre los albardones costeros que lo separan del valle de inundación). A su vez, en todo el período los caudales superaron los 13000 m³/s, puede indicarse que estos cinco años fueron de caudales medios. Por lo tanto, el ingreso de flujo al valle fue principalmente por los cursos secundarios, flujo encauzado, alimentando a las depresiones interiores de la planicie, y en menor medida se presentó el flujo por desborde, que provoca mayores deposiciones en la misma. Es decir, no hubo grandes cantidades de agua en el valle, sumado a un período de escasos aportes sólidos, lo que generó deposiciones menores en el valle.

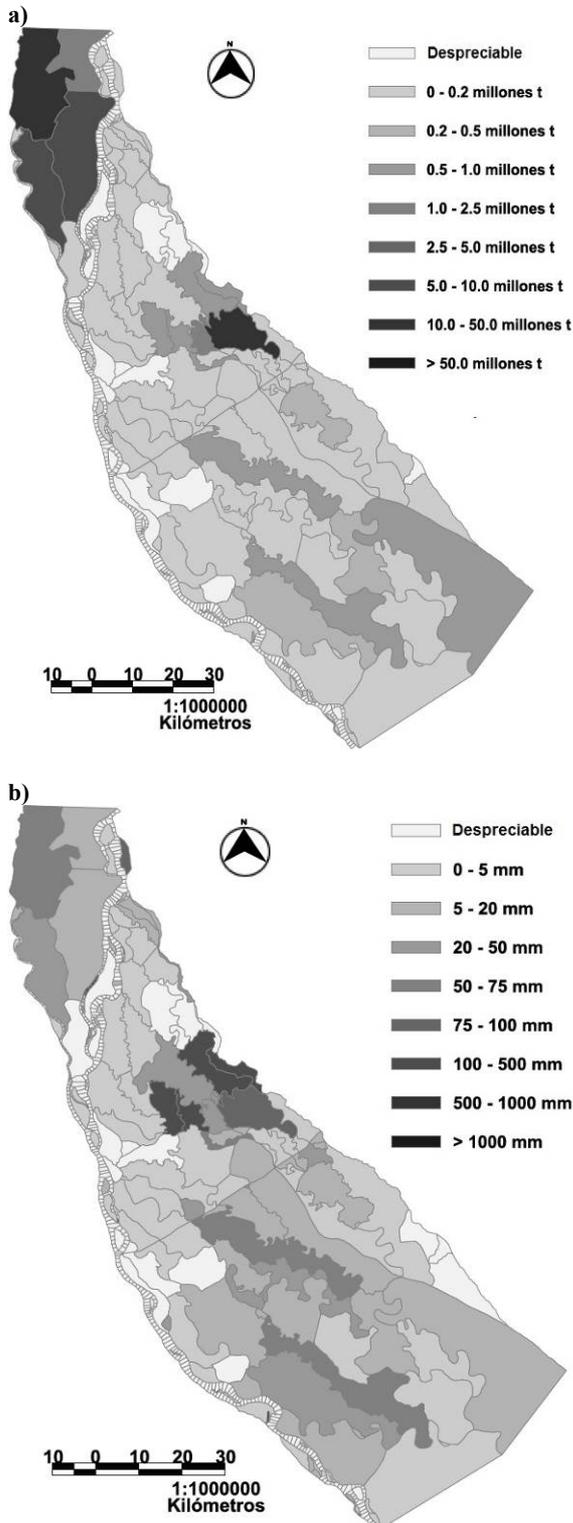


Figura 17. Distribución espacial de deposiciones para el período Septiembre 2010 – Agosto 2015 ($w_s = 0.0001$ m/s): a) depósitos totales Φ en las celdas del dominio, b) variaciones de la cota de fondo dz^* , ponderadas con áreas anegadas.

CONCLUSIONES

A partir del modelo matemático constituido sobre un gran tramo del río Paraná (Diamante-Ramallo), de aproximadamente 200 km, que simula adecuadamente los principales procesos hidrodinámicos y sedimentológicos, se evaluó el comportamiento del sistema cauce-planicie un período de cinco años, de 2010 a 2015.

Desde las recientes publicaciones de aforos, alturas y caudales medios diarios en estaciones registro, integradas entre los cursos de agua principales del país, es que se decide estudiar los ingresos al modelo a partir de las mismas. Se plantearon variadas distribuciones de caudales en la transecta SF-P, en función de los registros más cercanos aguas arriba del modelo, quedando constituidas distintas hipótesis para el ingreso sobre el cauce principal en Diamante (al este), y sobre el sistema Coronda (al oeste). Se evalúa también el desempeño del modelo con los ingresos que fueron considerados en las aplicaciones anteriores (dependientes de registros internos en el mismo). Se obtiene que el mejor ajuste hidrodinámico es con la Hipótesis 14, donde se plantea un ingreso hasta los 22000 m³/s (suma de caudales registrados en SF-P), donde por el cauce principal ingresa: Túnel + Colastiné + 4/5 Setúbal, y por Coronda la suma de lo que se registra en Salado + 1/5 Setúbal; y conforme los caudales de la suma SF-P van aumentando, se varía proporcionalmente hasta la distribución siguiente: por el cauce principal sólo ingresa lo registrado en Túnel, y por el sistema Coronda: Colastiné + Setúbal + Salado.

Tanto para esta hipótesis (de mejor ajuste), como con los ingresos anteriores, la performance del modelo es muy buena, con coeficientes NS elevados para las estaciones de registro sobre el cauce principal, y aceptables para el resto.

Así se logra conformar hidrogramas ingresantes al sistema en función de los registros aguas arriba, independientes de los internos, que pasan a ser netamente puntos de control. Más allá del modelo hidrodinámico utilizado en el área en estudio, si se pretende cambiar o mejorar el mismo, puede igualmente considerarse esta distribución de caudales ingresantes resultante de factible aplicación para este tramo.

Para el modelo sedimentológico que simula el transporte y deposición de los sedimentos finos suspendidos, se han evaluado también los ingresos al

dominio de la carga de lavado desde los recientes registros de aforos de sólidos finos.

Se planteó el ingreso principal de caudales sólidos a partir de cálculos sobre los registros de las fuentes de aporte preponderantes, propagado hasta el ingreso al tramo en estudio. Para ello se actualizó la relación entre caudales sólidos y líquidos para el río Bermejo (aporte principal), se cuantificaron las cargas sólidas promedio provenientes del río Paraguay y del Alto Paraná, para el período en evaluación. Se conforma un concentrograma en Confluencia y se lo contrasta con registros de reciente aparición. Se considera una deposición estimativa en el Paraná Medio y se ajustan los valores extremos. Finalmente al concentrograma resultante de ingreso al modelo se lo contrasta con las C_w que surgen de los registros en la sección del Túnel, la más cercana aguas arriba, siendo el resultado muy satisfactorio.

Se han podido cuantificar las deposiciones para el período evaluado, en un rango de 10×10^6 a 16×10^6 t/año aproximadamente, y la retención de sólidos, entre 13% a 21%. De esta forma, se tiene un análisis y cuantificación integral de las deposiciones en el sistema cauce-planicie, en este gran tramo del Paraná Inferior.

El valle de inundación, en su rol preponderante de almacenador, contó con deposiciones en el entorno de 3.4×10^6 a 4.4×10^6 t/año (de 21% a 43% de los sedimentos que retiene el tramo), y produce un atrape de sólidos que puede variar desde 4.5% a 6% aproximadamente de la totalidad que ingresa en el dominio estudiado. Se concluye que a este período evaluado (Septiembre 2010-Agosto 2015), de caudales medios, con escaso ingreso de sólidos al sistema, y presencia moderada a baja de agua en el valle, le corresponden deposiciones considerablemente bajas.

REFERENCIAS

- Alarcón, J. J.; Szupiany, R.; Montagnini, M. D.; Gaudin, H.; Prendes, H. H.; y Amsler, M. 2003. "Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná", *I Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Ezeiza, Argentina.*
- Alberdi, R. y Ramonell, C. G. 2013. "Evaluación de cambios morfométricos recientes en cauces menores del río Paraná Medio", *VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santa Fe, Argentina.*
- Amsler, M. L. y Drago, E. 1999. "A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay rivers", *Symposium on hydrological and geochemical processes in large scale rivers. Manaus, Brazil.*
- Amsler, M. L.; Drago, E. C. y Paira, A. R. 2007. "Fluvial sediments: Main channel and floodplain interrelationships", *Capítulo 5, en: The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland, de Iriondo, M. H.; Paggi, J. C. y Parma, M. J. (Eds.). Heidelberg, New York. Parte I, pp. 123-14.*
- Basile, P. A. y Riccardi, G. A. 1998. "Desarrollo y aplicación de un modelo matemático morfológico cuasi-2D para simular numéricamente los procesos dinámicos de erosión y sedimentación en ríos aluviales". *XVII Congreso Nacional del Agua, Santa Fe, Argentina, Tomo III, pp. 472-482.*
- Basile, P. A. y Riccardi, G. A. 2002. "Application of a quasi-2D hydro-morphological mathematical model to the Argentinean Paraná River". *International Journal of Sediment Research, Vol. 17, N° 1, pp. 20-30.*
- Basile, P. A.; Riccardi, G. A.; Garcia, M. L. y Stenta, H. R. 2007. "Quasi-2D modeling of hydro-sedimentological processes in large lowland river-floodplain systems", *Workshop on Morphodynamics Processes in Large Lowland Rivers. Santa Fe, Argentina.*
- Bernal, F. 2014. "Yacyretá: historia de una obra estratégica para el desarrollo nacional". *Informe OETEC Observatorio de la Energía, Tecnología e Infraestructura para el Desarrollo - Área de Energía. 8 p.*
- BRC. 2016. Informativo semanal BCR. *Bolsa de Comercio de Rosario. Año XXXIII - N° 1746 - 19 de Febrero de 2016. Rosario, Argentina. 36 p.*
- Bertoldi de Pomar, H. 1984. "Estudios limnológicos en una sección transversal del tramo medio del río Paraná. III: Componentes sólidos transportados en suspensión". *Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral, Vol. 15, Fascículo 1, pp. 25-46.*
- Cunge, J. 1975. "Two Dimensional Modelling of Flood Plains". *Cap. 17. Unsteady flow in open channels (Ed. Mahmood K. and Yevjevich V.). Water Resources Publications, Fort Collins.*
- DH-FCEIA. 1997. "Estudio y Proyecto de la Obra de Dragado de Acceso al Puerto de PASA S.A.". *Informe Final Convenio PASA S.A.- Departamento de Hidráulica, FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina.*
- Drago, E. C. y Amsler, M. L. 1988. "Suspended Sediment at a Cross Section of the Middle Parana River: Concentration, Granulometry and Influence

- of the Main Tributaries”. *Sediment Budgets*. Washington, DC. IAHS Publication No. 174, pp. 381-396.
- García, M. L. 2013. “Modelación de Procesos Hidrodinámicos y Sedimentológicos en Planicies de Inundación de Grandes Ríos de Llanura”. *Tesis Doctoral, FCEIyA, UNR, Rosario, Argentina*. 424 p.
- García, M. L.; Basile, P. A. y Riccardi, G. A. 2012. “Modelación hidrodinámica de sistema cauce-planicie con celdas amorfas, de tramo del río Paraná Inferior”, *I Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, IFRH, INA, Ezeiza, Argentina*, 15 p.
- García, M. L.; Basile, P. A. y Riccardi, G. A. 2013a. “Modelación Hidrodinámica de Crecidas Extraordinarias en Sistema Cauce-Planicie del Río Paraná Inferior”. *Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santa Fe, Argentina. E-Book ISBN 978-987-657-900-1. 1ª Ed. FICH-UNL*.
- García, M. L.; Basile, P. A. y Riccardi, G. A. 2013b. “Modelación Sedimentológica en Sistema Cauce-Planicie del Río Paraná Inferior”. *Sexto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Santa Fe, Argentina. E-Book ISBN 978-987-657-900-1. 1ª Ed. FICH-UNL*.
- García, M. L.; Basile, P. A.; Riccardi, G. A. 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, ISSN 1001-6279, Vol. 30 (2015), pp. 150-159*.
- Iriondo, M. H. 1972. “Mapa geomorfológico de la llanura aluvial del Río Paraná desde Helvecia hasta San Nicolás, República Argentina”. *Revista Asociación Geológica Argentina, tomo XXVII (2), pp. 155-160*.
- Krone, R. B. 1962. “Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes”. Final Rep., *Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, EEUU*.
- Latosinski, F. G.; Szupiany, R. N.; García, C. M. y Guerrero, M. 2012. “Estimación del Transporte de Sedimentos de Fondo en un Gran Río con Perfilador Acústico Doppler”. *I Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, IFRH 2012, INA, Ezeiza, Argentina*, 18 p.
- Paoli, C.; Iriondo, M. y García, N. 2000. “El río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura”. *Capítulo 1, Tomo I, de: Paoli, C. y M. Schreider. Ediciones UNL, ISBN 987-508-120-5. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina*.
- Re, M.; Menéndez, A. N. y Amsler, M. L. 2009. “Metodología para la generación de series temporales de descarga sólida de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú”, *Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, Salta, Argentina*.
- Riccardi, G. A. 2001. “Un Sistema de Simulación Hidrológica-Hidráulica cuasi-2D multicapa para ambientes rurales y urbanos”. *Tesis Doctoral, FCEfyN, UNC, Córdoba, Argentina*.
- Sarubbi, A. 2007. “Análisis del Avance del frente del Delta del Río Paraná”. *Tesis de grado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires. 136 p*.
- Serman y asociados S. A. 1999. “Análisis de condiciones sedimentológicas en el entorno de la Conexión vial”. *Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina*.
- Serman y asociados S. A. 2000. “Estudio hidráulico del puente principal y viaducto Este. Modelación matemática bidimensional”. *Informe de Puentes del Litoral S.A., Convenio Gobierno Nacional – Provincias de Santa Fe y Entre Ríos para la obra Conexión Física Rosario-Victoria. Argentina*.
- SSRH. Subsecretaría de Recursos Hídricos, del Sistema Nacional de Información Hídrica/Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI): <http://www.hidricosargentina.gov.ar/AccesoBDHI.html>
- Taller Ecologista. 2010. “Humedales del Paraná. Biodiversidad, usos y amenazas en el Delta Medio”. *Proyecto: Iniciativas sustentables en los humedales del Paraná Inferior, financiado por el Programa de Subvenciones para Ecosistemas (EGP) del Comité Holandés para la IUCN NL (Comité Nacional de los Países Bajos). Edición Inercia Comunicaciones. Rosario, Argentina. 68 p*.
- Walling, D. E.; He, Q. y Nicholas, A. P. 1996. “Floodplains as suspended sediment sinks”. *En: Anderson, M.G., Walling, D.E., Bates, P.D. (Eds.) Floodplain Processes. Wiley, Chichester, U. K., pp. 399-440*.

Artículo recibido el 11/2016 y aprobado para su publicación el 12/2016.