



SEDIMENTACIÓN EXTRAORDINARIA EN LOS CANALES DE NAVEGACIÓN DE MARTÍN GARCÍA

Ángel N. Menéndez, Leandro D. Kazimierski y Mariano Re

INA, Laboratorio de Hidráulica, Autop. Ezeiza-Cañuelas Tramo J. Newbery km 1,600, (1802) Ezeiza, Argentina
Universidad de Buenos Aires, Departamento de Hidráulica, LaMM, Av. Las Heras 2214, (1127) Buenos Aires, Argentina
E-mail: angel.menendez@speedy.com.ar

RESUMEN

Durante los meses finales del año 2015 y comienzos de 2016 se produce una sedimentación excepcional en los canales de navegación del río de la Plata. Para su estudio se realizó un análisis de sedimentación en los Canales de navegación de Martín García del río de la Plata utilizando modelación numérica hidrodinámica bidimensional en planta e hidrosedimentológica en corte vertical que explica los fenómenos de sedimentación en canales de navegación. Se procesó la información batimétrica y de dragado existente para estimar tasas observadas de sedimentación y posteriormente se validó el modelo aplicándolo a condiciones hidrosedimentológicas normales. Finalmente, se utilizó el modelo para mostrar que la sedimentación adicional producida desde enero de 2016 está íntimamente asociada a la crecida extraordinaria del río Paraná, la cual correlaciona con la situación de Niño Fuerte que se desarrolló durante 2015.

ABSTRACT

During the final months of 2015 and early 2016, there is an exceptional sedimentation in the navigation channels of the Río de la Plata. For its study, a sedimentation analysis was carried out in Martín García Navigation Channels of the Río de la Plata using two - dimensional hydrodynamic numerical modeling in the plant and hydrosedimentological in a vertical section that explains the sedimentation phenomena in navigation channels. The existing bathymetric and dredging information was processed to estimate observed sedimentation rates and the model was then validated applying it to normal hydrosedimentological conditions. Finally, the model was used to show that the additional sedimentation produced since January 2016 is intimately associated with the extraordinary flood of the Paraná River, which correlates with the situation of Niño Fuerte that was developed during 2015.

INTRODUCCIÓN

A principios de 2016, mientras se ejecutaban dragados de reapertura de los Canales de Martín García en el Río de la Plata (Figura 1), se produjo una sedimentación extraordinaria que contrarrestó en gran medida las acciones de profundización. Este fenómeno fue concomitante con una crecida extraordinaria del río Paraná, con lo cual resultó natural identificarla como la causante. De todos modos, debido a las implicancias económicas de este fracaso, se llevaron a cabo estudios que produjeran una explicación técnica cuantitativa de lo ocurrido.

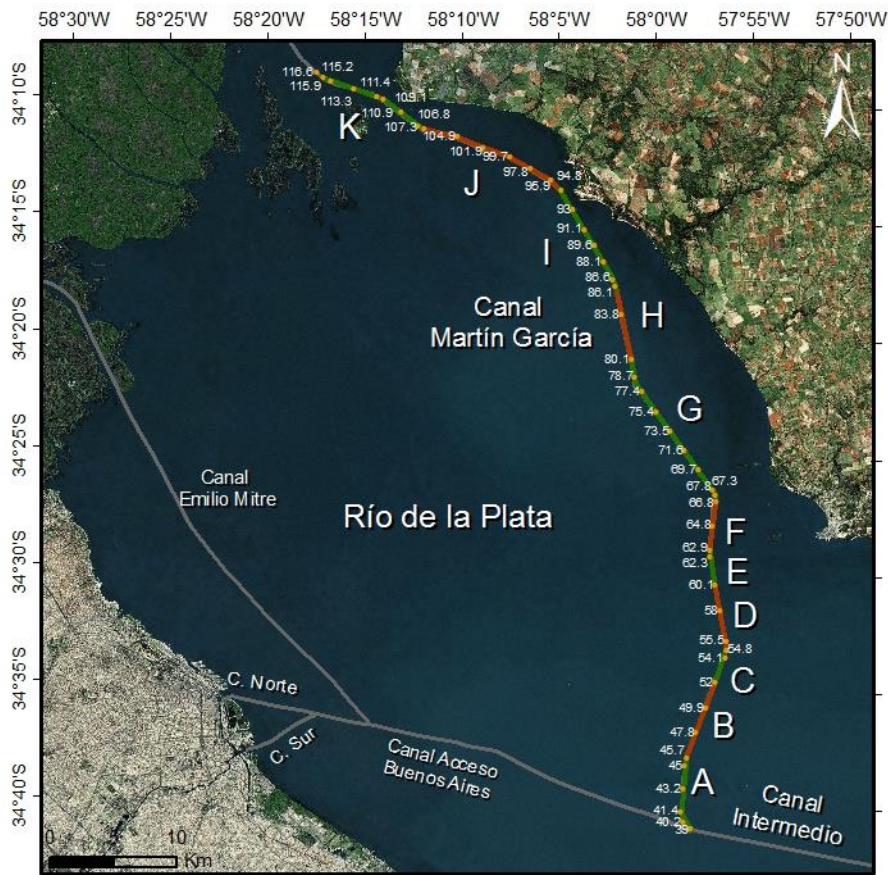


Figura 1.- Canales de Martín García.

La sedimentación en canales de navegación dragados, si bien está condicionada por las condiciones hidrodinámicas del río, está principalmente forzada por los cambios hidrodinámicos locales generados por la construcción del canal. En situaciones como las del problema a resolver, en las cuales lo predominante es el transporte de material fino en suspensión, el canal genera un ‘efecto trampa’, con el cual se captura una parte significativa de esa carga sedimentológica de lavado. La ocurrencia de aportes extraordinarios de carga de lavado es entonces lo que puede generar tasas de sedimentación extraordinarias.

En base a esta conceptualización, el estudio se basó en un modelo numérico hidrodinámico y de transporte de sedimentos suspendidos del Río de la Plata Interior, combinado con modelos locales de sedimentación en canales de navegación para distintos tramos del Canal Martín García.

SEDIMENTACIÓN OBSERVADA

Se dispuso de datos de sucesivos relevamientos batimétricos, y de volúmenes dragados por fecha y por kilómetro. Para los tramos y períodos entre relevamientos en que se detectó incremento del nivel del fondo, se calculó la sedimentación efectiva en cada uno efectuando la diferencia entre el incremento de volumen y el volumen dragado, y dividiendo por el período de tiempo.

La mayor sedimentación se observa (Figura 2) en los tramos de Barra del Farallón y Paso del

Farallón entre los kilómetros 39 y 75 (tramos A a G) coincidente con el cruce del canal de la costa uruguaya a la costa argentina.

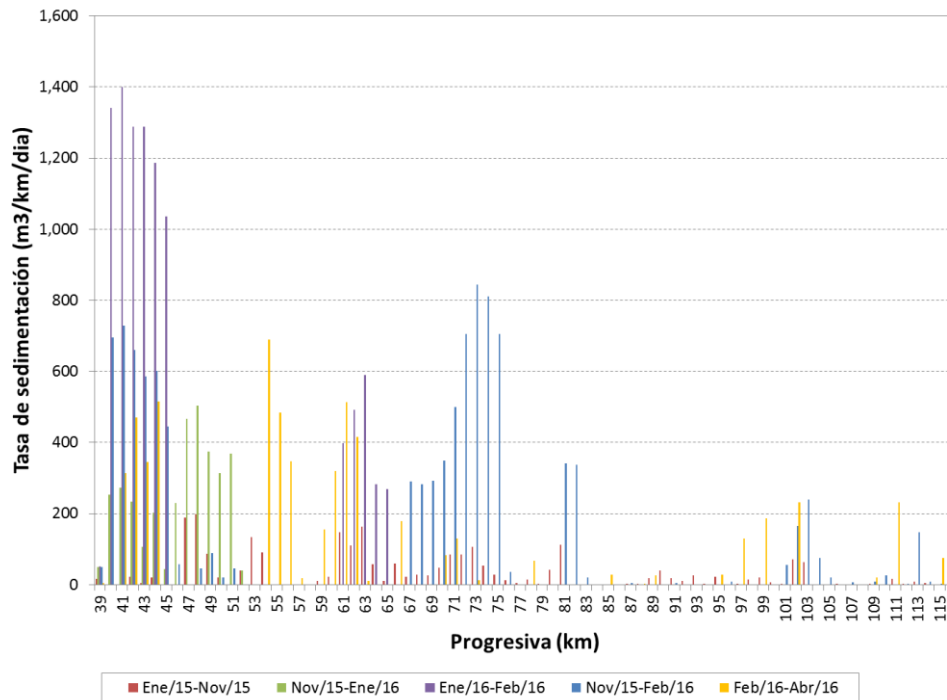


Figura 2.- Tasa de sedimentación obtenida de la diferencia entre el incremento de volumen y el volumen dragado, dividido por el tiempo entre relevamientos.

MODELO DEL RÍO DE LA PLATA

Se utilizó un modelo hidrodinámico bidimensional del Río de la Plata Interior previamente desarrollado y validado, basado en el software MOHID (Re et al., 2013). Sobre este modelo se montó el de transporte de sedimentos suspendidos, imponiéndose como condición de borde la concentración de sedimento en los tributarios (el río Uruguay y los distintos brazos del río Paraná).

El dominio de modelación abarca prácticamente todo el Río de la Plata Interior, llegando hasta la línea imaginaria Punta Piedras (Argentina) – Punta del Tigre (Desembocadura del río Santa Lucia, Uruguay). Sus dimensiones son de 210 km x 98 km. Fue discretizado con un paso espacial de 1 km en ambas direcciones, resultando 210 celdas en la dirección x y 98 en la dirección y .

Los principales forzantes del movimiento son la marea oceánica y el aporte de los tributarios, los cuales fueron implementados como condiciones de borde. La onda de marea oceánica se especifica en la línea Punta Piedras – Punta del Tigre, a partir de resultados provistos por el modelo regional RPP2D (Re y Menéndez, 2003).

El aporte de los tributarios se materializa como ingresos de caudal en la cabecera del Río de la Plata, habiéndose representado las bocas de los ríos Uruguay, Sauce - Paraná Bravo, Paraná Guazú, Paraná Mini, Paraná de las Palmas, Barca Grande y Luján. Las series temporales de caudales de los ríos Uruguay y Paraná fueron obtenidos de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación). A partir del caudal del

río Paraná, los correspondientes a sus diversos brazos se obtuvieron a través de un esquema de partición establecido (Bombardelli, 1995) y el río Luján con un caudal constante de 15 m³/s.

Se impuso como condición de borde del modelo sedimentológico la concentración de sedimento suspendido en los tributarios. Dado que el efecto de deposición natural de sedimento sobre la concentración de sedimento en suspensión es relativamente débil frente al de difusión, no se consideró deposición del sedimento.

MODELO DE SEDIMENTACIÓN EN CANALES

El modelo de sedimentación en canales de navegación es de tipo bidimensional en corte, con un volumen de control constituido por un tubo de flujo. Se utilizó el código numérico DRAGA modificado para resolver el transporte y sedimentación en suspensión de arenas finas. El modelo resuelve el perfil de velocidades vertical mediante un modelo paramétrico y el transporte de sedimentos suspendidos mediante una técnica de elementos finitos (Menéndez, 1994; Re et al., 2014).

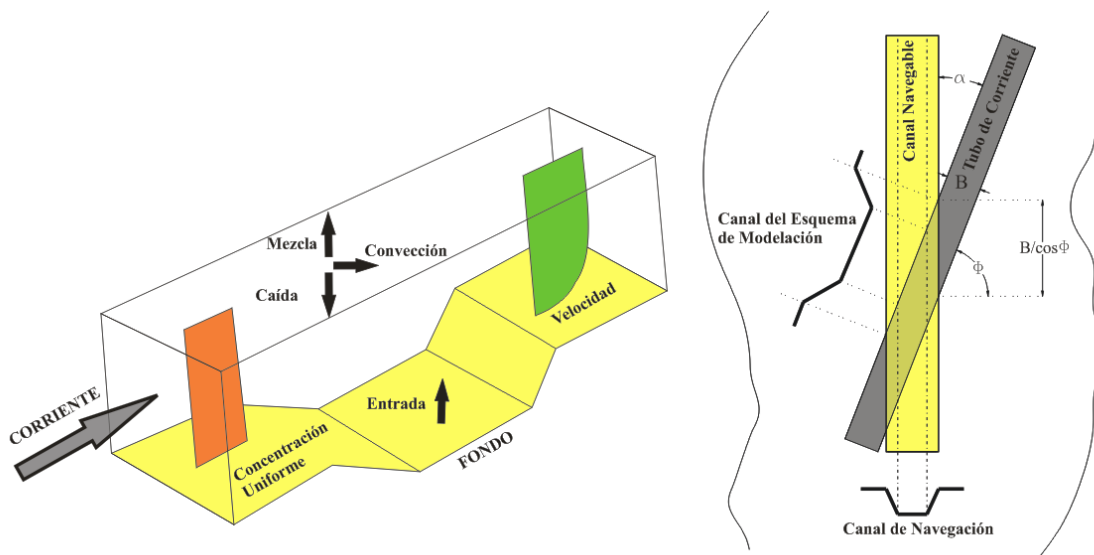


Figura 3.- Volumen de control para el modelo de sedimentación en canales.

Sobre la superficie libre se impone flujo de sedimento nulo, mientras que en la superficie de entrada del volumen de control se considera un perfil constante para la concentración. Conocida la concentración, el caudal sólido de sedimento suspendido se calcula integrando numéricamente su flujo sobre toda la sección transversal. El modelo de evolución del lecho es la ecuación de Exner.

$$\frac{\partial(b \cdot z_f)}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \cdot \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

donde b es el ancho del tubo de flujo, z_f es el nivel del lecho, p es la porosidad y Q_s el caudal sólido suspendido.

La sedimentación se evalúa con el factor de Krone (van Rijn, 1993):

$$T_d = \begin{cases} 1 - \left(\frac{u_*}{u_{*cr,d}} \right)^2 & \text{si } u_* < u_{*cr,d} \\ 0 & \text{si } u_* \geq u_{*cr,d} \end{cases} \quad (2)$$

donde u_* es la velocidad de corte, y $u_{*cr,d}$ su valor crítico de deposición. Nótese que $0 \leq T_d \leq 1$; un valor de T_d cercano a 0 significa escasa sedimentación, mientras que un valor cercano a 1 indica sedimentación cercana a la máxima tasa potencial. A partir de estudios antecedentes (Menéndez y Castellano, 2000) se ha establecido para esta zona un valor $u_{*cr,d} = 0,8$ cm/s. El factor de Krone afecta la tasa máxima potencial de sedimentación, que es el producto de la concentración de sedimento en suspensión y la velocidad de caída correspondiente a su diámetro medio, y constituye la parte de la tasa de sedimentación más directamente afectada por la hidrodinámica.

El dominio de cada modelo incluye todo el ancho del canal de navegación y una porción del explayado hacia cada lado (aguas arriba y aguas abajo). Los datos de entrada de cada modelo son los siguientes:

- Condiciones geométricas: Ancho de solera, profundidad del explayado, profundidad del canal, taludes.
- Condiciones hidrodinámicas: Intensidad de la corriente, dirección de la corriente respecto del eje del canal, altura y período de ola significativa.
- Condiciones sedimentológicas: Diámetro medio del grano, porosidad, concentración en el explayado, tensión crítica de deposición.

Las condiciones geométricas están definidas por el canal de diseño, que tiene algunas variaciones a lo largo de la ruta de navegación, y por el MDE del fondo obtenido de los relevamientos batimétricos. La altura de ola significativa se fijó en base a los resultados de Fossati (2013). El período significativo de olas fue tomado como la mediana de la distribución obtenida de mediciones efectuadas frente a la costa de Buenos Aires, que dio 3,4 segundos.

Las condiciones hidrodinámicas de nivel y velocidad surgen del modelo hidrodinámico del Río de la Plata, y dependen del escenario hidrológico adoptado. La velocidad de la corriente durante un ciclo de mareas (12 horas) se esquematizó como un pulso de flujo y otro de refluo, cada uno con su intensidad, dirección y duración relativa. La intensidad se estableció como su valor 'efectivo', determinado como el 70% del valor pico.

El tamaño medio de grano de sedimento en suspensión es de alrededor de $10 \mu\text{m}$ (Simionato et al., 2011). La velocidad de corte crítica de deposición (relacionada a la tensión de corte) ha sido establecida en 8 mm/s (Re et al., 2013). Los depósitos recientes de sedimentos finos conforman barros, por lo que su porosidad se fijó en 0,75 (van Rijn, 1993). La concentración depende del escenario hidrológico adoptado y obtenido del modelo hidrodinámico.

Para su implementación, el canal de navegación se particionó en 11 segmentos -A a K (Figura 1)- con condiciones geométricas, hidrodinámicas y sedimentológicas relativamente homogéneas.

CÁLCULO DE SEDIMENTACIÓN

La sedimentación en los canales de Martín García está básicamente determinada por el aporte sedimentario del río Paraná. El principal contribuyente a la carga de sedimento en suspensión del río Paraná es el río Bermejo. La Figura 4 muestra el caudal del río Paraná (en la ciudad de Paraná) desde enero de 2014 a abril de 2016. Se observa el pulso de crecida extraordinaria (por intensidad y duración) que tuvo lugar durante enero de 2016.

La Figura 4 también muestra la serie temporal de concentración de sedimentos del río Bermejo (en la estación El Colorado). Se observa que durante el período del pulso extraordinario del río Paraná también se produjo el aporte de la carga sedimentaria proveniente de aquel río.

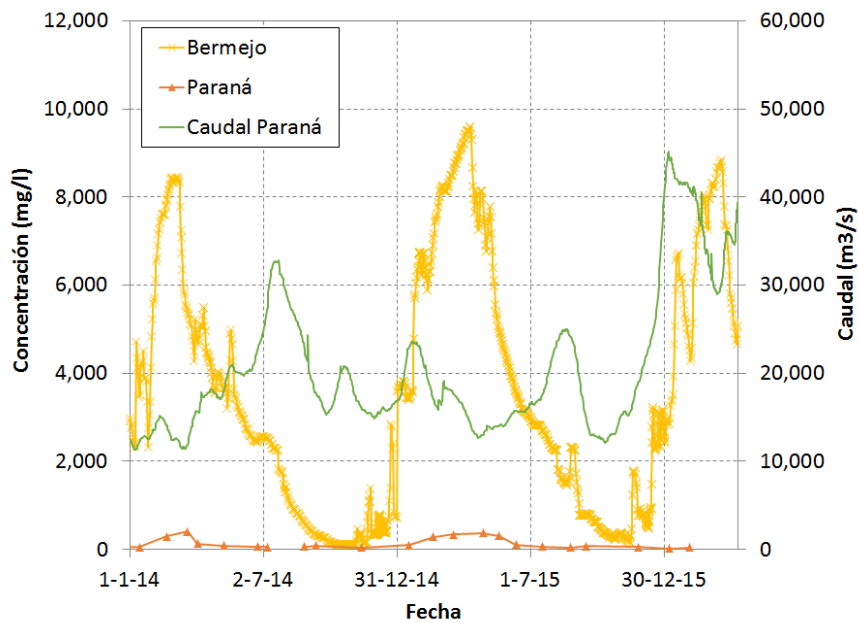


Figura 4.- Series temporales de caudal y concentración de sedimento en suspensión.

Como una suerte de corroboración, en la Figura 5 se presenta una imagen LANDSAT 8 del Río de la Plata Superior correspondiente al 24 de febrero de 2016, donde se distinguen trazas correspondientes a los trenes de camalotales inyectados por los distintos brazos del Paraná. Se observa que estos impactan sobre toda la traza de los Canales de Martín García.



Figura 5.- Trayectorias de camalotes durante enero de 2016 coincidente con la crecida del río Paraná.

Se efectuaron simulaciones con el modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos para determinar cómo impactan las distintas condiciones hidrosedimentológicas. En la Figura 6 se muestran los resultados de la concentración relativa de sedimentos para condiciones hidrológicas normales y de crecida del río Paraná. Se observa que para el segundo se generan concentraciones mucho más significativas sobre los canales de Martín García.

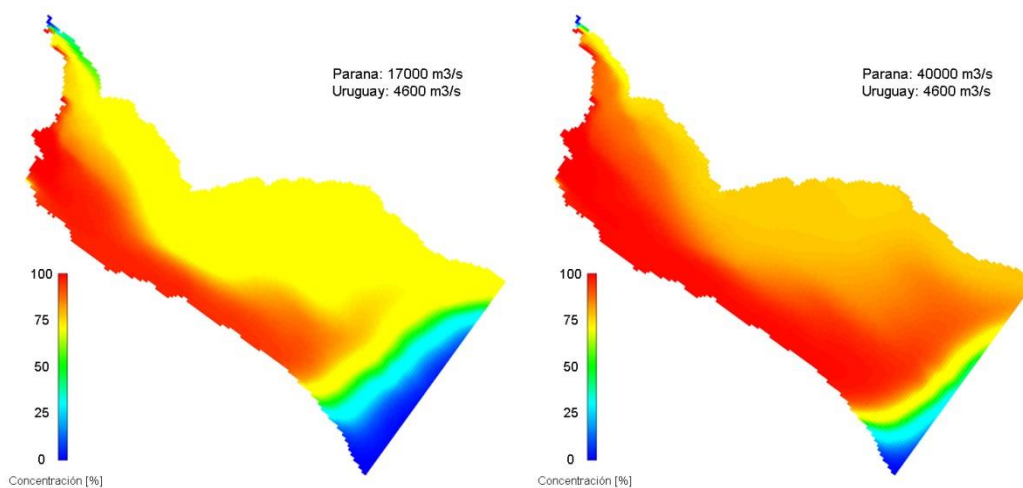


Figura 6.- Distribución de concentración relativa de sedimento en suspensión para condiciones normales (izquierda) y de crecida del río Paraná (derecha).

Téngase en cuenta que el análisis efectuado corresponde a concentraciones relativas a la del río Paraná, por lo que las concentraciones absolutas pueden variar significativamente entre

escenarios una vez que se fijan las condiciones sedimentológicas (concentraciones en los ríos).

En la Figura 7 se muestran las tasas de sedimentación observadas para cada segmento, donde se identifican distintos períodos:

- Nov/15-Ene/16: Sedimentación Normal, para condiciones hidrosedimentológicas normales.
- Ene/16-Feb/16: Sedimentación Extraordinaria, para condiciones hidrosedimentológicas extraordinarias.
- Nov/15-Feb/16: Sedimentación Media Normal/ Extraordinaria (valor medio entre las dos anteriores), para segmentos sin relevamiento intermedio.
- Feb/16-Abr/16: Sedimentación Post Extraordinaria, para condiciones hidrodinámicas normales pero sedimentológicas aún extraordinarias.

Se aplicó el modelo de sedimentación en canales al escenario de Sedimentación Normal, usando la concentración media de sedimento en suspensión del río Paraná para esa época (60 mg/l) y las diluciones del escenario hidrológico normal, resultando las tasas mostradas en la Figura 7. Se observa que ellas son consistentes con las observadas en los tramos A y B. El volumen total sedimentado a lo largo de toda la ruta resultó de 287.860 m³/mes, que difiere en menos de 1% del volumen determinado en base a relevamientos para el período 2008-2012. Esto se consideró como una validación del modelo, que no necesitó ser calibrado.

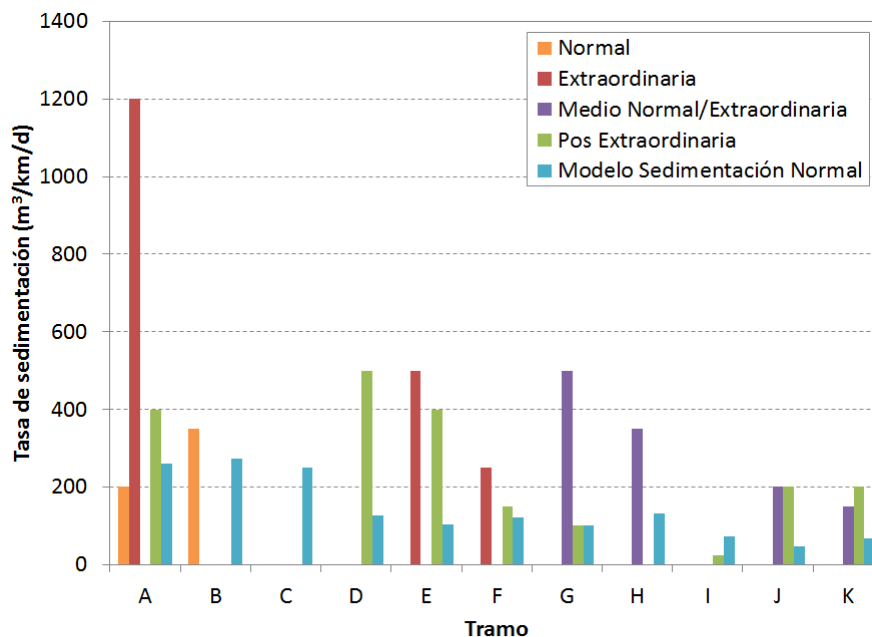


Figura 7.- Tasas de sedimentación observada para los distintos períodos y calculada para escenario de sedimentación normal.

En la Figura 8 se presenta la relación entre las concentraciones de sedimento en suspensión de los ríos Bermejo y Paraná. Se observa que hasta concentraciones del Bermejo de aproximadamente 3.000 mg/l, las concentraciones del Paraná prácticamente no varían, manteniéndose en valores alrededor de 60 mg/l. A partir de ese umbral se produce un

incremento de la concentración del Paraná, aunque la correlación es pobre para concentraciones del Bermejo por encima de 4.000 mg/l. Esto último se puede deber a dos causas: (1) la concentración de sedimentos suspendidos del río Paraná incluye las arenas; (2) en situaciones de crecida del Paraná este también trae carga sedimentaria de otras subcuencas (Re et al., 2009).

Se consideró que la envolvente inferior de los puntos de la Figura 8 para concentraciones del Bermejo superiores a 3.000 mg/l, representa la influencia de la carga del Bermejo. Entonces a 6.000 mg/l (concentración media durante enero/febrero de 2016) le corresponde una concentración en el Paraná de 200 mg/l. Si se le descuentan 50 mg/l de carga de arenas en suspensión, se concluye que la carga de finos proveniente del Bermejo para el escenario extraordinario fue del orden de 150 mg/l. Sin embargo, se necesitan 250 mg/l para explicar la sedimentación ocurrida en los canales de Martín García durante enero/febrero de 2016, utilizando las diluciones correspondientes al escenario hidrológico de crecida del Paraná, tal como se observa en la Figura 6. El incremento del orden de 100 mg/l debe provenir entonces desde el río Paraguay y el Alto Paraná, es decir, es el fruto de la crecida extraordinaria, que es lo que se quería establecer.

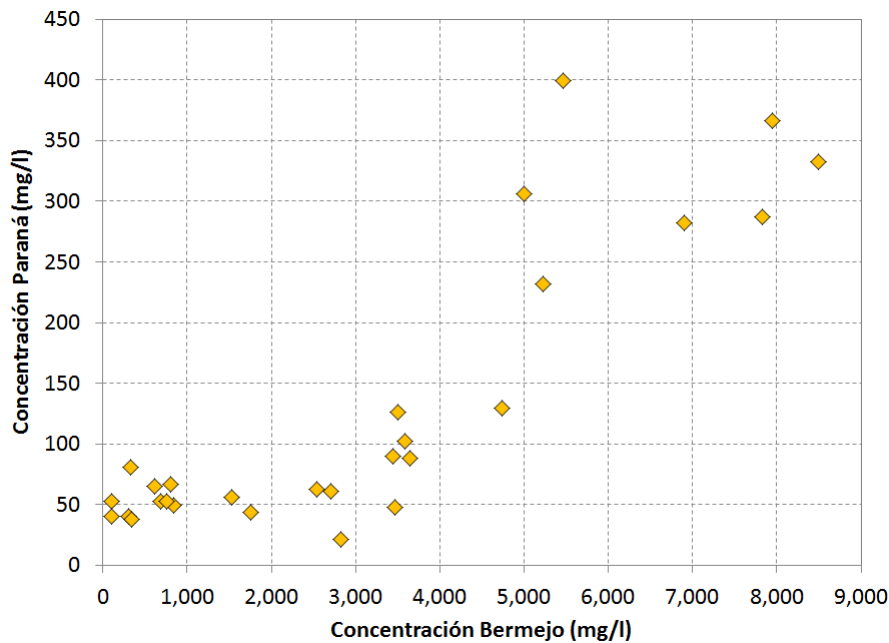


Figura 8.- Correlación entre concentraciones de sedimento en suspensión de los ríos Paraná y Bermejo para el período agosto 2013 – marzo 2016.

Finalmente, el volumen total sedimentado a lo largo de toda la ruta resulta de 1.183.800 m³/mes, es decir, representa un incremento de 310% respecto de la sedimentación normal observándose que estas son consistentes con los datos del período de sedimentación extraordinaria, y tienden a ser mayores que las tasas correspondientes a los períodos de Media Normal/Extraordinaria y Post Extraordinaria, de acuerdo con lo esperado.

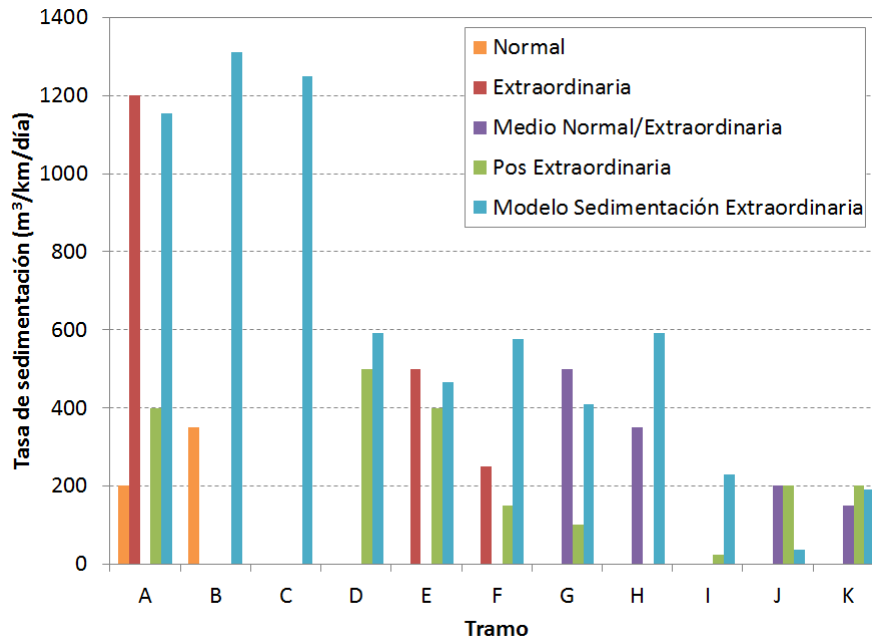


Figura 9.- Tasa de sedimentación calculada para escenario de sedimentación extraordinaria.

CONCLUSIONES

Se ha estudiado el problema de la sedimentación en los Canales de Martín García utilizando un sistema de modelación numérica. Este sistema consiste en un modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos del Río de la Plata Interior, el cual provee datos para forzar un modelo numérico de sedimentación en canales de navegación.

Se ha utilizado toda la información disponible sobre los trabajos de dragado llevados a cabo, incluyendo los relevamientos batimétricos periódicos empleados para determinar el dragado efectivo y los datos de volúmenes dragados, de modo de estimar tasas de sedimentación en distintos tramos (11 en total) para distintos períodos de tiempo.

La aplicación del sistema de modelación a un escenario de condiciones hidrosedimentológicas normales proveyó tasas de sedimentación por tramo compatibles con las que surgen de las observaciones, y una tasa total de volumen sedimentado prácticamente coincidente con la informada por la CARP para el período 2008-2012.

Durante enero/febrero de 2016 se experimentó el pasaje de un pulso de crecida extraordinaria (por intensidad y duración) del río Paraná. Simultáneamente se produjo el arribo de un pulso de alta concentración de sedimentos en suspensión proveniente del río Bermejo. La aplicación del sistema de modelación para representar estas condiciones indicó que esta combinación, por sí misma, no puede explicar la elevada tasa de sedimentación observada para este período, sino que es necesario suponer que existe un aporte extra de carga de sedimento en suspensión asociada a la crecida extraordinaria del río Paraná. Admitiendo esa carga extra, entonces sí pueden explicarse las tasas por tramo observadas, y estimarse la tasa de volumen sedimentado asociada a este período, que resulta un 310% superior a la normal.

Condiciones similares de sedimentación extraordinaria se produjeron durante abril de 2016, asociadas a un segundo pulso de crecida extraordinaria del río Paraná. Estas crecidas

extraordinarias están asociadas a una condición climática descripta como Niño Fuerte (SMN, 2016) que se ha desarrollado durante el año 2015, y que puede servir como antecedente para tener en cuenta en situaciones futuras

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bombardelli, F.A, Menéndez, A.N., Brea, J.D., Lapetina, M.R., Uriburu Quirno, M. (1995): “Estudio hidrodinámico del Delta del Río Paraná mediante modelación matemática”, Informe LHA-INCYTH 137-03-95.

Fossati, M. (2013): “Dinámica Global de Sedimentos Finos en el Río de la Plata”, Tesis de Doctorado en Ingeniería de la Universidad de La República, Uruguay, febrero de 2013.

Menéndez, A.N. (1994): “Simulación numérica de la sedimentación en canales de navegación”, *Información Tecnológica - Revista Latinoamericana*, Vol. 5, N° 4.

Menéndez, A.N., Castellano, R. (2000): “Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island”, 4th International Conference HydroInformatics 2000, Cedar Rapids, Iowa, USA, July.

Re, M., Menéndez, A.N. (2003): “Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo”, Informe INA-LHA 03-216-03.

Re, M., Menéndez, A.N., Amsler, M. (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, RIOS 2009, Salta, Argentina, noviembre de 2009.

Re, M., García, P.E., Lecertúa, E.A., Menéndez, A.N. (2013): “Hydraulic Impact Studies on the Coastal Zone of Buenos Aires City”, Ocean modeling for coastal management – Case studies with MOHID, M. Mateus and R. Neves (eds.), IST Press.

Re, M., Kazimierski, L.D., Menéndez, A.N. (2014): “Sedimentation in navigation channels under the context of climate change”. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, Vol. V, No. 1, January-February, 2014, pp. 5-21.

Simionato, C., Moreira, D., Piedra-Cueva, I., Fossati, M., Re, M., Sabarots Gerbec, M., Menéndez, A.N., Cayocca, F. (2011): “Proyecto FREPLATA – FFEM Modelado numérico y mediciones in situ y remotas de las transferencias de sedimentos finos a través del Río de la Plata. Parte b: Simulaciones numéricas, Frente Marítimo”, Publicación de la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo, Vol. 22, 265 - 304.

SMN (2016): “Aspectos más salientes del estado del fenómeno El Niño y su impacto actual y perspectiva para los próximos meses”. Servicio Meteorológico Nacional. 8 de enero de 2016.

van Rijn, L.C. (1993): “Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas”, Aqua Publ.