

## UN MODELO NUMÉRICO PARA REPRESENTAR EL AVANCE DEL FRENTE DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ A ESCALA SECULAR

**Alejo Sarubbi y Ángel N. Menéndez**

*Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua (INA), Autopista Ezeiza Cañuelas, Tramo Jorge Newbery Km 1,620, Ezeiza, Buenos Aires, Argentina, angel.menendez@speedy.com.ar,  
<http://www.ina.gov.ar/>*

*Laboratorio de Modelación Matemática, Facultad de Ingeniería (FIUBA), Universidad de Buenos Aires, Las Heras 2214 3er. Piso, Buenos Aires, Argentina, lmm@fi.uba.ar,  
<http://www.fi.uba.ar/laboratorios/lmm/>*

**Palabras Clave:** Delta del Paraná, Avance del Frente del Delta, Simulación Numérica.

**Resumen.** Se describe la implementación y calibración de un modelo hidrodinámico - sedimentológico - morfológico que simula el avance del Frente del Delta del río Paraná durante todo el siglo XX. Se plantea que el avance del Frente es debido a la deposición de las arenas finas. La calibración del modelo fue realizada en función de la cartografía histórica recopilada para toda la zona del Delta. Se muestra que el modelo resulta adecuado para representar las tendencias de avance del Frente del Delta a gran escala durante todo el siglo pasado. La transformación realizada en la escala temporal del modelo, como parte de la calibración, permitió reconstruir la historia temporal del caudal sólido de arenas finas del río Paraná. Se utilizó el modelo para efectuar proyecciones sobre posibles avances del Frente del Delta durante todo el siglo XXI, de acuerdo a distintos escenarios de aporte sólido.

## 1 INTRODUCCIÓN

La desembocadura del río Paraná en el Río de la Plata se da a través de un amplio delta, originado por la deposición de sedimentos provenientes de su cuenca alta, cuyo ancho aproximado actual es del orden de los 50 km (Figura 1). Dichos sólidos, aportados principalmente desde la subcuenca del río Bermejo, hacen que el Delta del río Paraná se encuentre en continuo crecimiento, con tasas de avance de varias decenas de metros por año sobre el litoral de la Provincia de Buenos Aires.

Las consecuencias que este cambio morfológico tendrá sobre el entorno urbano pueden ser considerables, ya que entrarán en conflicto los diversos usos a los que hoy día se somete esa zona del Río de la Plata, y que están relacionados a la recepción de descargas, provisión de agua para consumo, navegación fluvial y de ultramar, recreación, etc. En particular, afectará el desarrollo del Canal Emilio Mitre, tramo fundamental de la vía navegable hacia el Océano.

Estas consecuencias podrán ser mitigadas en la medida que exista una adecuada planificación, lo cual necesita, como dato primario, una comprensión y predicción confiable del proceso.

En el presente trabajo se presenta la implementación y calibración de un modelo hidrodinámico - sedimentológico - morfológico que simula el avance del Frente del Delta del río Paraná a gran escala durante todo el siglo XX, y se describe su utilización para hacer proyecciones sobre el avance durante el siglo XXI.

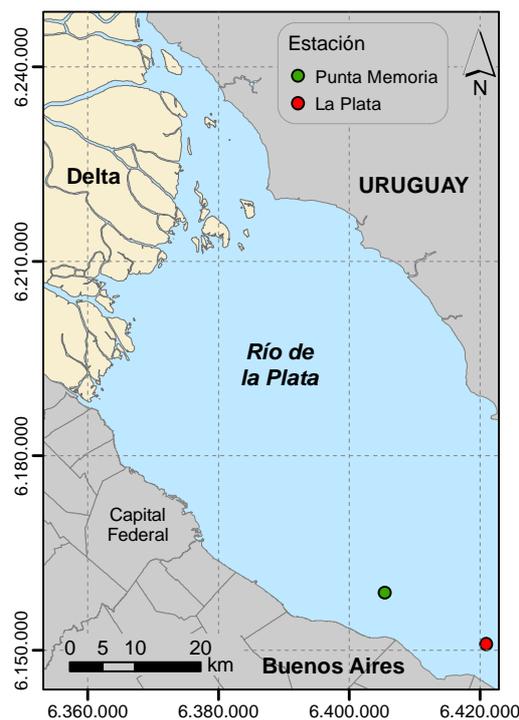


Figura 1: Mapa de ubicación, dominio de cálculo del modelo y ubicación de estaciones de comparación

## 2 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

### 2.1 Planteo general

El modelo apunta a representar el avance del Frente del Delta sobre una escala de tiempo secular, por lo que su escala temporal de resolución es de orden decadal. Sin embargo, es

necesario tener en cuenta los efectos de la escala temporal de mareas (del orden de las 12 horas), ya que la deposición de sedimento cambia significativamente durante ese período. Para salvar esta diferencia de escalas de tiempo, la estrategia adoptada consiste en trabajar con los módulos hidrodinámico (MH) y sedimentológico (MS) sobre una marea media representativa, para luego considerar el efecto integrado como representativo de la escala decadal con la cual se trabaja con el modelo morfológico (MM). En la [Figura 2](#) se representa esquemáticamente el ciclo de cálculo, algunos de cuyos detalles se explican a continuación.

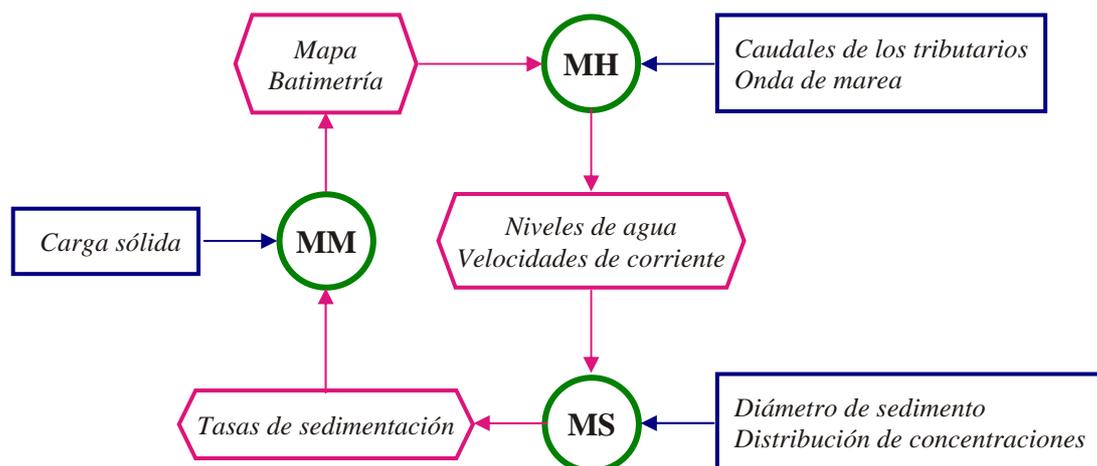


Figura 2: Diagrama en bloques del modelo

## 2.2 Dominio de modelación y MDT

El modelo se enmarca dentro de la zona correspondiente al Río de la Plata Superior. El dominio de cálculo considerado está definido por el área comprendida entre los paralelos 33,9°S al Norte y 34,8°S al Sur, y los meridianos 58,6°W al Oeste y 57,8°W al Este, y es el representado en la [Figura 1](#). Este dominio espacial de cálculo fue discretizado en una grilla de nodos equiespaciados. El sistema de coordenadas de la grilla quedó orientado según las direcciones cardinales (dirección X en el sentido Este-Oeste y dirección Y en el sentido Norte-Sur). El paso de discretización adoptado fue de 205 m en la dirección X ( $\Delta x$ ) y de 255 m en la dirección Y ( $\Delta y$ ). De este modo, la malla de cálculo resultó ser de 340 × 410 nodos.

Los nodos donde se realizan los cálculos, los cuales definen la región de cálculo del modelo, son aquellos que caen sobre el Río de la Plata. De esta manera, dado que el Frente del Delta (definido en el mapa de entrada) se modifica en cada paso de cálculo, variarán los nodos que caen sobre el Río de la Plata. Es decir, la región de cálculo varía en cada paso temporal del modelo.

La batimetría de la zona de interés se obtuvo a partir de la digitalización de las líneas de nivel de la carta náutica “H118 - Río de la Plata Superior” confeccionada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Como las condiciones iniciales de la simulación corresponden al año 1900, a los nodos comprendidos entre el Frente del Delta inicial (año 1900) y el Frente actual (carta del SHN), se le asignaron valores de profundidad inferidos de la carta del SHN.

A partir de estos datos batimétricos, se asignaron valores de profundidad a cada uno de los nodos de la malla mediante un proceso de interpolación con la técnica de kriging (método geoestadístico), construyéndose así el modelo digital del terreno, el cual fue levemente ajustado a posteriori, durante la calibración del modelo.

## 2.3 Módulo Hidrodinámico

Dado el alto valor de la relación entre las escalas horizontal (longitud de la onda de marea) y vertical (profundidad), se utiliza la aproximación bidimensional. El software *HIDROBID II* (Menéndez, 1985; Menéndez, 1990) es el utilizado para la implementación del módulo hidrodinámico. Este software simula numéricamente flujos cuasi-bidimensionales (en el plano horizontal) a superficie libre. Está basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas (shallow water equations).

El modelo teórico considera como fuerzas motrices a la gravedad, a la aceleración de Coriolis (fuerza de inercia debida a la rotación de la Tierra) y a las tensiones superficiales debidas a la acción del viento. Por otro lado, tiene en cuenta la resistencia al movimiento proveniente de la generación de turbulencia en el fondo (históricamente denominada “fricción”). Supone que la forma del fondo es arbitraria, pero sin variación en el tiempo (fondo fijo) y sin cambios bruscos. Sin embargo, es capaz de asimilar cambios bruscos de profundidad a través de tratamientos especiales. Considera que la pendiente del fondo es pequeña (Ré y Menéndez, 2003; Menéndez, 1987).

La hipótesis de flujo cuasi-bidimensional significa que el movimiento es esencialmente bidireccional y la velocidad es prácticamente uniforme a lo largo de la dirección vertical y que, en consecuencia, la aceleración vertical es despreciable frente a la de la gravedad, resultando entonces una distribución hidrostática de presiones (Ré y Menéndez, 2003).

Las ecuaciones para aguas poco profundas provienen del filtrado sobre el ensamble estadístico de las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones de Reynolds), seguido de la integración vertical y de la aplicación de las hipótesis simplificadoras del modelo teórico, resultando (Abbott, 1979):

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_g v + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial x} + \frac{\tau_{fx}}{\rho h} - \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) &= 0 \quad (1) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_g u + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial y} + \frac{\tau_{fy}}{\rho h} - \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) &= 0 \end{aligned}$$

donde  $x$  y  $y$  son las coordenadas espaciales,  $u$  y  $v$  las velocidades medias verticales en esas direcciones, respectivamente,  $f_g$  el factor geotrófico,  $\tau_{sx}$  y  $\tau_{sy}$  las componentes de la tensión de corte sobre la superficie del agua debida al viento,  $\tau_{fx}$  y  $\tau_{fy}$  las componentes de la tensión de corte sobre el fondo y  $T$  el tensor de las tensiones efectivas (Ré y Menéndez, 2003).

El esquema numérico de resolución de estas ecuaciones utilizado en el software *HIDROBID II* se basa en el método de las diferencias finitas. La malla de discretización es del tipo alternada (las dos componentes de la velocidad y el nivel de agua están todos centrados en nodos diferentes) y el método es del tipo implícito de direcciones alternadas (Menéndez, 1990; Ré y Menéndez, 2003).

Los forzantes determinantes de la hidrodinámica del sistema, a la escala de análisis, son los caudales líquidos de los tributarios que desembocan sobre el Frente del Delta y la onda de marea que se propaga aguas arriba a lo largo del Río de la Plata. Ambos forzantes fueron representados como solicitaciones representativas de condiciones medias anuales.

Los forzantes de caudal corresponden al río Uruguay y a los siguientes brazos del río Paraná: Paraná Bravo, Paraná Guazú, Barca Grande, Paraná Miní y Paraná de las Palmas. Los caudales líquidos adoptados corresponden a valores medios anuales: 5200 m<sup>3</sup>/s para el río

Uruguay y 18.000 m<sup>3</sup>/s para el río Paraná. Este último se distribuyó entre los distintos brazos de la siguiente manera: 37% Paraná Bravo, 23% Paraná Guazú, 4.5% Barca Grande, 2.5% Paraná Miní y 33% Paraná de las Palmas (Bombardelli et al. 1995).

La onda de marea se especificó en la línea imaginaria La Plata-Colonia (borde Este del dominio). Se consideró como representativa una onda sinusoidal con amplitudes compatibles con la marea astronómica media en ambos extremos, dato obtenido de la tabla de mareas del SHN. Se construyó, entonces, la serie temporal de niveles en ambos extremos del borde del modelo, y se interpoló linealmente para completar los datos a lo largo de todo el borde.

Con estos forzantes se corre el módulo hidrodinámico para un ciclo completo de mareas, es decir, 12 horas (en la práctica, las corridas se efectúan para un período de tiempo de 48 horas, descartándose las primeras 36 horas de modo de asegurar la entrada en régimen del sistema, es decir, la independencia de las condiciones iniciales). Se obtienen, así, la distribución de niveles de agua y de las dos componentes de la velocidad de corriente sobre todo el dominio para un ciclo completo de mareas, que constituyen forzantes del módulo sedimentológico.

Como el software *HIDROBID II* está basado en un esquema implícito de diferencias finitas, no impone limitaciones numéricas al valor del paso temporal para evitar problemas de estabilidad numérica. La limitación proviene, entonces, exclusivamente de requerimientos de precisión. Específicamente, es necesario que el paso temporal sea del orden del tiempo que tarda la onda de marea en recorrer una celda. Es decir:

$$\Delta t \sim \frac{\Delta x}{c} \quad (2)$$

donde  $\Delta t$  es el paso temporal de cálculo,  $\Delta x$  el paso espacial en la dirección X y  $c$  la celeridad de la onda de marea. Teniendo en cuenta la profundidad media del río en la zona de modelación, surge una celeridad de Lagrange  $c$  de 7 m/s. Entonces, el paso de tiempo debe ser del orden de 29 segundos. Se adoptó un paso temporal de 30 segundos.

La validación del módulo hidrodinámico se realizó a partir de dos series de mediciones de corriente en las estaciones La Plata y Punta Memoria (Berazategui). Las mismas se observan en la Figura 1. En la Figura 3 se presenta la comparación entre las velocidades de corriente obtenidas con el modelo y las provistas por las series de mediciones para la estación Punta Memoria. El grado de acuerdo se considera satisfactorio, tanto en magnitud como en dirección.

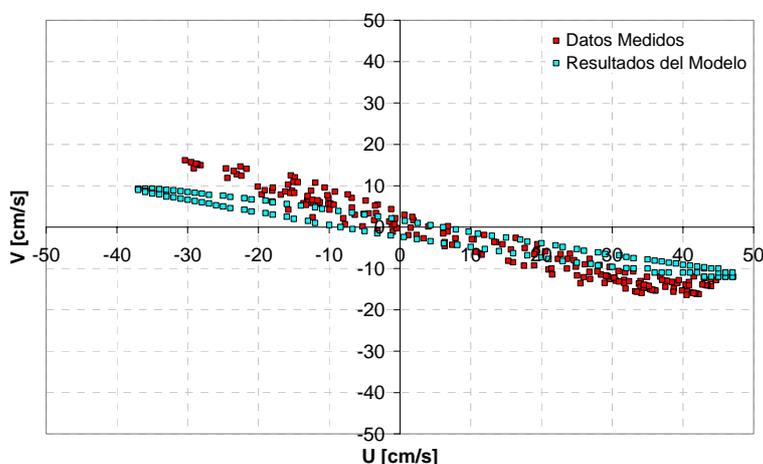


Figura 3: Comparación entre las velocidades de corriente medidas y las obtenidas con el modelo para la estación Punta Memoria

## 2.4 Módulo Sedimentológico

El avance del Frente del Delta debe su origen a la deposición de sedimentos transportados por el río Paraná. Entonces, el mecanismo principal de ese avance está regido por efectos de sedimentación, los cuales prevalecen por sobre los de erosión. Se postula, entonces, que, mientras los primeros son los que determinan la forma general y dimensión de ese avance, los efectos erosivos se manifiestan, a lo sumo, a una escala menor, condicionando sólo el detalle morfológico. En función de lo dicho anteriormente, y dado que el modelo fue desarrollado con el objetivo de representar sólo las tendencias de la forma de avance del Frente, los efectos de erosión no fueron tenidos explícitamente en cuenta.

De acuerdo a [Brea et al. \(1999\)](#), las arenas que ingresan al Delta por transporte fluvial se depositan en su totalidad en dicha zona. Asumiendo, entonces, que el avance del Frente se debe principalmente a la deposición de arenas, se consideró que las más pesadas (arenas medianas y gruesas) se van depositando sobre toda el área ya existente del Delta, mientras que las arenas finas son las que efectivamente generan el afloramiento del nuevo Frente. Esto último se ve reflejado en los perfiles estratigráficos de la zona del Delta que se muestran en los trabajos de [Amato y Silva Busso \(2007\)](#) y [Rinaldi et al. \(2006\)](#). Más detalles se presentan en [Sarubbi \(2007\)](#).

El modelo de cálculo implementado se basa, entonces, en la determinación de las tasas de sedimentación de acuerdo a la siguiente expresión ([Krone, 1962](#)):

$$T_s = w_s \cdot C \cdot \psi \left( \frac{\tau}{\tau_d} \right) \quad (3)$$

con

$$\psi \left( \frac{\tau}{\tau_d} \right) = \begin{cases} 0 & \text{si } \tau \geq \tau_d \\ 1 - \frac{\tau}{\tau_d} & \text{si } \tau < \tau_d \end{cases} \quad (4)$$

donde  $w_s$  es la velocidad de caída para el diámetro medio de las partículas consideradas,  $C$  la concentración de sedimentos,  $\tau$  la tensión de corte del escurrimiento y  $\tau_d$  la tensión de corte crítica de deposición.

La tasa de sedimentación  $T_s$  representa la cantidad de sedimentos que se depositan en la unidad de tiempo sobre una región de área unitaria. Por su parte, la tensión de corte crítica de deposición  $\tau_d$  es el valor de tensión de corte por debajo del cual se produce depositación. Es decir que sólo para valores de  $\tau$  menores a  $\tau_d$  habrá deposición de sedimentos.

Si bien la expresión (3) está desarrollada para partículas finas (limos y arcillas), se la consideró para representar la deposición de arenas finas.

Los forzantes del módulo sedimentológico están dados por la distribución de concentraciones (ver más abajo) y los niveles de agua y velocidades de corriente que se obtienen como resultados del módulo hidrodinámico.

El sedimento se caracterizó mediante la especificación de los siguientes parámetros: diámetro medio ( $d_{50}$ ), velocidad de caída ( $w_s$ ) y velocidad de corte crítica de deposición ( $U_{*d}$ ). Se adoptó como diámetro medio representativo de arenas finas un valor de 150  $\mu\text{m}$ , al cual le corresponde una velocidad de caída de 0,015 m/s. Como velocidad de corte crítica de deposición se utilizó la correspondiente a sedimento fino para el Río de la Plata cuyo valor estimado es de 0,008 m/s ([Harrison y Owen, 1971](#); [Menéndez y Castellano, 2000](#)).

Como se supuso que el material sólido no puede alcanzar las zonas costeras, se definió un área de deposición en las adyacencias del Frente que excluyera a las mismas. De esta manera,

se circunscribió la sedimentación sólo a aquellas celdas ubicadas sobre el Frente del Delta y sus inmediaciones. Dicha región, denominada *área sedimentable*, puede observarse en la [Figura 4](#).

El área sedimentable se dividió en dos regiones, denominadas áreas de influencia. Cada una de ellas se asoció a uno de los brazos considerados, de manera que el material sólido transportado por cada uno de ellos sólo pueda depositarse en su respectiva área de influencia. En cuanto a la concentración de arenas finas, se consideraron distintos valores a lo largo de todo el área sedimentable, compatible con la descarga de sólidos (ver más abajo). Para ello se dividió a cada una de las áreas de influencia en tres regiones donde se discriminó el valor de la concentración. Dichas regiones ó zonas de concentración pueden observarse en la [Figura 4](#). Esto constituye una suerte de discretización de la distribución de concentraciones dentro del área sedimentable. El criterio con que se hizo esta distribución fue la de considerar que las mayores concentraciones se dan en las inmediaciones de las desembocaduras de los dos brazos considerados, disminuyendo a medida que se aleja de las mismos. En cuanto a los valores de concentración de cada zona, los mismos fueron utilizados como parámetros de calibración.

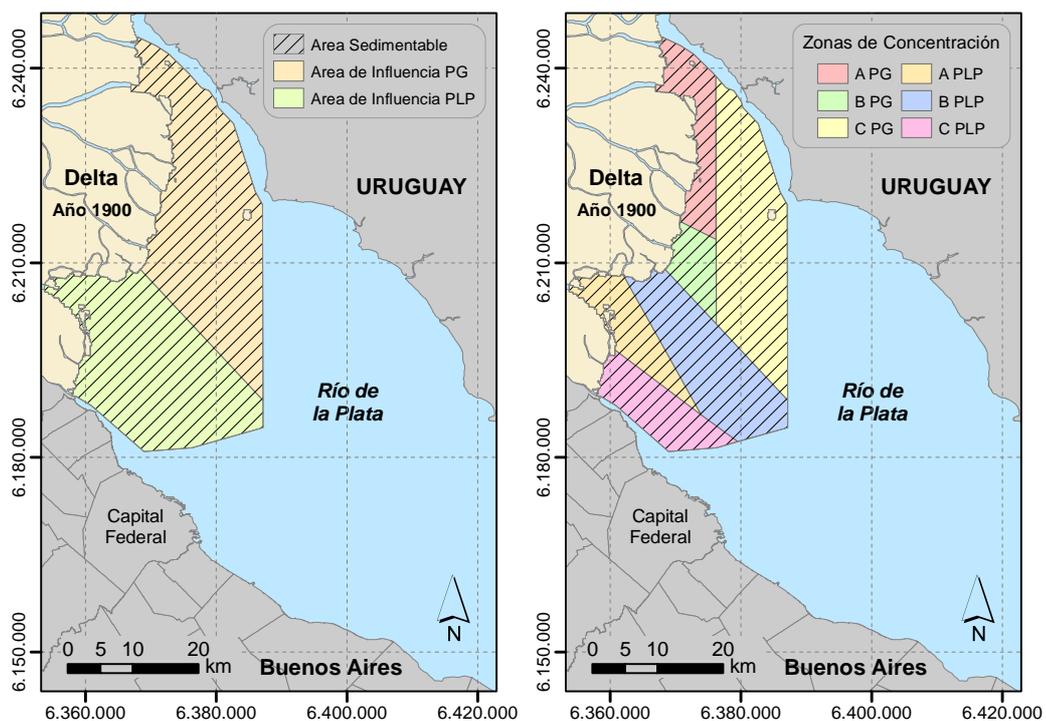


Figura 4: Área sedimentable, áreas de influencia y zonas de concentración para el año 1900

## 2.5 Módulo Morfológico

El cálculo morfológico se realiza de la siguiente manera: considerando el caudal sólido aportado por los tributarios, se obtiene, de acuerdo al paso de tiempo, el volumen de arenas finas disponible para la sedimentación ( $V_{total}$ ). Este volumen se va distribuyendo entre las celdas adyacentes al Frente. El criterio de distribución utilizado consiste en asignar volumen de sedimentos sucesivamente a celdas de acuerdo al ranking de tasa de sedimentación promedio (sobre el ciclo de marea completo), hasta completar el total del volumen disponible.

El volumen depositado en cada celda está definido por el producto entre el área de la

misma y la altura de la columna de sólidos depositados, es decir:

$$V_{dep} = A \cdot H_{dep} \quad (5)$$

donde  $H_{dep}$  es la altura de depositación y  $A = \Delta x \cdot \Delta y$  el área de una celda, siendo  $\Delta x$  y  $\Delta y$  los pasos espaciales de cálculo en las direcciones X e Y respectivamente. La altura máxima de depositación en cada celda ( $H_{máx}$ ) fue adoptada como el tirante de agua promedio a lo largo del ciclo de 12 horas (un ciclo de marea completo), obtenido en los cálculos del módulo hidrodinámico.

Cuando la altura de depositación en una celda es igual a  $H_{máx}$  se considera que la misma está llena ó colmatada. De esta forma, las celdas con mayor  $T_s$  se van colmatando en la medida que haya material disponible. Cuando la sumatoria de los volúmenes de sedimentos depositados en todas las celdas sea igual al volumen total disponible, es decir:

$$\sum V_{dep} = V_{total} \quad (6)$$

el material sólido se habrá consumido, y, por lo tanto, no habrá más depositación en las celdas y los cálculos sedimentológicos para ese paso de tiempo habrán terminado. Todas las celdas colmatadas representan, así, las zonas de crecimiento del Delta. A partir de las mismas se generan el mapa y la batimetría de salida, que son utilizados, posteriormente, en un nuevo paso de cálculo, como datos de entrada del módulo hidrodinámico.

Para la carga de arenas finas se tomó 6.500.000 t/año como valor de referencia de lo que llega al Frente del Delta. De todos modos, la carga de arenas finas efectivamente aportada a lo largo del tiempo se dedujo durante el proceso de calibración. Esta carga de arenas finas se repartió entre los brazos del Paraná Guazú y Paraná de las Palmas. Al no contarse con información disponible sobre la distribución de esta carga sólida en ambos brazos, la misma fue utilizada como parámetro de calibración.

El paso temporal adoptado para el módulo morfológico fue de 5 años.

### 3 CALIBRACIÓN DE LOS MÓDULOS SEDIMENTOLÓGICO Y MORFOLÓGICO

La calibración de los módulos sedimentológico y morfológico se realizó mediante la comparación de los Frentes cartográficos con los obtenidos mediante la simulación. Los primeros, obtenidos de toda la cartografía recopilada, corresponden a los años 1905, 1926, 1969, 1984, 1994 y 2002, mientras que los Frentes simulados se obtuvieron cada 5 años a partir del año 1900 y hasta el año 2005.

Para calibrar el modelo se dispuso de los siguientes parámetros: batimetría inicial (correspondiente al año 1900), distribución del caudal sólido entre los ríos Paraná Guazú y Paraná de las Palmas y concentración de arenas finas, zonificada según la [Figura 4](#).

El proceso de calibración se realizó con un ajuste simultáneo y progresivo de los parámetros involucrados. Como resultado de la misma, se adoptó una distribución de caudales sólidos de 50% para los dos brazos considerados. Esta carga sólida equivalente, a pesar de las diferentes descargas líquidas, se justificaría por el hecho de que el Paraná en la bifurcación puede aún retener la “memoria” de que la carga sedimentaria fina ha sido aportada principalmente sobre margen derecha, desde el río Paraguay (es decir, no se ha llegado todavía a una mezcla total en el sentido transversal).

En cuanto a la batimetría inicial, se “embancaron” levemente las zonas adyacentes al Frente del área de influencia del Paraná de las Palmas y se demarcó el canal de salida de dicho río. También se embancó la zona correspondiente a la isla Oyarvide para representar, a partir de 1960, el afloramiento de dicha isla. Debido a la escala de trabajo considerada, no se

tuvieron en cuenta los efectos del canal Emilio Mitre en torno a la isla Zárate.

Las concentraciones finales de arenas finas para las distintas zonas consideradas se muestran en la [Tabla 1](#).

Zona	Área de Influencia	
	Paraná Guazú	Paraná de las Palmas
A	9	17
B	6	5
C	4 <sup>(a)</sup> y 17 <sup>(b)</sup>	12

<sup>(a)</sup> Hasta el año de simulación 1955

<sup>(b)</sup> A partir del año de simulación 1960

Tabla 1: Concentraciones resultantes de la calibración (valores en mg/l)

La comparación entre los Frentes cartográficos y los obtenidos con la simulación mostró, en términos generales, un buen acuerdo, pero se detectó un desfase entre ellos. Estos desfases se deben básicamente a que el caudal sólido de arenas finas, que constituye la variable primaria del crecimiento del Delta, se mantuvo constante durante toda la simulación. Por lo tanto, dichos desfases estarían reflejando que el caudal sólido debió variar a lo largo del período de tiempo simulado. Debido a esto, se buscaron los Frentes simulados que más se asemejaban a los seis Frentes cartográficos, resultando ser los indicados en la [Tabla 2](#).

Frente Cartográfico	Frente Simulado
1905	1905
1926	1940
1969	1955
1984	1970
1994	1980
2002	1985

Tabla 2: Frentes simulados más similares a los cartográficos

Volcando los datos de la [Tabla 2](#) en un gráfico del tipo X-Y se obtuvo la relación entre años cartográficos y años simulados que se muestra en la [Figura 5](#). Dicha curva puede interpretarse como una transformación no lineal en la escala temporal del modelo. De esta forma, los años a los que hacen referencia los Frentes obtenidos en la simulación se corrigieron con esta relación. Por ejemplo, el Frente simulado que se obtuvo para el año 1930, en realidad representa el Frente del Delta en el año 1919.

La calibración del modelo se finalizó con esta transformación no lineal de la escala temporal, que permitió corregir los desfases señalados anteriormente, producto de considerar un caudal sólido constante. Así, los Frentes obtenidos en la simulación, calibrados en el tiempo, pueden observarse en la [Figura 6](#).

Del análisis de la curva de tiempos obtenida ([Figura 5](#)), surge lo siguiente: los Frentes simulados en correspondencia con la parte de la curva que está por arriba de la recta a 45° (que representa la igualdad entre los años simulados y cartográficos), concuerdan con Frentes cartográficos de años anteriores. Consecuentemente, dichos Frentes están atrasados respecto a los cartográficos. Análogamente, los Frentes simulados que están en correspondencia con la parte de la curva inferior a la recta de 45° están adelantados respecto a los cartográficos.

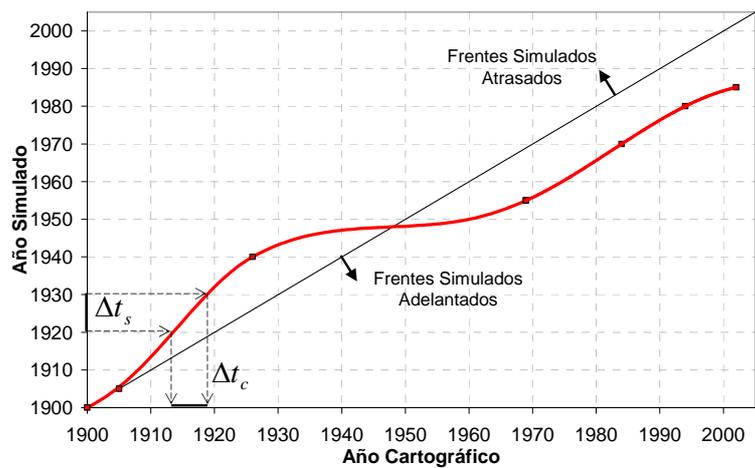


Figura 5: Relación entre los años cartográficos y simulados

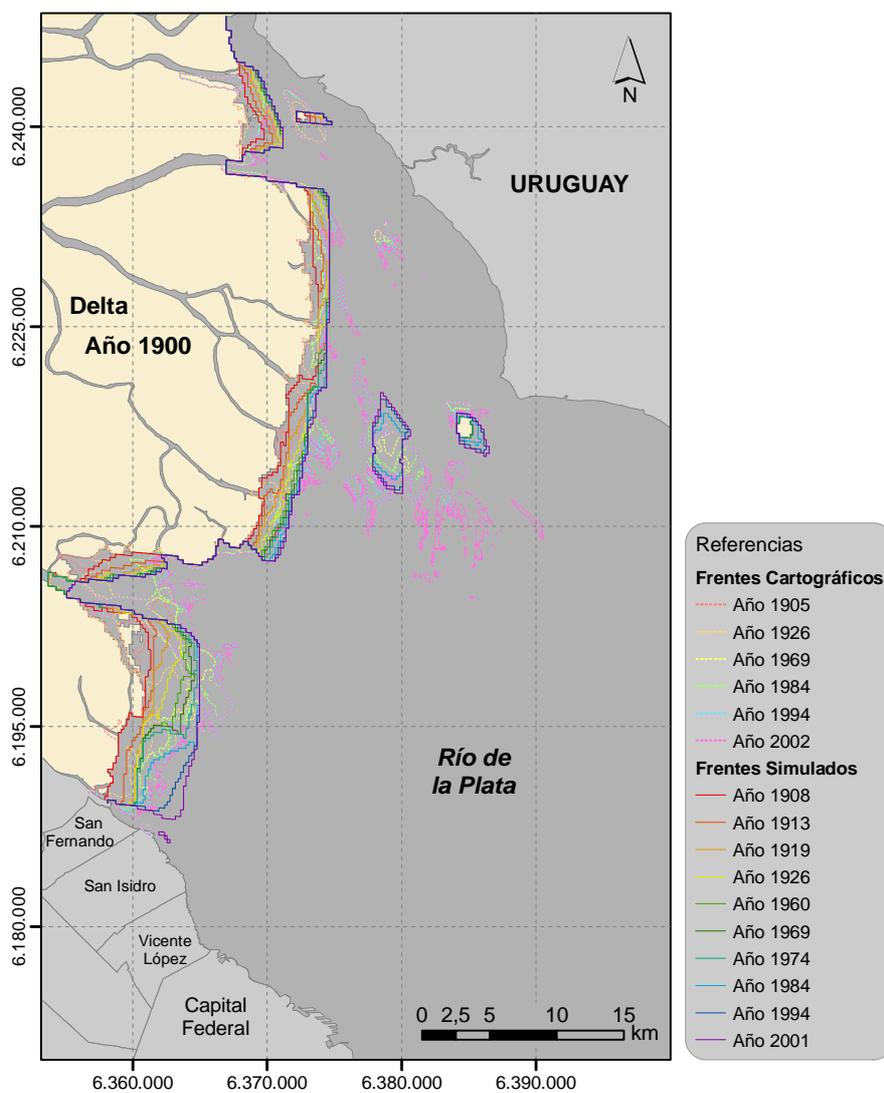


Figura 6: Frentes simulados versus cartográficos

Estos desfases fueron interpretados como indicadores de que la carga sólida aportada por el río Paraná no permaneció constante en el tiempo (en el valor de referencia de 6.500.000 t/año), como se supuso en la simulación, sino que esta fue variando año a año.

En un intervalo del tiempo simulado  $\Delta t_s$  (Figura 5), el volumen de arenas finas aportado es:

$$\Delta V = Q_0 \cdot \Delta t_s \quad (7)$$

donde  $Q_0$  es el caudal sólido considerado en la simulación (caudal sólido de referencia, adoptado en 6.500.000 t/año). El intervalo  $\Delta t_s$  del tiempo simulado está asociado a un intervalo del tiempo cartográfico  $\Delta t_c$  durante el que se aporta el mismo volumen de arenas finas, pero con el caudal sólido real, es decir:

$$\Delta V = Q_{sólido} \cdot \Delta t_c \quad (8)$$

donde  $Q_{sólido}$  es el caudal sólido real. De (7) y (8) surge, en el límite, que:

$$\frac{dt_s}{dt_c} = \frac{Q_{sólido}}{Q_0} \quad (9)$$

El primer término de la expresión (9) es la derivada de la curva de tiempos, mientras que el segundo término representa el caudal de arenas finas efectivamente aportado respecto al considerado en la simulación. De esta forma, podemos interpretar a la derivada de la curva de tiempos como la función de modulación de la carga sólida. Multiplicando esta función de modulación por el valor de referencia adoptado en la simulación (6.500.000 t/año), se obtuvo la historia temporal del caudal sólido de arenas finas del río Paraná, que se muestra en la Figura 7. La plausibilidad de dicha historia temporal de aporte sólido es discutida en Sarubbi (2007).

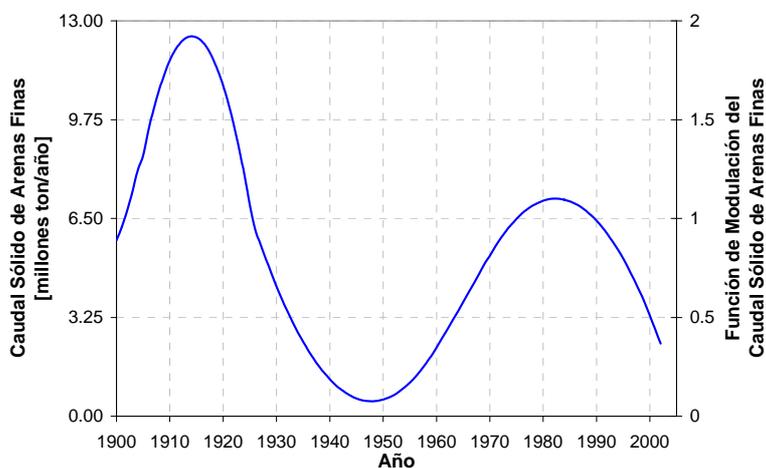


Figura 7: Caudal sólido de arenas finas del río Paraná a lo largo de todo el siglo XX

#### 4 TENDENCIA DE AVANCE FUTURA

Partiendo del último Frente obtenido durante la calibración (año de simulación 2005) se continuó la corrida del modelo hasta el año de simulación 2100 (conservando tanto el paso de cálculo como los valores de los forzantes), con el fin de utilizar esos resultados como base para hacer proyecciones sobre el avance del Frente del Delta en los próximos 100 años.

Para transformar la escala temporal de los nuevos Frentes obtenidos, se plantearon tres

escenarios futuros, en función de la carga de arenas finas del sistema. Los mismos corresponden a situaciones de mínimo, medio y máximo caudal sólido. Se definieron las curvas de caudal sólido para cada escenario, de cuya integración se obtuvieron las respectivas curvas de relación entre los años cartográficos (es decir, reales) y los de la simulación.

Las curvas de caudal sólido definidas para cada escenario se muestran en la [Figura 8](#).

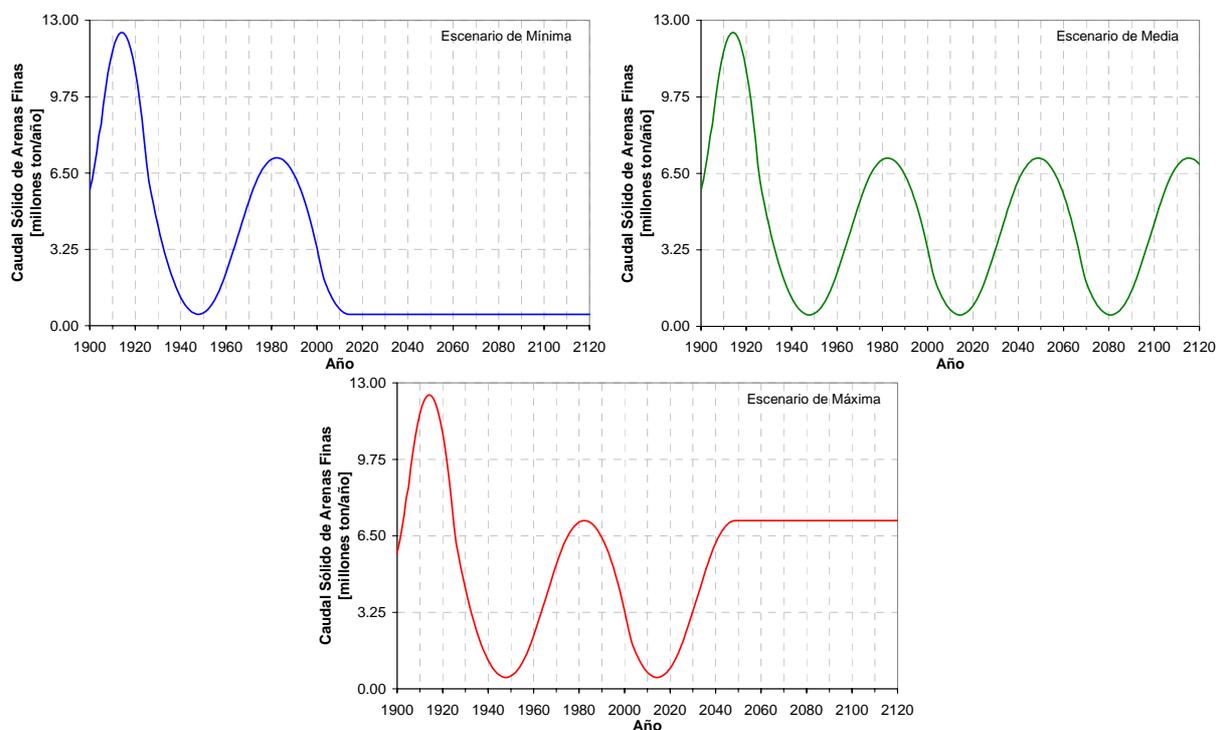


Figura 8: Caudal sólido de arenas finas para los tres escenarios propuestos

En función de los resultados obtenidos durante la simulación, se muestra, en la [Figura 9](#), el crecimiento del Delta del río Paraná hacia el año 2120 según los tres escenarios propuestos. Pueden observarse dos zonas de actividad, una Norte, en torno a las islas Oyarvide y Martín García, y otra Sur, en correspondencia con el subfrente Sur del Paraná de las Palmas. Puede notarse que hacia fines de siglo el Frente del Delta recorrerá prácticamente todo el partido de San Isidro, pudiendo llegar a Vicente López si se dieran escenarios entre media y máxima. También se destaca que la diferencia entre los resultados de los escenarios de media y máxima es mucho menor que entre los de media y mínima.

De esta forma, si bien no es posible asignar probabilidades a los escenarios propuestos, la cercanía entre los resultados de los escenarios medio y máximo torna mucho más probable que el Frente alcance Vicente López a que sólo llegue al fin de San Isidro a principios del próximo siglo.

Este avance del Frente tendrá varias consecuencias sobre el entorno urbano de la región. En particular, una mayor parte del canal de navegación Emilio Mitre quedará encajonada, lo cual afectará (no necesariamente en forma negativa) la estrategia de dragado. También se verán afectadas las tasas de sedimentación en los puertos y clubes náuticos de los partidos de San Isidro y Vicente López.

La toma de agua para la Planta General San Martín (la más importante de provisión de agua potable) podría presentar inconvenientes para los escenarios de media y máxima por su cercanía con el Frente del Delta, potenciando la posibilidad de generación de embancamientos

en su entorno o aumento de turbidez. Por el contrario, no se visualizan dificultades con las descargas de efluentes domésticos desde el emisario Berazategui y del futuro emisario “Dock Sud” (ex “Capital”).

Desde el punto de vista catastral, deberían preverse medidas de actualización periódicas del catastro de esta zona del Delta, perteneciente a la provincia de Buenos Aires, para evitar conflictos en relación al reconocimiento de titularidad sobre las nuevas tierras, tanto por parte de particulares como de municipios o entidades gubernamentales.

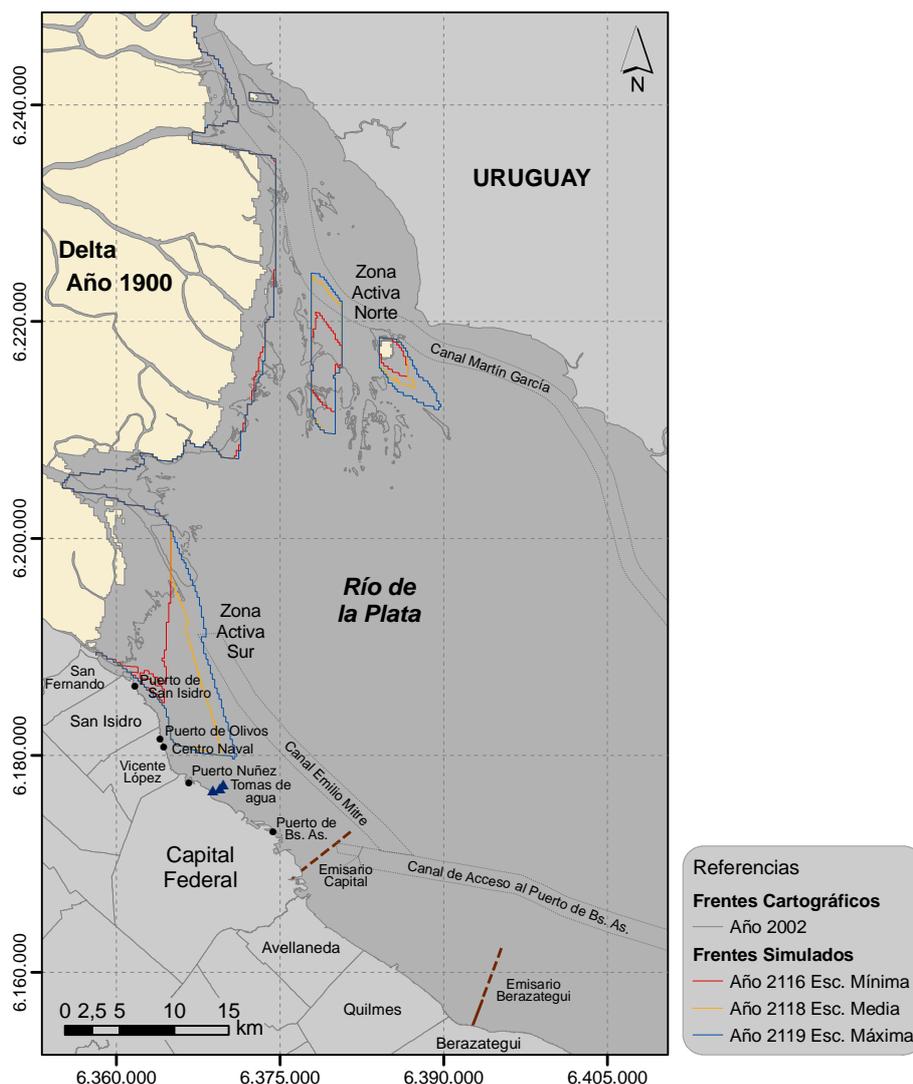


Figura 9: Crecimiento del Delta del río Paraná hacia el año 2120 según los distintos escenarios

## 5 CONCLUSIONES

El modelo implementado ha resultado adecuado para representar las tendencias de avance del Frente del Delta a gran escala durante todo el siglo XX.

Como resultado de la calibración, se infirió la historia temporal de la tendencia del caudal sólido de arenas finas del río Paraná para todo el siglo XX, información de gran interés para eventuales estudios morfológicos del río Paraná.

Los resultados obtenidos con el modelo para distintos escenarios del siglo XXI pueden

considerarse proyecciones confiables del avance futuro del Frente del Delta a gran escala, constituyendo, así, una herramienta eficaz para la gestión hídrica de mediano y largo plazo del Frente del Delta.

## 6 REFERENCIAS

- Abbott, M., *Computational Hydraulics*. Pitman, Boston, 1979.
- Amato, S.D., y Silva Busso, A., *Características geológicas de subsuelo y variaciones paleoambientales durante el cuartario en el área deltaica del río Paraná*. Informe INA en preparación, 2007.
- Bombardelli, F.A., Menéndez, A.N., Brea, J.D., Lapetina, M.R., y Uriburu Quirno, M., *Estudio hidrodinámico del Delta del Río Paraná mediante modelación matemática*. Informe LHA-INCyTH 137-03-95, 1995.
- Brea, J.D., Busquets, M.S., y Spalletti, P.D., *Generación y transporte de sedimentos en la alta cuenca del Río Bermejo. Impacto en la hidrovía, Delta del Paraná y Río de la Plata*. Programa Estratégico de Acción para la Cuenca del Río Bermejo, 1999.
- Harrison, A.J.M., y Owen, M.W., *Siltation of fine sediments in estuaries*. XIV Congress of the IAHR, Paris, 1971.
- Krone, R.B., *Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling processes*. Hydraulic Engineering Laboratory, University of California, Berkeley, 1962.
- Menéndez, A.N., *Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre*. Informe LHA-INCyTH S5-016-85, 1985.
- Menéndez, A.N., *On the accuracy of numerical methods for the two-dimensional shallow-water equations*. XXII IAHR Congress, Lausanne, 1987.
- Menéndez, A.N., *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 6, 1, 1990.
- Menéndez, A.N., y Castellano, R., *Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island*. 4th International Conference HydroInformatics 2000. Cedar Rapids, Iowa, USA, 2000.
- Ré, M., y Menéndez, A.N., *Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo*. Informe LHA-INA 03-216-03, 2003.
- Rinaldi, V., Abril, E., y Clariá, J., *Aspectos Geotécnicos Fundamentales de las Formaciones del Delta del Río Paraná y del Estuario del Río de la Plata*. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 6(2), 2006.
- Sarubbi, A., *Análisis del Avance del Frente del Delta del Río Paraná*. Tesis de grado en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, 2007.