

# SEDIMENTACIÓN EN CANALES DE NAVEGACIÓN EN EL CONTEXTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO

• Mariano Re\* •

*Instituto Nacional del Agua, Argentina*

\*Autor de correspondencia

• Leandro D. Kazimierski • Ángel N. Menéndez •

*Universidad de Buenos Aires, Argentina*

## Resumen

RE, M., KAZIMIERSKI, L.D. & MENÉNDEZ, A.N. Sedimentación en canales de navegación en el contexto del cambio climático. *Tecnología y Ciencias del Agua*. Vol. V, núm. 1, enero-febrero, 2014, pp. 5-21.

Se utiliza una metodología de modelación numérica de la sedimentación en canales de navegación para evaluar efectos del cambio climático a través de la consideración de cambios potenciales en el caudal del río. Esta metodología, que se explica en detalle, se ilustra mediante su aplicación a un paso del río Paraná (Argentina), validándose sus resultados con datos de dragado de mantenimiento. Se muestra que si se mantuvieran las actuales cotas de dragado, el volumen sedimentado crecería con el incremento de caudal y viceversa, con tasas relativas de variación significativamente mayores que la del caudal, en valor absoluto. Si, en cambio, se ajustaran las cotas de dragado a nuevos niveles de referencia, la tendencia sería opuesta, con tasas relativas de variación de la sedimentación sólo moderadamente superiores a las de caudal, en valor absoluto.

**Palabras clave:** sedimentación, canales de navegación, dragado, cambio climático, río Paraná.

## Introducción

El cambio climático produce una serie de consecuencias sobre la navegación en ríos. Los cambios en la precipitación sobre una cuenca hidrográfica alteran la ocurrencia de condiciones hidrológicas extremas y, de manera indirecta, modifican la navegabilidad (PIANC, 2008). El cambio climático también puede forzar alteraciones en la morfología de los ríos (por variaciones en los procesos de erosión y sedimentación), en la maniobrabilidad de los buques y en la eficiencia operacional de las estructuras de navegación (Hawkes *et al.*, 2010).

## Abstract

RE, M., KAZIMIERSKI, L.D. & MENÉNDEZ, A.N. 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.

A numerical modeling methodology for sedimentation in navigation channels is used to evaluate effects of Climate Change, through consideration of potential changes in the river discharge. This methodology, which is explained in detail, is illustrated through its application to a 'paso' of the Parana River (South America), validating its results with maintenance dredging data. It is shown that, keeping the present dredging elevations, the sedimentation volume would increase with the increment in discharge, and vice versa, with relative rates of change significantly larger than that of the discharge. If, on the contrary, the dredging elevations were adjusted to new reference levels, the trend would be the opposite, with relative rates of change only moderately larger than that of the discharge, in absolute value.

**Keywords:** sedimentation, navigation channels, dredging, Climate Change, Paraná River.

Los antecedentes de evaluación de impactos del cambio climático sobre la navegación se han centrado de manera principal en la determinación de las variaciones en los niveles de agua debido a modificaciones en las variables hidrológicas de la cuenca (Sung *et al.*, 2006; De Wit *et al.*, 2007; Millerd, 2011). En menor medida, se ha abordado el problema de cambios en la morfología de la ruta (Verhaar *et al.*, 2010).

En este trabajo se presenta una metodología para evaluar posibles variaciones en el dragado de mantenimiento de canales de navegación en el contexto del cambio climático. Ella se ilustra mediante su aplicación al río Paraná (Argentina),

de fondo arenoso, que constituye una porción de la ruta de navegación, donde se concentra gran parte de la exportación agrícola local y el mayor tráfico siderúrgico argentino.

La ruta de navegación para buques oceánicos sobre el río Paraná, a lo largo de 544 km del tramo argentino, es naturalmente navegable en la mayor parte de su recorrido. Los problemas de falta de calado se producen en zonas localizadas, que constituyen los denominados pasos, sobre los cuales deben dragarse canales de navegación artificiales. La tendencia natural a la deposición de sedimentos en estos canales obliga a periódicas y sistemáticas operaciones de dragado de mantenimiento. El volumen anual de dragado de mantenimiento constituye un indicador vital para determinar la viabilidad económica de garantizar un determinado calado.

Ahora bien, en la Cuenca del Plata (de la cual el río Paraná es su principal curso de agua) existen claras manifestaciones de tendencias climáticas e hidrológicas vinculadas con el cambio climático (Barros *et al.*, 2006), las cuales tienen impacto sobre la sedimentación en los canales de navegación. Establecer la probable variación del dragado de mantenimiento en ese contexto de cambio es, entonces, un ejercicio de gran relevancia para la gestión. Se ha escogido como tramo de análisis del río Paraná, a título de ilustración de la metodología, el correspondiente al Paso Borghi (figura 1), cercano a la ciudad de Rosario (Argentina), que constituye uno de los pasos críticos más relevantes.

## Metodología

### Modelo

En este trabajo, la sedimentación en el canal de navegación se calcula mediante un modelo 2D-V, implementado en el código numérico AGRADA, desarrollado en el Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina (Menéndez, 1992, 1994; Kazimierski *et al.*, 2012). El modelo, que toma como plano de análisis el alineado con la corriente, consta de un módulo hidrodinámico,

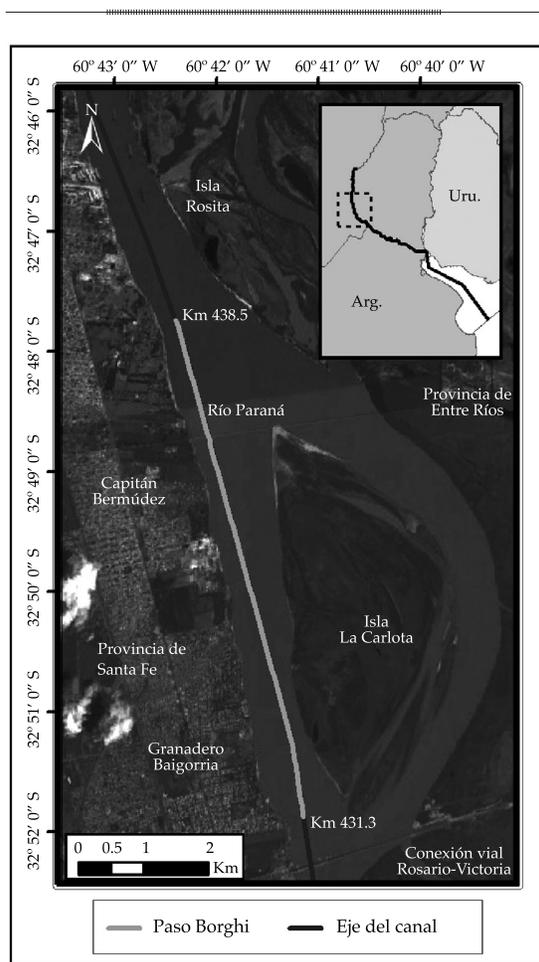


Figura 1. Zona de estudio.

uno de transporte de sedimento de fondo, otro de transporte de sedimento en suspensión, y un módulo de evolución morfológica. En la figura 2 se esquematiza el volumen de control sobre el que se plantean las ecuaciones de conservación. Para establecer la orientación e intensidad de la velocidad de la corriente incidente sobre el canal, que determinan la orientación del volumen de control y la condición de borde de aguas arriba para el modelo 2D-V, respectivamente, se utiliza un modelo hidrodinámico 2D-H para la región de desarrollo del canal de navegación, implementado en el código numérico HIDROBID II, también desarrollado en el INA (Menéndez, 1990). A continuación se describe brevemente el modelo de sedimentación en canales.

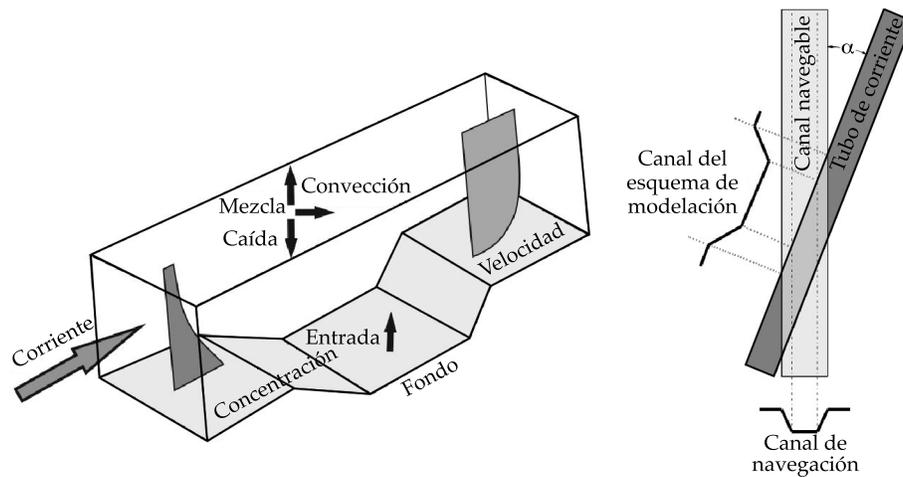


Figura 2. Volumen de control para el modelo 2D-V.

El modelo hidrodinámico resuelve los perfiles verticales de ambas componentes de la velocidad (horizontal y vertical), la distribución de la tensión de corte contra el fondo y el perfil vertical del coeficiente de mezcla turbulenta. Dado que las variaciones del nivel del fondo debido al proceso de sedimentación se producen sobre escalas de tiempo largas, comparadas con las hidrodinámicas, es posible suponer que las condiciones hidrodinámicas se adaptan de forma instantánea a esos cambios. El perfil vertical de la componente horizontal de la velocidad (eje  $x$ ) se plantea como una familia paramétrica de funciones, constituida por una componente logarítmica y otra de estela (van Rijn, 1987):

$$u(x, z) = A_1(x) \cdot \ln(z/z_0) \cdot u_h(x) + A_2(x) \cdot F(\eta) \cdot u_h(x)$$

donde  $z$  es la coordenada vertical medida desde el fondo;  $z_0$ , la altura del punto de velocidad nula;  $u_h$ , la velocidad en la superficie libre;  $A_1$  y  $A_2$ , parámetros locales (independientes de  $z$ );  $\eta$ , la coordenada vertical adimensional (varía entre 0 y 1, mientras  $z$  lo hace entre  $z_0$  y la altura de la superficie libre), y  $F(\eta) = 2\eta^t - \eta^{2t}$ , siendo  $t$  otro parámetro local. La componente de estela es necesaria porque

cuando se producen variaciones bruscas en el fondo, como es en este caso donde la corriente atraviesa un canal de navegación dragado, el perfil de velocidades vertical se aparta de las condiciones de equilibrio. Conocido el perfil de la componente horizontal de la velocidad, la distribución de la componente vertical  $w$  surge de integrar numéricamente la ecuación de continuidad sobre la vertical. La tensión de corte contra el fondo, por su parte, se calcula diferenciando el perfil vertical de velocidades. Para el coeficiente de mezcla también se plantea una distribución paramétrica (van Rijn, 1987).

Al atravesar el canal, las líneas de corriente sufren un efecto de refracción, que implica un cambio de dirección (mayor alineamiento con el canal) y de ancho (estrechamiento), que entonces produce un cambio de intensidad de la corriente. Este efecto se puede determinar con base en ábacos obtenidos de simulaciones numéricas (van Rijn, 1991). En la figura 3 se muestran los ábacos para el ángulo local entre la dirección de la corriente y el eje del canal, y para la relación entre la velocidad (media vertical) local y la incidente, en función de la relación entre la profundidad incidente y la local, para distintos ángulos de incidencia entre corriente y canal. La variación del ancho local

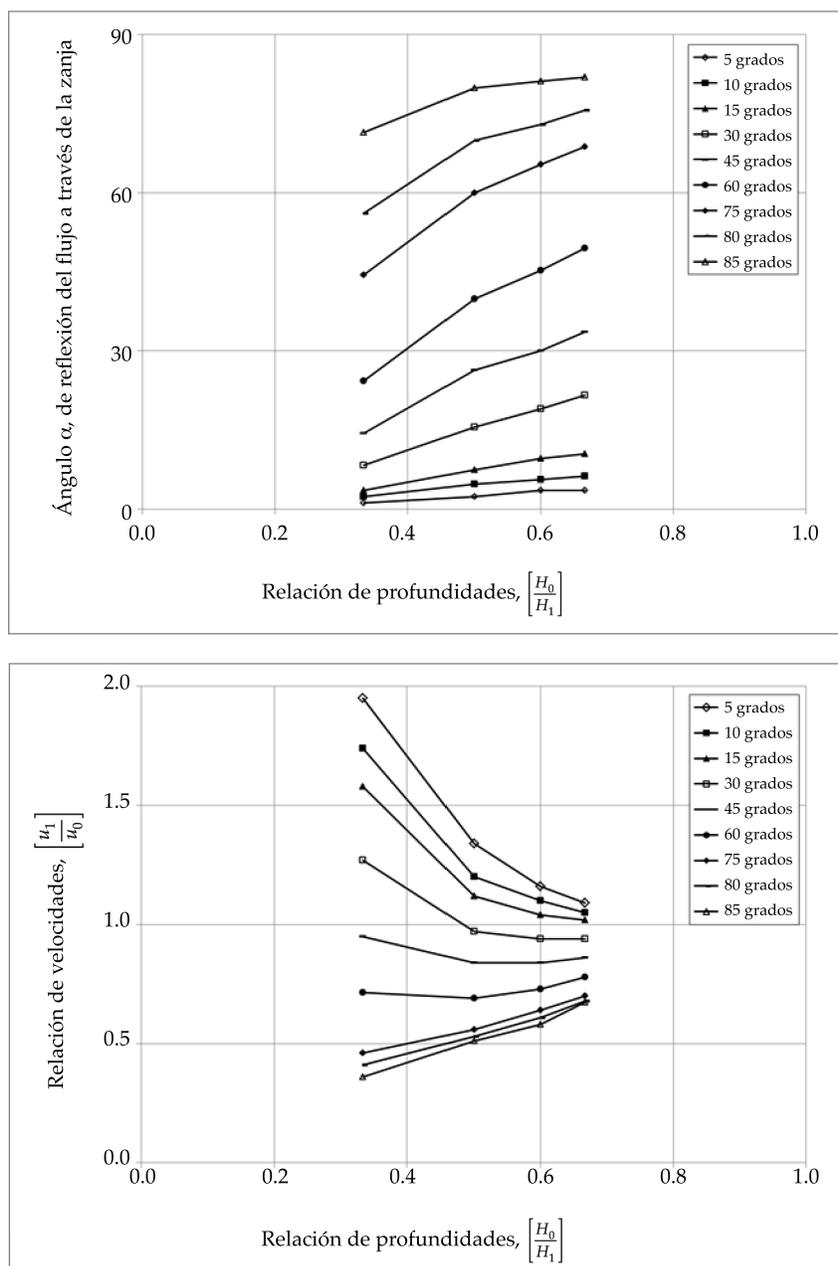


Figura 3. Ábacos para efectos de refracción: a) ángulo de refracción en función de la relación de profundidades; b) relación de velocidades en función de la relación de profundidades (van Rijn, 1991).

del volumen de control, respecto del ancho inicial, surge por continuidad.

La escala de tiempo asociada con el transporte de fondo es mucho menor que la hidrodinámica, por lo que puede considerarse que ese transporte se ajusta de manera

instantánea a las condiciones locales. Esto significa que no es necesario desarrollar una ecuación de evolución temporal del transporte de fondo, sino que basta con una fórmula. No obstante, dado que el perfil de velocidades no es el de equilibrio, es conveniente aplicar

una fórmula de transporte más general que las empleadas de forma usual. Se utiliza la siguiente formulación propuesta por van Rijn (1987) para el caudal sólido de sedimento no cohesivo transportado como carga de fondo ( $Q_{sf}$ ):

$$\frac{Q_{sf}}{b \cdot d_{50} \cdot (g \cdot d_{50})^{1/2}} = 0.053 \cdot \sqrt{\Delta} \cdot D_*^{-0.3} \cdot T_m^{2.1}$$

donde  $d_{50}$  es el diámetro medio de la partícula;  $D_*$ , el tamaño adimensional de la partícula;  $\Delta$ , su densidad relativa;  $b$ , el ancho del volumen de control;  $g$ , la aceleración de la gravedad, y  $T_m$  es el valor medio del denominado "parámetro de estado", que es el exceso de tensión de corte contra el fondo respecto del valor crítico para iniciación del movimiento, adimensionalizado con la desviación estándar de la distribución estadística de la tensión de corte.

El transporte de fondo sobre los taludes del canal no sigue de forma estricta la dirección de la corriente, ya que la acción de la gravedad incorpora una componente del peso hacia el centro del canal que genera una desviación. El ángulo de desviación se calcula con base en una fórmula propuesta por Fredsoe (1978), que depende de la inclinación del talud y el ángulo de fricción interna.

El modelo de transporte del sedimento en suspensión incluye la advección longitudinal (en la dirección de la corriente), la advección efectiva vertical y la difusión turbulenta según la vertical (van Rijn, 1987):

$$\frac{\partial(b \cdot u \cdot c)}{\partial x} + \frac{\partial(b \cdot (w - w_s) \cdot c)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( b \cdot \varepsilon_s \cdot \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

donde  $c$  es la concentración volumétrica de sedimento;  $w_s$ , la velocidad de caída del sedimento, y  $\varepsilon_s$  es el coeficiente de mezcla turbulenta en la dirección vertical. Esta ecuación se resuelve de forma numérica mediante el método de los elementos finitos

sobre una malla de elementos cuadrangulares. Como condición de borde en el fondo es común suponer una situación de equilibrio local, es decir, considerar que la deposición iguala a la resuspensión, de lo cual resulta una ecuación para la concentración de sedimento suspendido en ese punto; la fórmula resultante compatible con el tratamiento de van Rijn (1987) para transporte de fondo es la siguiente:

$$C_a = 0.03 \frac{d_{50}}{a} \frac{T_m^{1.5}}{D_*^{0.3}}$$

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 de equilibrio local para la concentración. Conocida la concentración, el caudal sólido de sedimento suspendido ( $Q_{ss}$ ) se calcula integrando numéricamente su flujo sobre toda la sección transversal.

El modelo de evolución del lecho es la ecuación de Exner (1925):

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

donde  $z_f$  es la cota de fondo;  $t$ , la coordenada temporal;  $p$ , la porosidad, y  $Q_s = Q_{sf} + Q_{ss}$  es el caudal sólido total. Esta ecuación se resuelve de modo numérico mediante un método de diferencias finitas, proveyendo, a partir de la distribución longitudinal del caudal sólido total, la variación de la cota del fondo.

### Información de base

El Paso Borghi se desarrolla (para la profundidad de dragado actual) entre las coordenadas de balizamiento km 431.3 y km 438.5 de la ruta que atraviesa el río Paraná (la coordenada es creciente hacia aguas arriba). Se contó con la información de relevamientos batimétricos y volúmenes de dragado en ese paso para el periodo del 12 de abril de 2008

al 12 de abril de 2009, provista por el Órgano de Control de Concesiones de Redragado y Señalización que opera bajo la órbita de la Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables (SSPyVN) del Gobierno Nacional.

En la figura 4 se presenta un esquema-síntesis de las operaciones de dragado de mantenimiento efectuadas durante el año de análisis, indicándose los segmentos (de 100 m de extensión) intervenidos en cada oportunidad y los volúmenes dragados en esos segmentos. Nótese que el dragado tiende a concentrarse en dos tramos: el Paso Borghi "Inferior" (km 431.3 - km 433.9) y el Paso Borghi "Superior" (km 436.8 - km 438.5). A partir de esos datos se determinó la tasa media anual de dragado en cada segmento, obteniéndose la distribución mostrada en la figura 5.

A fin de simplificar el análisis, cada uno de los dos tramos del Paso Borghi fue subdividido en subtramos, considerándose cuatro subtramos (números 1 a 4) para el Inferior (todos

de 500 m, habiéndose despreciado las intervenciones sobre el subtramo restante, de 600 m, denominado número 4\*), y tres subtramos (números 5 a 7) para el tramo Paso Borghi Superior (un subtramo de 800 m y los restantes dos de 500 m). En la misma figura 5 se representa la tasa media de dragado por subtramo.

Ahora bien, se supondrá que la tasa media anual de dragado de mantenimiento es representativa de la tasa media anual de sedimentación. Ésta se considera una hipótesis razonable, ya que no se cuenta con determinaciones directas de sedimentación.

Además, se determinó el tiempo entre dragados para cada segmento. En la figura 6 se muestra el promedio anual resultante por segmento. Se observa que 40 días es un periodo típico para buena parte del Tramo Inferior; en el resto resulta dominante un periodo en torno a 60 días, aunque también se distinguen periodicidades alrededor de los 90 días.

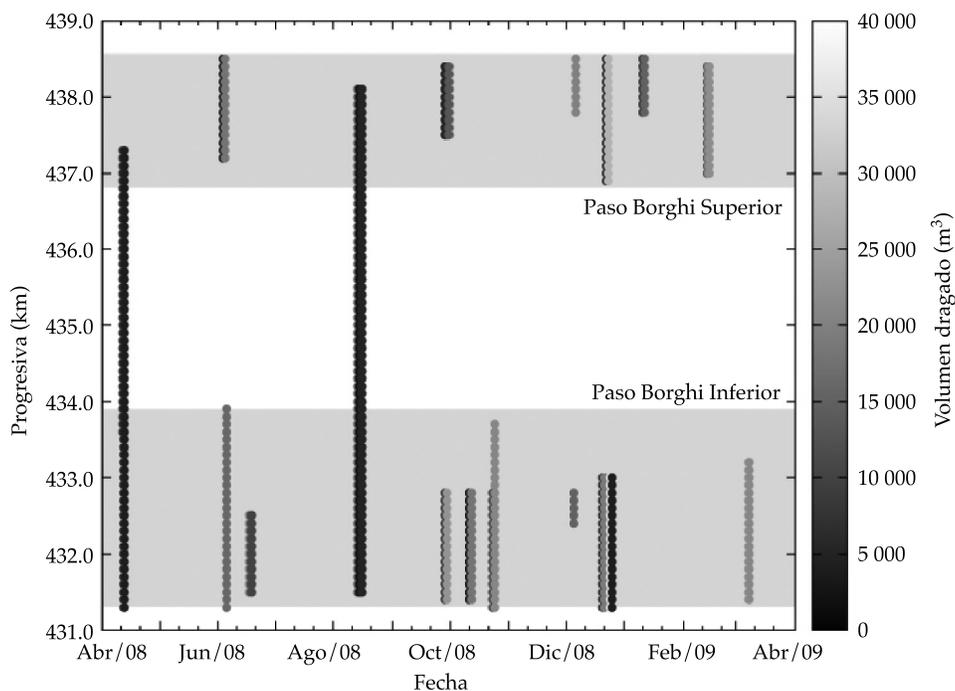


Figura 4. Fecha, localización y volumen de dragado de mantenimiento en segmentos de 100 m de extensión durante la temporada 2008-2009 en Paso Borghi.

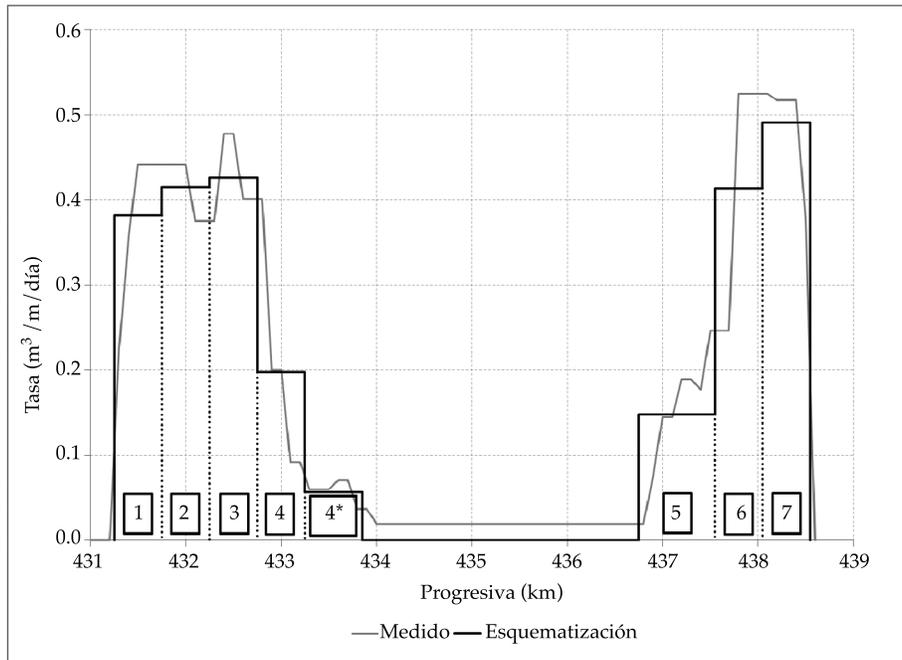


Figura 5. Distribución longitudinal de tasa media anual de dragado de mantenimiento durante la temporada 2008-2009 en Paso Borghi.

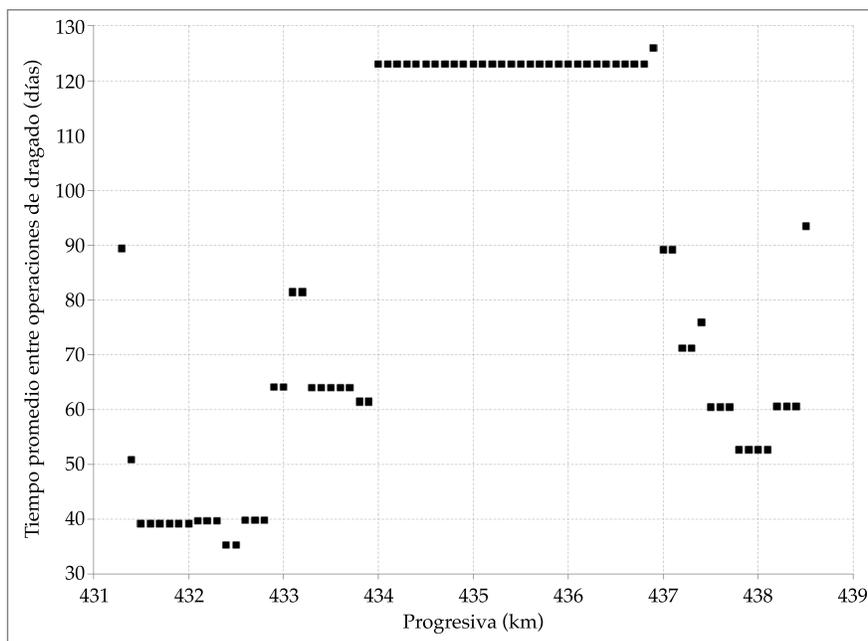


Figura 6. Periodicidad media entre dragados de mantenimiento durante la temporada 2008-2009 en Paso Borghi.

## Resultados y discusión

### Situación actual

Se implementó un modelo hidrodinámico 2D-H sobre un dominio que se extendió desde el km 452 de la ruta de navegación (es decir, 13.5 km aguas arriba del inicio del Paso Borghi) hasta la Conexión Vial Rosario-Victoria, km 430.0 (es decir, 1.3 km aguas abajo del fin del Paso Borghi), que es la zona mostrada en la figura 1. Se dispuso de información batimétrica de detalle, obtenida de una campaña de mediciones *ad hoc* (Guerrero et al., 2011), con base en la cual se construyó un Modelo Digital de Elevación (MDE) del fondo sobre una grilla con celdas cuadradas de 40 m de lado (el ancho del río es del orden de 1 000 m). Para la calibración del modelo hidrodinámico se utilizaron los datos de velocidades medidas con ADCP durante la misma campaña (del 29 de junio al 3 de julio de 2009). Estos fueron utilizados, además, para determinar el caudal del río por integración, arribándose a un valor medio espacio-temporal de 13 740 m<sup>3</sup>/s, el cual fue impuesto como condición de borde aguas arriba. Aguas abajo se fijó el valor del nivel de agua (1.82 m sobre el cero local). La calibración del modelo consistió en ajustar el valor del parámetro de rugosidad de Manning para el fondo,  $n$ , a fin

de obtener el mejor acuerdo posible con las velocidades de corriente medidas, resultando  $n = 0.025$  (incluye el efecto de resistencia de las dunas). En la figura 7 se muestra una de las comparaciones entre las velocidades medias verticales que surgen de las observaciones y de la simulación, observándose un acuerdo satisfactorio. Este modelo hidrodinámico es el que genera las condiciones de borde para el modelo hidrodinámico 2D-V (ver más abajo).

Se construyó un modelo de cálculo de sedimentación para cada uno de los subtramos definidos más arriba. A partir del conjunto de relevamientos periódicos de secciones transversales efectuados en Paso Borghi sobre el periodo de estudio, se estableció (luego de descartar algunos que mostraban inconsistencias) un perfil representativo para cada subtramo, esquematizado como el canal de navegación de diseño (ancho de solera de 116 m y taludes de 1V:5H, según lo indicado por la autoridad de navegación) y explayados horizontales a cada lado. Esto se muestra en la figura 8. Se observa que no resulta evidente la identificación del canal dragado en los perfiles relevados. Entonces, se estableció el siguiente criterio: como cota de explayado se tomó, para cada lado del canal, un nivel correspondiente aproximadamente al límite del tercio superior de los niveles registrados, mientras que como cota de fondo se seleccionó un nivel

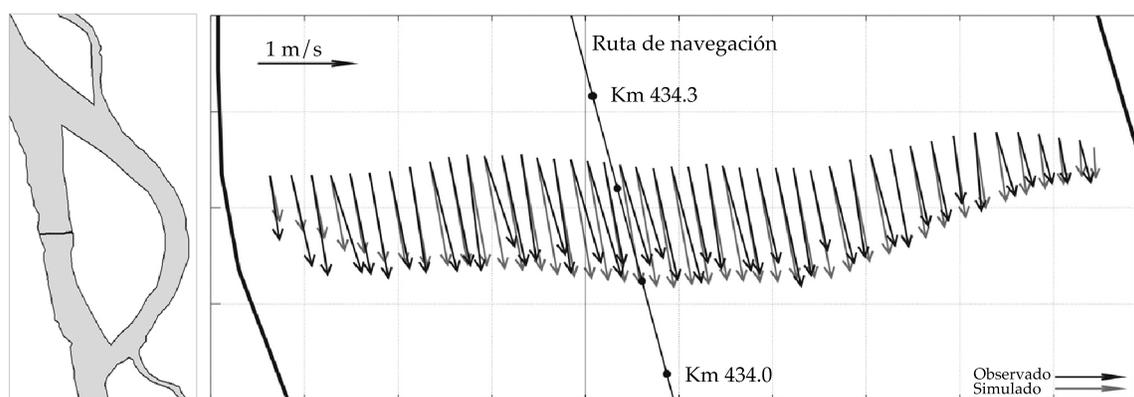


Figura 7. Velocidades observadas y simuladas en la validación del modelo 2D-H.

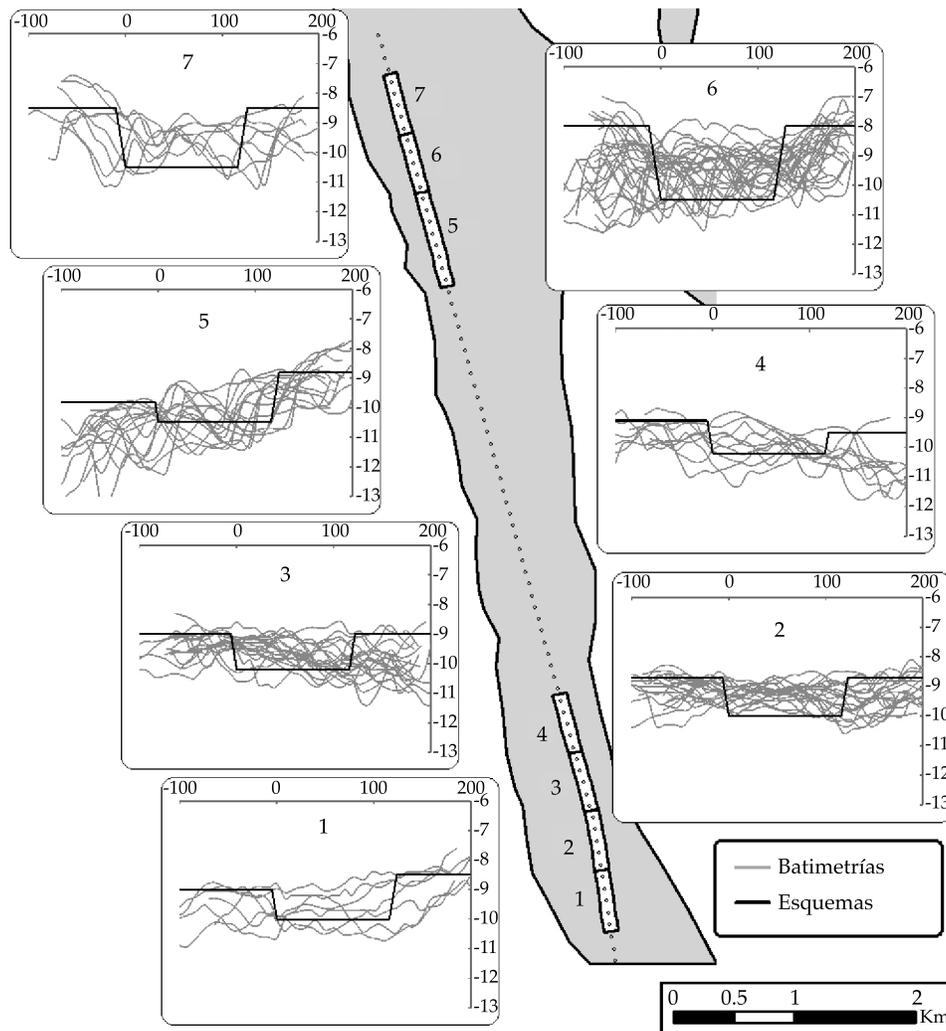


Figura 8. Esquemática de las secciones transversales dragadas de los subtramos.

representativo del límite del tercio inferior de los niveles registrados.

Para todos los modelos se adoptó una discretización vertical en 25 celdas, con alturas distribuidas de forma logarítmica, para tener una mayor resolución cerca del fondo. El dominio arranca 100 m aguas arriba del veril del canal (sección de encuentro entre el explayado y el talud) y se extiende hasta 300 m aguas abajo del siguiente veril. El paso de discretización longitudinal adoptado fue de 2 m.

Para el cálculo de la sedimentación media anual en el canal de navegación sobre el

periodo de estudio (del 12 de abril de 2008 al 12 de abril de 2009) se utilizó el correspondiente caudal medio anual, que resultó ser de 13 100 m<sup>3</sup>/s. Con base en los resultados del modelo hidrodinámico 2D-H para este caudal, se construyeron tubos de flujo cada 500 m<sup>3</sup>/s (figura 9). Para cada subtramo de canal se seleccionó uno de los tubos de flujo que lo atraviesan como representativo (esencialmente, el que pasa por la zona media del subtramo); este tubo provee las condiciones de incidencia para el volumen de control del modelo de sedimentación, a saber, su ancho, el nivel de agua y la orientación de la velocidad de la

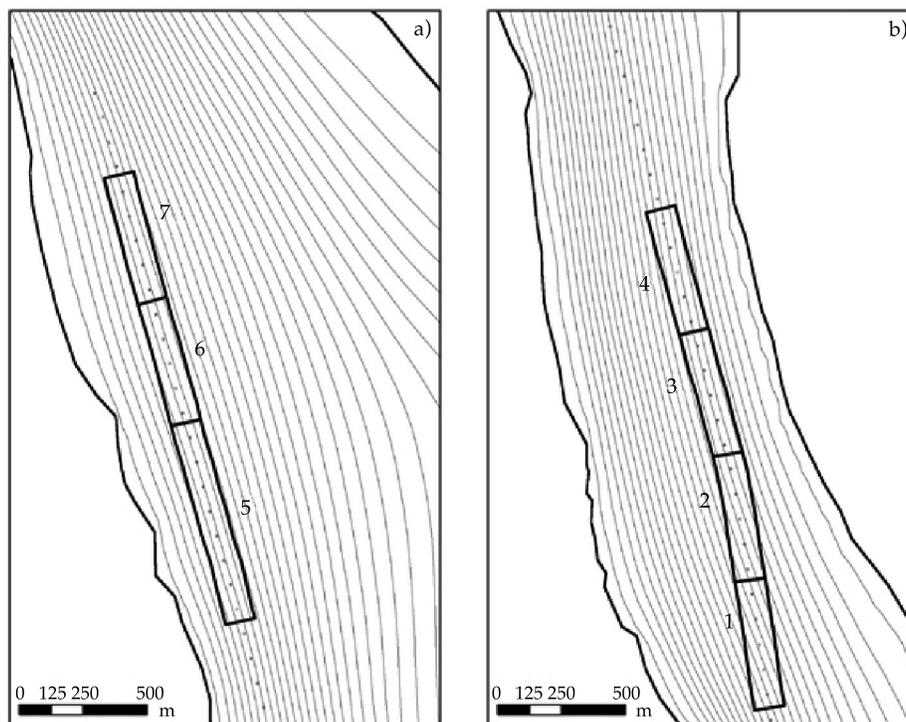


Figura 9. Tubos de flujo para caudal medio en a) Borghi Superior y b) Borghi Inferior. Se grafican los tubos cada 500 m<sup>3</sup>/s.

Cuadro 1. Valores de incidencia de los parámetros hidrodinámicos.

Núm.	Subtramo (km)	Caudal específico (m <sup>3</sup> /m/s)	Nivel sobre cero local (m)	Ángulo (°)
1	431.25 - 431.75	12.4	2.507	11.6
2	431.75 - 432.25	12.3	2.515	5.0
3	432.25 - 432.75	13.0	2.528	0.0
4	432.75 - 433.25	13.4	2.541	4.3
5	436.75 - 437.55	12.4	2.658	1.8
6	437.55 - 438.05	11.1	2.680	2.0
7	438.05 - 438.55	11.9	2.687	1.0

corriente respecto del eje del subtramo, con lo que quedan establecidos los valores de todas las variables hidrodinámicas para la modelación 2D-V, las cuales se indican en el cuadro 1.

El sedimento de fondo del río Paraná es arena. Si bien hay transporte en suspensión de material fino (carga de lavado), ésta sólo se deposita en dársenas, canales de acceso y zonas de maniobras de los puertos fluviales (Mangini et al., 2003). A partir de datos disponibles a lo

largo de la ruta de navegación (Menéndez, 2002) se impuso un tamaño medio de grano ( $d_{50}$ ) de 260  $\mu\text{m}$ . Éste tiene asociada una velocidad de caída de 3.7 cm/s, de acuerdo con la fórmula de van Rijn (1987). Es pertinente señalar que la distribución granulométrica es concentrada, de modo que es suficiente trabajar con el diámetro medio ( $d_{10} = 162 \mu\text{m}$  y  $d_{90} = 420 \mu\text{m}$ ). La porosidad de la arena (que influye en el volumen de sedimento *in situ*) se tomó como

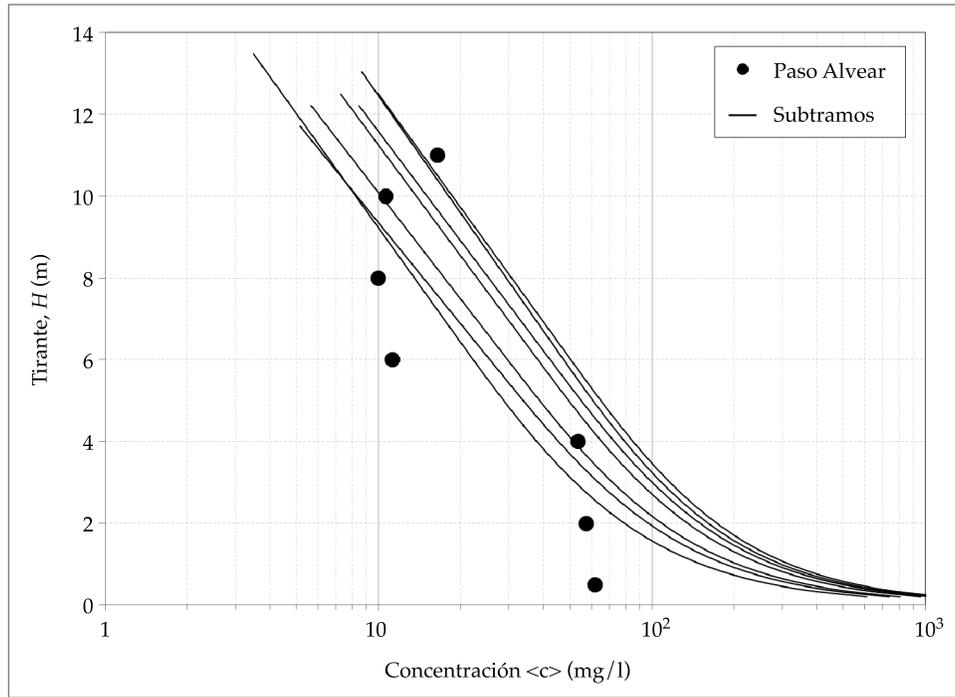


Figura 10. Perfiles verticales de concentración calculados para los subtramos analizados (líneas continuas) y mediciones en Paso Alvear – km 408 (puntos).

0.4. Se verificó que el perfil de concentración de sedimento en suspensión que surge de aplicar el modelo sobre la zona del explayado (desde donde incide la corriente) fuera compatible con mediciones efectuadas sobre una vertical en una sección ubicada 30 kilómetros aguas abajo del Paso Borghi, en la progresiva km 406.5 (Royal Boskalis and Ballast Ham Dredging, 1992). En la figura 10 se ilustra este acuerdo para el caso de todos los subtramos.

En el cuadro 2 se indican la concentración media vertical,  $\langle c \rangle$ , y las cargas en suspensión y de fondo resultantes para cada subtramo sobre el explayado. Las concentraciones medias resultan compatibles con las obtenidas de mediciones en la zona (Guerrero *et al.*, 2011). Además, se observa que la carga de fondo es del orden de 1/7 de la carga de sedimento en suspensión, lo cual es compatible con las mediciones existentes (Szupiany *et al.*, 2010).

Cuadro 2. Valores de incidencia de los parámetros sedimentológicos.

Subtramo	$\langle c \rangle$ (mg/L)	$Q_{ss}$ (mg/m/s)	$Q_{sf}$ (mg/m/s)	$Q_{st}$ (mg/m/s)	$Q_{ss}/Q_{sf}$
1	69.5	889	126	1 015	7.0
2	78.2	1 004	142	1 147	7.1
3	88.6	1 212	167	1 379	7.2
4	80.4	1 298	177	1 475	7.3
5	39.1	471	67	538	7.0
6	52.4	577	86	663	6.7
7	56.9	672	98	770	6.9

El proceso de transporte hace que, al atravesar las corrientes el canal de navegación, se produzca un avance por sedimentación del talud de aguas arriba (es decir, desde donde incide la corriente) y un retroceso por erosión del talud de aguas abajo; esto se denominará “efecto trampa”. Por su parte, la acción de la gravedad sobre el transporte de fondo en los taludes genera un efecto de difusión; se lo denominará “efecto gravitatorio”. Por simplicidad, estos dos efectos han sido

calculados por separado. Además, se utilizaron como representativos el ángulo de refracción correspondiente al punto medio de cada talud para calcular el efecto trampa, y el ángulo de desviación correspondiente a esos mismos puntos para calcular el efecto gravitatorio. A título ilustrativo, en la figura 11 se muestra cómo evoluciona la sección de un subtramo del canal de acuerdo con cada uno de los dos efectos. Allí se indica el tiempo transcurrido desde el dragado.

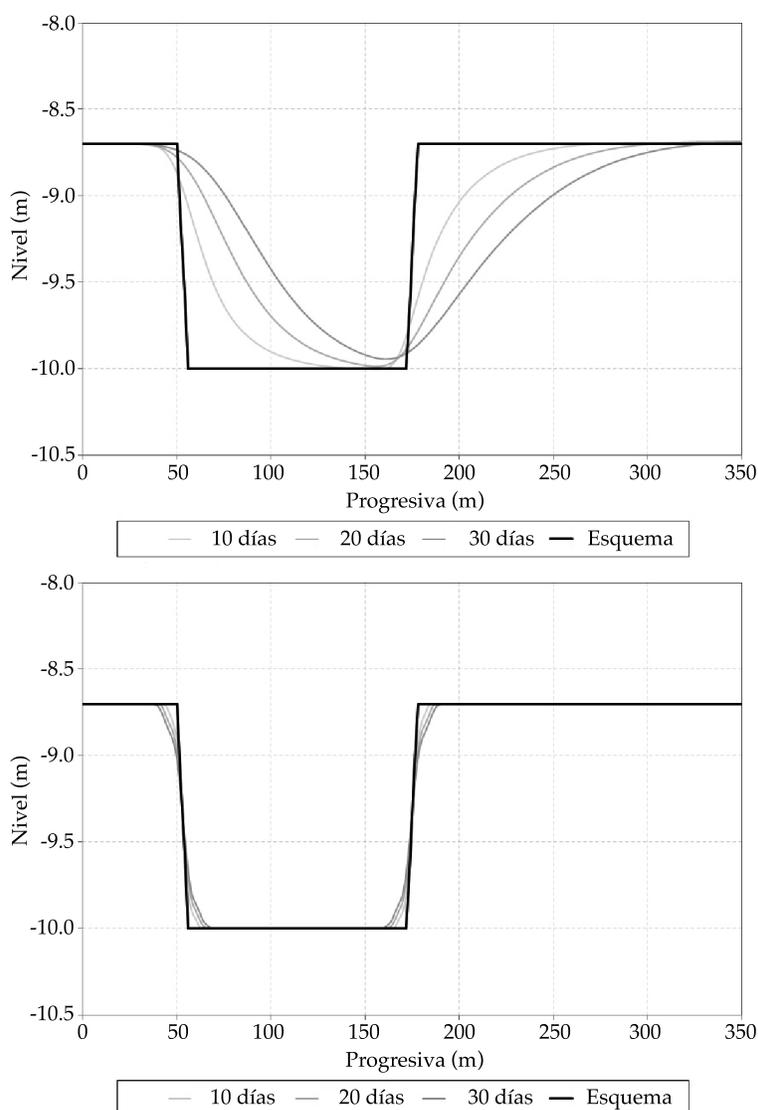


Figura 11. Evolución de la sección transversal (subtramo núm. 2) con a) *efecto trampa* y b) *efecto gravitatorio*.

A partir de los resultados correspondientes a un mes desde el dragado (escala de tiempo representativa del tiempo entre dragados de mantenimiento), se determinaron las tasas de sedimentación por unidad de longitud para cada subtramo. Para esto, se hizo la diferencia entre las cotas de fondo al final y al inicio de la simulación, integrando entre veriles a lo largo del eje del volumen de control y sobre todo su ancho —de donde surge el volumen sedimentado en el volumen de control—, y dividiendo por el ancho del volumen de control proyectado en la dirección del eje del canal (esto es equivalente a integrar de forma directa a lo largo de la dirección normal al canal). Para algunos subtramos se recalculó esta tasa, utilizando un tiempo de dos meses, observándose poca sensibilidad.

En la figura 12 se muestra la comparación entre las tasas de sedimentación por subtramo calculadas con el modelo y las que surgen de los datos de dragado de mantenimiento.

El acuerdo se considera satisfactorio, en el sentido de que las tasas tienen el mismo orden de magnitud y muestran, en esencia, tendencias similares de distribución espacial, aunque el modelo tiende a la sobreestimación. En realidad, a partir de aquí, el modelo podría calibrarse para mejorar el acuerdo cuantitativo por subtramo, lo cual resulta sencillo, ya que basta con ajustar levemente el ángulo de incidencia de la corriente, al cual el modelo resulta muy sensible, dado el casi paralelismo entre la corriente y el eje del canal. Sin embargo, se optó por mantener los valores de ese parámetro —es decir, privilegiar la consistencia entre los modelos hidrodinámico y sedimentológico— debido a que el objetivo de este trabajo no es obtener valores listos para acciones ingenieriles, sino estimar el cambio relativo que puede experimentar la tasa de sedimentación, lo cual sólo depende débilmente de los valores absolutos. En definitiva, este nivel de acuerdo se considera

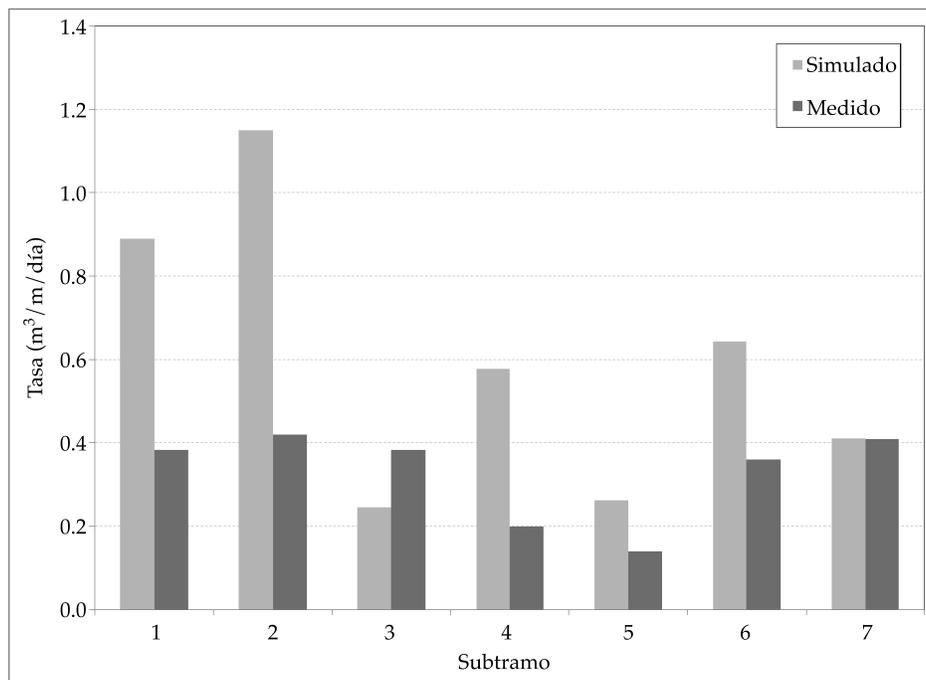


Figura 12. Comparación entre tasas (por unidad de longitud de canal) de sedimentación calculada y de dragado de mantenimiento.

suficiente para validar la metodología de cálculo.

A título informativo, estas tasas de sedimentación representan un volumen de mantenimiento para Paso Borghi de 792 000 m<sup>3</sup>/año de acuerdo con el modelo.

### Escenarios futuros

Dado que no existen predicciones claras sobre la tendencia de evolución que tendrá la distribución de precipitaciones —y, en consecuencia, de los caudales de los ríos— en la Cuenca del Plata bajo los efectos del cambio climático (Saurral, 2010), se ha procedido a considerar cambios potenciales positivos o negativos de caudal como posibles escenarios futuros. Se tomó como escenario de base un año medio, definido como el correspondiente al caudal medio anual “actual” (sobre el periodo 1994-2010). En todos estos escenarios se supuso que la morfología del río Paraná no se ve afectada por el cambio de caudal, es decir,

se mantuvieron las cotas de fondo fuera de la zona de dragado (“explayados”). En principio esto no es cierto, ya que existe una evolución morfológica histórica en la zona sobre escalas de tiempo por década (Castro *et al.*, 2007), que además se vería influenciada por el propio cambio de caudal; sin embargo, la evaluación de este efecto a lo largo del río Paraná efectuada por Nones *et al.* (2012) y Guerrero *et al.* (2013) mediante modelación numérica indica que en la zona de estudio no se manifiestan tendencias de sedimentación o erosión netas, de modo que la aproximación se considera aceptable.

En primer lugar, se ensayaron escenarios bajo la hipótesis de que se mantienen las actuales cotas de dragado, es decir, se supuso que, a pesar del cambio de caudal medio, la cota de referencia para la definición del calado requerido no cambia. Esto representaría una situación en la cual la autoridad de gestión de la navegación no asume el cambio hidrológico. Los resultados, presentados en la figura 13, muestran que el volumen sedimentado crece

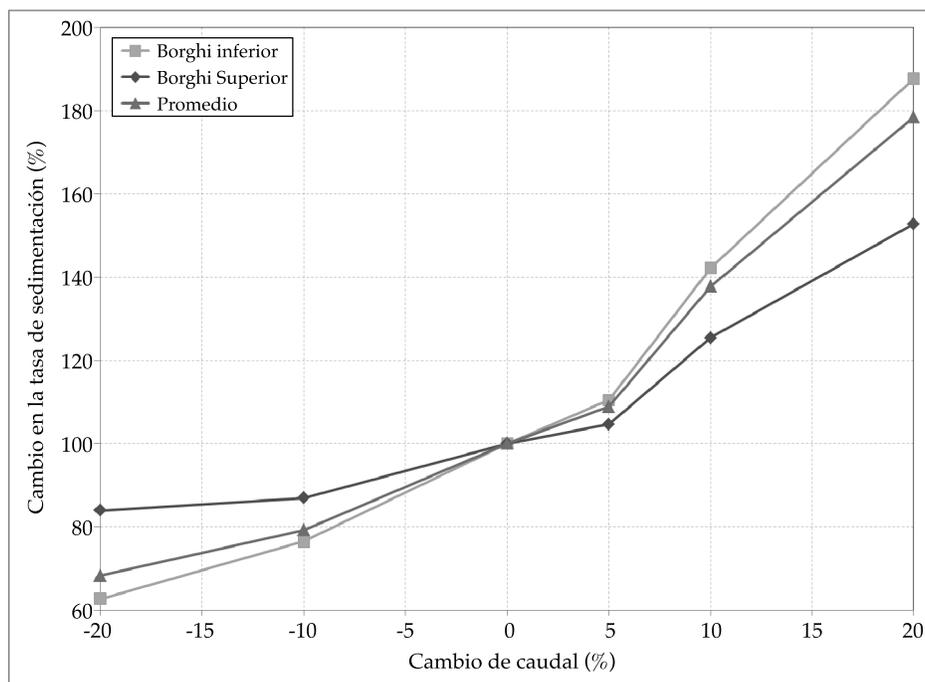


Figura 13. Cambio en la tasa de sedimentación manteniendo la cota de dragado.

con el incremento de caudal y viceversa, y que, en valor absoluto, su tasa relativa de variación es significativamente mayor que la del caudal, tanto más cuanto mayor es el cambio de caudal.

En segundo lugar se consideraron escenarios en los que se ajustó la cota de dragado para reflejar el cambio en la cota de referencia para la definición del calado requerido, en función del cambio de caudal medio (sería el caso en que la autoridad de gestión adapta la regulación al cambio hidrológico observado). Se supuso que esa cota de referencia varía en la misma cantidad que el nivel de agua asociado con el caudal medio. Los resultados se presentan en la figura 14, donde se observa que ahora la tendencia es opuesta, es decir, el volumen sedimentado crece cuando el caudal medio disminuye (y viceversa), ya que la disminución correspondiente en la profundidad de agua obliga a aumentar la profundidad del canal navegable, ocasionando entonces una mayor sedimentación. La tasa relativa de variación de la sedimentación es ahora, en valor absoluto,

sólo moderadamente superior a la de caudal. Para aumentos de caudal mayores al 10% del caudal medio ya no sería necesaria la realización de dragado en algunos subtramos.

## Conclusiones

Los cambios hidrológicos que resulten como consecuencia del cambio climático se manifestarán en variaciones de la tasa de sedimentación en canales de navegación, indicativa del dragado de mantenimiento necesario para mantenerlos operativos. Para cuantificar los efectos de los cambios hidrológicos es necesario implementar una metodología de cálculo de esa sedimentación mediante modelación numérica, tal como la que se presenta con relativo detalle en este trabajo.

Esta metodología se ha ilustrado mediante su aplicación a un paso (Borghi) del río Paraná (Argentina). Se ha mostrado que, sin apelar a calibración, provee resultados que acuerdan

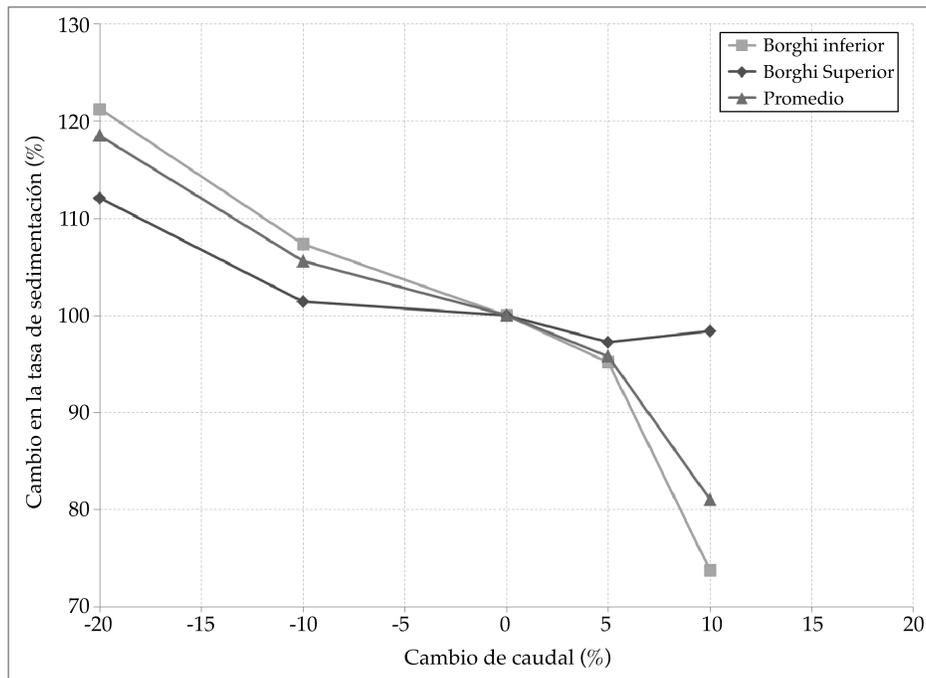


Figura 14. Cambio en la tasa de sedimentación ajustando la cota de referencia para dragado.

de forma satisfactoria con datos de dragado de mantenimiento. Mediante calibración, a través del ajuste del ángulo de incidencia de la corriente, podría lograrse un acuerdo cuantitativo casi completo.

Dado que no existen predicciones claras sobre la tendencia de evolución que tendrá la distribución de precipitaciones (y, en consecuencia, de los caudales de los ríos) en la Cuenca del Plata bajo los efectos del Cambio Climático, se consideraron cambios potenciales positivos o negativos de caudal como posibles escenarios futuros. Los resultados muestran que la tasa de variación de la sedimentación es, en valor absoluto, siempre mayor que la de caudal. En específico, si se mantuvieran las actuales cotas de dragado (es decir, si no hubiera adaptación de la regulación al cambio hidrológico), el volumen sedimentado crecería con el incremento de caudal y viceversa; su tasa relativa de variación, en valor absoluto, sería significativamente mayor que la del caudal, tanto más cuanto mayor es el cambio de caudal. Si, en cambio, se ajustaran las cotas de dragado para adaptar la regulación al cambio hidrológico, la tendencia sería opuesta, es decir, el volumen sedimentado crecería cuando el caudal medio disminuyera (y viceversa); la tasa relativa de variación de la sedimentación sería ahora, en valor absoluto, sólo moderadamente superior a la del caudal.

En todos estos escenarios se supuso que la morfología del río no se ve afectada por el cambio de caudal; la evaluación de este efecto, que va más allá del alcance de este trabajo, podría efectuarse por separado.

## Agradecimientos

La investigación que condujo a estos resultados fue financiada por el Programa Marco núm. 7 de la Comunidad Europea (FP7/2007-2013) bajo el proyecto núm. 212492 (CLARIS LPB: A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin). El Órgano de Control de Concesiones de Redragado y Señalización, perteneciente a la Subsecretaría de Puertos y Vías Navegables (SSPyVN), proveyó información de

volúmenes de dragado y relevamientos batimétricos, y el Departamento de Ingeniería Civil-Sección Hidráulica de la Universidad de Bolonia, Italia (DISTART-UNIBO), colaboró con información batimétrica.

Recibido: 13/01/12

Aceptado: 22/04/13

## Referencias

- BARROS, V.R., CLARKE, R., and SILVA, P. *Introduction in Climate Change in La Plata Basin*. Buenos Aires: Ed. CIMA-CONICET/UBA, 2006, pp. 8-14.
- CASTRO, S.L., CAFARO, E.D., GALLEGO, M.G., RAVELLI, A.M., ALARCÓN, J.J., RAMONELL, C.G., and AMSLER, M.L. *Evolución Morfológica del Cauce del Río Paraná en Torno a Rosario (km 456-406)*, Congreso Nacional del Agua (Conagua, 2007), Tucumán, Argentina, mayo, 2007.
- DE WIT, M.J.M., VAN DEN HURK, B., WARMERDAM, P.M.M., TORFS, P.J.J.F., ROULIN, E., and VAN DEURSEN, W.P.A. Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change*. Vol. 82, No. 3-4, 2007, pp. 351-372.
- EXNER, F.M. *Über die Wechselwirkung Zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen*, Sitzberichte der Academie der Wissenschaften. Viena, Austria, Sec. IIA, 1925, pp. 134-199.
- FREDSOE, J. *Sedimentation of River Navigation Channels*. *Journal of the Hydraulics Division*. New York: ASCE, February, 1978, pp. 223-236.
- GUERRERO, M., NONES, M., SAURRAL, R., MONTROULL, N., SZUPIANY, R.N. Parana River sediment dynamics in the context of climate change. *International Journal of River Basin Management*. Special issue Impact Assessment of Climate Change on La Plata Basin Water resources (submitted, 2013).
- GUERRERO, M., SZUPIANY, R.N., and AMSLER, M. Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation. *Flow Measurement and Instrumentation*. No. 22, 2011, pp. 392-401.
- HAWKES, P.J., PAULI, G., MOSER, H., ARNTSEN, Ø.A., GAUFRES, P., MAI, S., and WHITE, K. Impacts of climate change on waterborne transport. *Civil Engineering*. Vol. 163, 2010, pp. 55-63.
- KAZIMIERSKI, L.D., RE, M. y MENÉNDEZ, A.N. *Sedimentación en canales de navegación: Paso Borghi*. Ezeiza, Argentina: Informe INA-CLARIS 01, 2012, Disponible en *World Wide Web*: [http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/informes/SedimentacionPasoBorghi\\_2012.pdf](http://laboratorios.fi.uba.ar/lmm/informes/SedimentacionPasoBorghi_2012.pdf).
- MANGINI, S., PRENDES, H.H., HUESPE, J., and AMSLER, M. The importance of flocculation for suspended load sedimentation in the Paraná River, Argentina. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. 18, No. 3, July-September, 2003, pp. 55-69.

- MENÉNDEZ, A.N. Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 6, núm. 1, 1990, pp. 25-36.
- MENÉNDEZ, A.N. Simulación numérica de la sedimentación en canales de navegación. Informe LHA-INCYTH 102-001-92. Ezeiza, Argentina: INA, febrero, 1992.
- MENÉNDEZ, A.N. Simulación numérica de la sedimentación en canales de navegación. *Información Tecnológica. Revista Latinoamericana*. Vol. 5, núm. 4, Chile, 1994.
- MENÉNDEZ, A.N. *A Methodology to Scale Turbidity Plumes*. 2nd Int. Conf. New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-compatible Solutions for Aquatic Environments, Capri, Italy, June, 2002.
- MILLERD, F. The potential impact of climate change on Great Lakes international shipping. *Climatic Change*. Vol. 104, 2011, pp. 629-652.
- NONES, M., DI SILVIO, G., GUERRERO, M., PASTORELLO, L. 1-D long term simulation of the Paraná River morphodynamics in the light of climate variability. *Proceedings of River Flow 2012*. Costa Rica, September 2012, Vol. 1, pp. 769-774, CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, 2012.
- PIANC. *Waterborne Transport, Ports and Waterways: A Review of Climate Change Drivers, Impacts, Responses and Mitigation*. Report of PIANC EnviCom Task Group 3, Climate Change and Navigation. Brussels: World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2008.
- ROYAL BOSKALIS AND BALLAST HAM DREDGING. *Ruta de Navegación de Ultramar San Martín-Océano*. Informe para la Licitación del Dragado de la Vía Navegable. Buenos Aires: Dirección de Vías Navegables, 1992.
- SAURRAL, R.I. The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in the WCRP-CMIP3 Multimodel Dataset. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 11, No. 5, October, 2010, pp. 1083-1102.
- SUNG, R.Y.J., BURN, D.H., SOULIS, E.D. A Case Study of Climate Change Impacts on Navigation on the Mackenzie River. *Canadian Water Resources Journal*. Vol. 31, No. 1, 2006, pp. 57-68.
- SZUPIANY, R., HERNÁNDEZ, J., AMSLER, M., FORNARI, E., PARSONS, D., BEST, J.L., and TRENTO, A. *Comportamiento hidro-sedimentológico en bifurcaciones de un gran río*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, Noviembre, 2010.
- VAN RIJN, L.C.J. *Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport*. Delft: Delft Hydraulic Communication 382, 1987.
- VAN RIJN, L.C.J. Sedimentation of dredged channels and trenches. In: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. John B. Herbich (editor). Chap. 9, Vol. 2, 1991, pp. 615-618.
- VERHAAR, P.M., BIRON, P.M., FERGUSON, R.I., and HOEY, T.B. Numerical modelling of climate change impacts on Saint-Lawrence River tributaries Earth Surf Process. *Landforms*. Vol. 35, 2010, pp. 1184-1198.

## Dirección institucional de los autores

Ing. Mariano Re  
Leandro David Kazimierski  
Dr. Angel Nicolás Menéndez

Instituto Nacional del Agua  
Laboratorio de Hidráulica  
Au. Ezeiza-Cañuelas, tramo Jorge Newbery  
Km 1620, Ezeiza, Buenos Aires, ARGENTINA  
Teléfono: +54 (11) 4480 4500  
m.re@ina.gov.ar  
leandrokaz@gmail.com  
angel.menendez@speedy.com.ar

Universidad de Buenos Aires  
Facultad de Ingeniería  
Laboratorio de Modelación Matemática  
Av. Las Heras 2214, 3er. piso  
Buenos Aires, ARGENTINA  
Teléfono: +54 (11) 4514 3016