

XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

BALANCE DE NUTRIENTES EN EL RIO DE LA PLATA USANDO MODELACIÓN MATEMÁTICA

Angel N. Menéndez, Patricia Jaime, Oscar Natale
INA, Ezeiza, Argentina

RESUMEN

Se efectúa un balance de nutrientes en el Río de la Plata Interior. El río es segmentado en base a consideraciones hidrodinámicas y morfológicas. Se utilizan resultados de un modelo hidrodinámico bidimensional existente para generar datos sobre los flujos advectivos y difusivos. El balance de nutrientes se lleva a cabo por medio de un modelo bidimensional de calidad de aguas. Este modelo se calibra usando distribuciones medidas de conductividad eléctrica. Luego se aplica para efectuar el balance de nitrato, amonio, nitrógeno orgánico total, fósforo total, fósforo de fosfato y carbono orgánico total (a través de datos de DBO). Se utilizan mediciones disponibles de concentración en los tributarios, efluentes y sobre el frente exterior (transición al río exterior) para obtener las distribuciones de concentración sobre todo el río interior, que son entonces comparadas con las medidas. Se extraen una serie de importantes conclusiones en relación a la dinámica del sistema. La aplicación ilustra la capacidad de la metodología utilizada para proveer información tanto cualitativa como cuantitativa acerca de la dinámica del sistema. Los resultados son de fundamental importancia para establecer estrategias de gerenciamiento.

ABSTRACT

A nutrient balance for the Inner Río de la Plata River is performed. The river is segmented based on hydrodynamic and morphological considerations. Results from an existing 2D hydrodynamic model are used to generate data on the advective and diffusive fluxes. The nutrient balance is performed by means of a 2D water quality model. This model is calibrated using measured electrical conductivity distributions. It is then applied to perform the balance for nitrate, ammonia, total organic nitrogen, total phosphorous, phosphate phosphorous, and total organic carbon (through BOD data). Available measured concentration for the tributaries, effluents and the outer front (transition to outer river) are used to obtain the concentration distributions throughout the inner river, which are then compared with measured distributions within the river. A series of interesting conclusions regarding the system dynamics are drawn from the study. The application illustrates the capacity of the used methodology to provide both qualitative and quantitative information about the systems dynamics. The results are of prime importance in order to develop management strategies.

INTRODUCCION

El Río de la Plata (Fig. 1), localizado sobre la costa este de Sudamérica y constituyendo uno de los límites entre Argentina y Uruguay, juega un rol vital desde un punto de vista económico, social y ecológico. Es el drenaje final de una cuenca de 3.170.000 km². Su longitud es de sólo 290 km, pero su ancho es enorme: rápidamente alcanza 50 km en su parte superior, crece hasta alrededor de 70 km en su parte media (ambas zonas en conjunto constituyen el Río de la Plata Interior) y se expande abruptamente hasta alrededor de 200 km en su parte inferior (Río de la Plata Exterior). Buenos Aires y Montevideo, ciudades capitales de Argentina y Uruguay, respectivamente, yacen sobre sus costas. Las aguas del río constituyen la principal fuente de provisión de agua para los habitantes del Area Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). Al mismo tiempo, recibe las descargas domésticas e industriales de toda el área. Las continuamente crecientes actividades de dragado, para permitir el tránsito de buques oceánicos hacia los puertos de Buenos Aires y Rosario, han tenido lugar por más de un siglo. La navegación deportiva y para traslado de pasajeros es permanente. El “frente de turbidez” (límite de la penetración de las arcillas suspendidas), localizado en la transición entre las zonas interior y exterior, constituye una zona crítica para cría de peces.

Todos estos diferentes usos y funciones no han conducido, hasta el presente, a conflictos mayúsculos debido, básicamente, a la gran capacidad del río. No obstante, la intensificación de estas actividades y el planteo de nuevos proyectos ingenieriles [10] han ya abierto la discusión acerca de la real capacidad del río para lidiar con los escenarios futuros conflictivos. Como una contribución a la comprensión y la previsión de esos escenarios, en este trabajo se presentan los resultados de un estudio encarado para determinar la influencia que las diferentes fuentes de nutrientes tienen sobre la calidad de las aguas del Río de la Plata Interior. Para llevar a cabo el balance de nutrientes se utiliza una combinación de mediciones y modelación matemática. Estos resultados son de fundamental importancia para desarrollar estrategias de gerenciamiento del recurso.

MODELACIÓN HIDRODINAMICA

La hidrodinámica del Río de la Plata Interior puede ser modelada utilizando la teoría de aguas poco profundas, ya que hasta allí no llega la intrusión de agua marina. En el INA se encuentra operativo un modelo bidimensional de detalle de todo el Río de la Plata [6], implementado en base al software HIDROBID II [8]. Este modelo fue explotado para obtener las trayectorias de las partículas fluidas. Como forzante se utilizó un escenario hidrometeorológico medio. Las trayectorias muestran una forma espiralada, debido a la acción de la marea, combinada con una deriva neta hacia el océano. Dado que la escala de tiempos para el análisis presente es del orden de los meses, las oscilaciones de marea fueron filtradas. La Fig. 1 muestra las trayectorias medias así obtenidas. Nótese la zona de recirculación que se desarrolla sobre la costa argentina, en la parte final del río interior. Este desprendimiento del flujo se debe a la topografía del fondo.

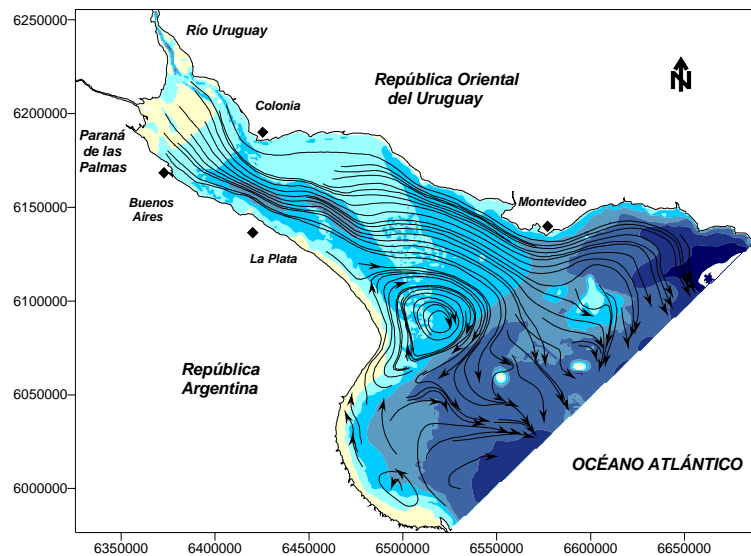


Figura 1 Trayectorias medias de las partículas

En base a las trayectorias medias de las partículas, se distinguieron tres corredores de flujo (Fig. 2), cada uno asociado a uno de los tres tributarios principales que, desde la costa argentina, son el Paraná de las Palmas, el Paraná Guazú y el Uruguay. Cada corredor de flujo transporta, en promedio, la descarga correspondiente al tributario asociado. Dentro de cada corredor el transporte de agua está fuertemente dominado por la advección debida a la corriente media, aunque alguna difusión lateral ocurre debido a la turbulencia y las oscilaciones de la velocidad.

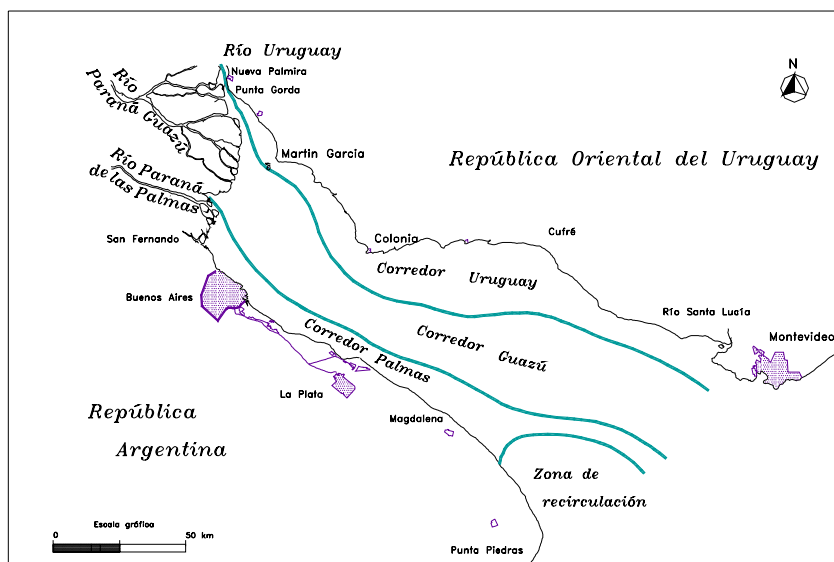


Figura 2 Corredores de flujo en el Río de la Plata Interior

MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUAS

Para llevar a cabo el balance de nutrientes se utilizó el software WASP5, de la USEPA [4]. Requiere efectuar una segmentación del cuerpo de agua, de modo de evaluar el intercambio de contaminantes entre ellos y las cinéticas que ocurren dentro de ellos.

Consistentemente con el análisis hidrodinámico, se impuso una segmentación bidimensional. Los tres corredores de flujo, definidos en base a consideraciones hidrodinámicas, fueron particionados en base a consideraciones de morfología del fondo, principalmente ligadas a límites de bancos. Los 12 segmentos resultantes se muestran en la Fig. 3.

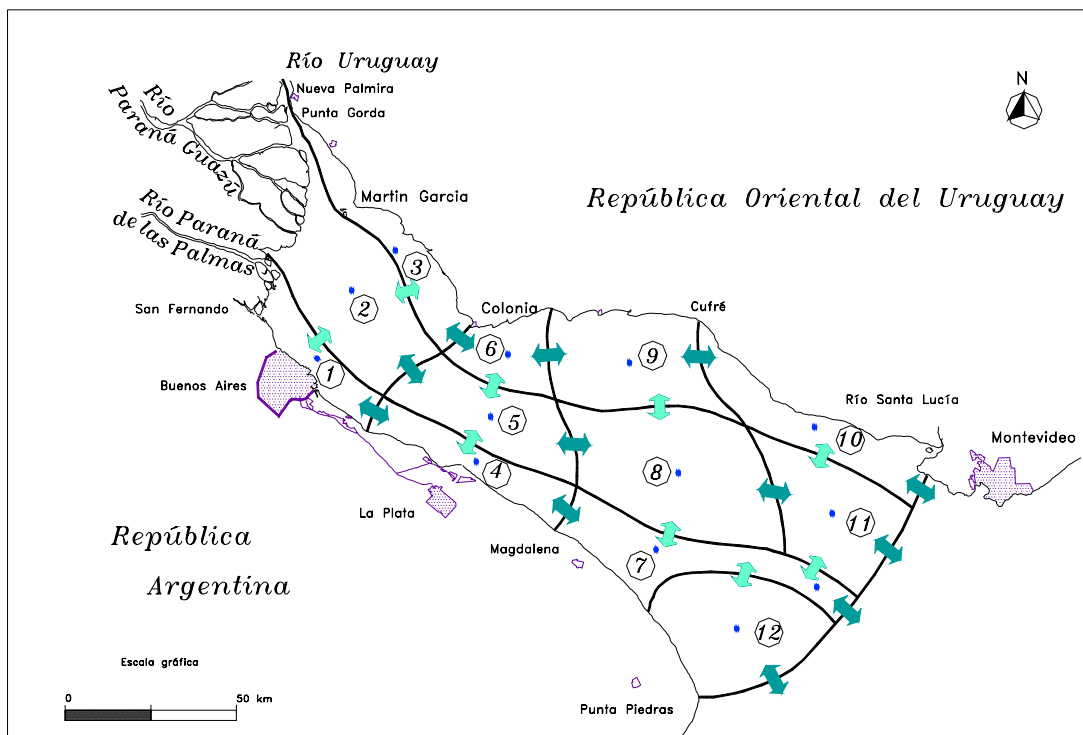


Figura 3 Segmentación

Los flujos advectivos y difusivos medios a través de cada cara fueron calculados utilizando los resultados del modelo hidrodinámico. El flujo difusivo está ligado tanto a la difusión turbulenta en la dirección respectiva como a la acción combinada de la advección diferencial y la turbulencia en la dirección transversal, mecanismo conocido como dispersión.

El modelo de calidad de aguas fue calibrado utilizando datos disponibles de mediciones de conductividad eléctrica, que es un indicador conservativo. La Fig. 4 muestra la distribución de conductividad sobre la totalidad del Río de la Plata Interior [7], construida a partir de dos fuentes de datos diferentes: un muestreo de alta densidad a lo largo de la costa argentina [2] y uno de baja densidad sobre el resto del río [3].

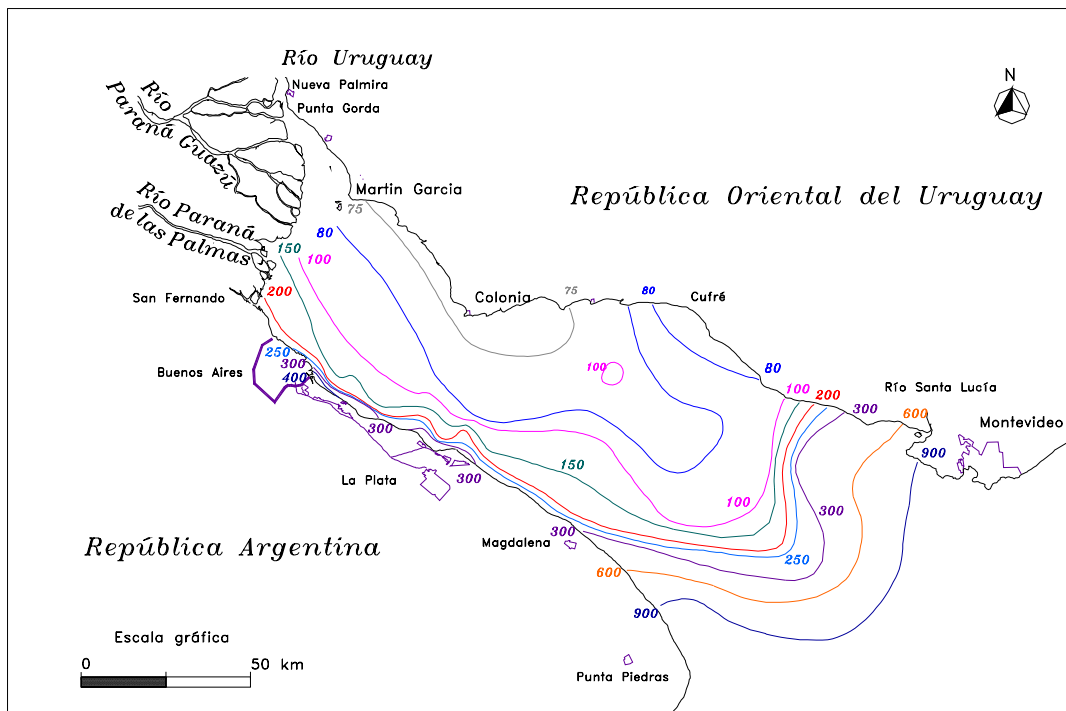


Figura 4 Distribución de conductividad eléctrica

Las tres fuentes primarias de conductividad son: los tributarios principales, el Río de la Plata Exterior (donde hay penetración salina) y el AMBA.

Se dispuso de valores de conductividad para los tributarios principales [7]. En la frontera entre los ríos interior y exterior se impusieron los valores que surgen de la distribución construida. Las descargas líquidas desde el AMBA, que incluyen pequeños tributarios y ductos, también es conocida [1]. Entonces, la conductividad media para estos últimos aportes fue utilizada como parámetro de calibración.

Durante el proceso de calibración se extrajeron dos conclusiones de gran importancia. En primer lugar, la difusión turbulenta entre segmentos adyacentes lateralmente es muy débil; en consecuencia, la carga contaminante aportada al Río de la Plata por cada tributario principal prácticamente permanece dentro del corredor de flujo asociado. En segundo lugar, la dispersión en la cara externa de los segmentos localizados en el extremo exterior es mucho mayor que en el resto del río interior; esto fue explicado en términos de las corrientes laterales que se desarrollan dentro del río exterior, pero que están ausentes en el río interior [9]. El coeficiente de dispersión asociado a esta frontera fue también utilizado como parámetro de calibración.

La Fig. 5 presenta la comparación entre los valores de conductividad medido y calculado para cada segmento, donde se observa un acuerdo muy satisfactorio. Este fue logrado con un coeficiente de dispersión de 2×10^4 , que puede ser fácilmente explicado en términos de las oscilaciones de la velocidad lateral [7], y un valor de conductividad media para el aporte del AMBA de alrededor de $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$, muy similar a las pocas mediciones disponibles sobre el principal tributario de esta zona, el Riachuelo [5]. Se consideró también una carga de conductividad proveniente del lado uruguayo, mucho menor en magnitud, la cual no pudo ser verificada.

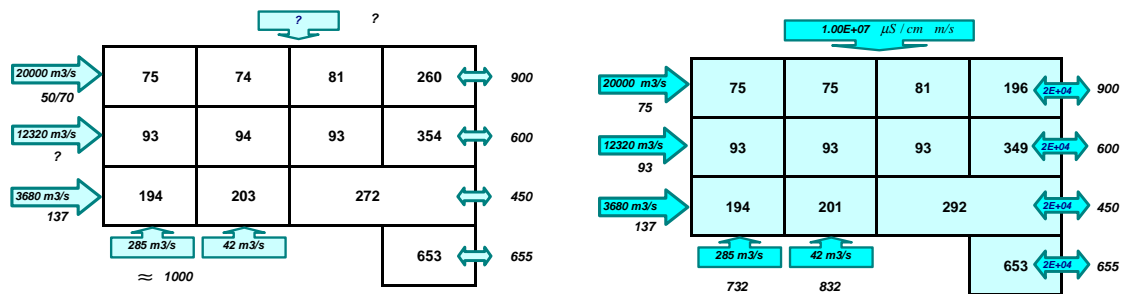


Figura 5 Comparación entre valores medidos (izquierda) y calculados (derecha) de conductividad media sobre los segmentos.

BALANCE DE NUTRIENTES

Nitrógeno

Se distinguieron las tres especies principales del nitrógeno: nitrato, amonio y nitrógeno orgánico total. Para los dos primeros las distribuciones de concentración en el río interior fueron construidas de la misma manera que para la conductividad eléctrica, es decir, ensamblando datos de muestreo de alta densidad para la zona costera [2] y de baja densidad para el resto del río [3]. En el caso de nitrógeno orgánico total no se dispuso de muestreos costeros de alta densidad [11]; en consecuencia, los valores medios calculados en los segmentos costeros a partir de los datos de baja densidad fueron considerados subestimaciones de los valores reales.

Se dispuso de valores de concentraciones de nitrógeno para los principales tributarios [7] y de flujos de amonio hacia el Río de la Plata para cada uno de los pequeños tributarios y ductos provenientes del AMBA [1]. Para nitrato y nitrógeno orgánico total sólo se encontraron unas pocas mediciones de concentración en el Riachuelo [5]. En la frontera exterior se utilizaron los valores de concentración inducidos a partir de las distribuciones. Ahora, el rol principal de esta última condición de contorno es tratar de forzar la uniformidad lateral de la distribución (debido a las oscilaciones laterales de la velocidad), en lugar de representar una de las fuentes dominantes, como era el caso para la conductividad. Por el contrario, el río exterior se comporta más como un sumidero de nitrógeno advectado desde el río interior.

El coeficiente de dispersión exterior fue fijado en el valor ajustado durante la calibración para la conductividad eléctrica. De modo que sólo las cargas laterales fueron tomadas como parámetros de calibración.

Del juego entre el proceso de calibración y el análisis de las distribuciones de concentración se concluyó que, dentro de la precisión de las mediciones disponibles, tanto el nitrógeno inorgánico total (obtenido como la suma de las concentraciones de nitrato y amonio) como el nitrógeno orgánico total se comportan como sustancias conservativas a lo largo del Río de la Plata Interior. Esto significa que no son significativas ni las transferencias con el exterior (hacia o desde la atmósfera y los sedimentos del fondo) ni los procesos de mineralización. En cambio, sí pudo distinguirse una cinética de nitrificación.

La comparación entre concentraciones medias medidas y calculadas para las tres especies mostraron un acuerdo relativamente bueno. Las cargas medias desde el AMBA resultaron muy consistentes con las mediciones disponibles. En particular, las concentraciones calculadas de nitrógeno orgánico total en los segmentos adyacentes a la costa argentina fueron mayores que los valores medidos, tal como se esperaba, aunque la diferencia entre ellos resultó pequeña. Se agregaron algunas cargas desde la costa uruguaya, sin verificación. La tasa de nitrificación fue estimada en 0,012 1/día, que es bastante menor que los valores obtenidos a partir de estudios de modelación para procesos de nitrificación en el Río de la Plata asociados a plumas originadas en descargas continentales [1], indicando que otro proceso cinético, ligado a escalas de orden mayor, es el responsable de esta transformación.

Fósforo

En el caso del fósforo, se dispuso de datos de concentración para el fósforo total y el fósforo de fosfato. Para éste último se pudo construir una distribución de concentración completa, incluyendo muestreos de alta densidad sobre la costa argentina [7]. En cambio, no se tuvieron esos datos de alta densidad para el fósforo total.

También se dispuso de valores de concentración en los tributarios principales y en las descargas desde el AMBA [7]. Nuevamente, las concentraciones en la frontera exterior fueron inferidas a partir de las distribuciones.

Se concluyó que, dentro de la precisión de las mediciones disponibles, ambos constituyentes pueden ser considerados como conservativos a lo largo de todo el río interior. Las distribuciones calculadas y medidas mostraron un acuerdo relativamente bueno, excepto para la concentración de fósforo total sobre el corredor del Paraná de las Palmas, que, tal cual era de esperarse debido a la ausencia de muestreos de alta

densidad, resultó mayor que los valores estimados a partir de las mediciones de baja densidad.

Carbono Orgánico Total

Se llevó a cabo un balance de carbono orgánico total a través del análisis del parámetro subrogante Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). Como sólo se dispuso de muestreos de alta densidad sobre la costa argentina [2], el balance se confinó al corredor del Paraná de las Palmas, tomando ventaja del ya mencionado transporte lateral insignificante por difusión. Se utilizaron mediciones de DBO en el Paraná de las Palmas mismo y en el Riachuelo [7].

Resultó claramente reconocible un proceso de biodegradación. Se estimó una tasa de deoxigenación de 0,03 1/día. Los valores de carga desde la costa argentina utilizados para calibrar resultaron muy similares a los datos disponibles. El acuerdo entre cálculo y mediciones resultó satisfactorio.

FLUJOS DE NUTRIENTES

Habiendo establecido un balance para cada constituyente, dentro del Río de la Plata Interior, los flujos de nutrientes resultantes pueden ser utilizados como estimaciones confiables. A título de ilustración, la Tabla 1 presenta los flujos para las tres especies del nitrógeno. Como una conclusión general se observa que, considerando el río en su totalidad, los principales tributarios son las fuentes dominantes de nutrientes. No obstante, sobre el corredor del Paraná de las Palmas las cargas desde el AMBA son claramente superiores a las del Paraná de las Palmas mismo.

Tabla 1 Flujos de nitrógeno

Sustancia	Flujos (ton/día)					
	Tributarios	Costa argentina	Costa uruguaya	Entrada total	Salida al río exterior	Pérdidas
N-NO ₃	400.9	60	52	512.9	594.9	+82
N-NH ₄	101.5	180	28	309.5	227.5	-82
NOT	3291.5	148	50	3489.5	3489.5	0

CONCLUSIONES

Del estudio han surgido una serie de conclusiones interesantes en relación a la dinámica del sistema Río de la Plata Interior: la identificación de tres corredores de flujo adyacentes, con una mezcla lateral débil entre ellos; la evidencia de una relativamente intensa mezcla longitudinal en el frente exterior, asociada a las oscilaciones laterales de la velocidad; la verificación de dos procesos de transformación (nitrificación y biodegradación), para los cuales se estimaron las constantes de decaimiento, y del comportamiento conservativo de las especies restantes, al menos dentro de la precisión de los datos; el establecimiento de la magnitud de la carga de nutrientes desde los tributarios principales y desde las fuentes costeras y los flujos hacia el río exterior.

La aplicación ilustra la capacidad de la metodología utilizada, que combina datos registrados y modelación para proveer información tanto cualitativa como cuantitativa acerca de la dinámica del sistema.

REFERENCIAS

1. AASA (1998) *Plan de Saneamiento Integral – Memoria Técnica – Documento D. Anexo 8: Modelización Matemática de los Ríos. Anexo 8.1: Modelo de Calidad de Agua de la Franja Costera del Río de la Plata*. Informe de Aguas Argentinas S.A., Etapa 1, Vol. 1.
2. AGOSBA-OSN-SHN (1993) *Calidad de las Aguas Franja Costera Sur (San Isidro-Magdalena)*. Informe de la Administración General de Obras Sanitarias de la Provincia de Buenos Aires, Obras Sanitarias de la Nación y Servicio de Hidrografía Naval.
3. CARP (1989) *Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata*. Informe de Avance del SHN y el OSMA para la Comisión Administradora del Río de la Plata.
4. Di Toro, D.M., Fitzpatrick, J.J. and Toman, R.V. (1981) *Water Quality Analysis Simulation Program (WASP) and Model Verification Program (MVP) – Documentation*. Hydroscience, Inc., Westwood, NY, for USEPA, Duluth, MN, Contract No. 68-01-3872.
5. INA (1999) *Operación de una red de monitoreo de calidad de agua y sedimentos en la cuenca Matanza-Riachuelo y puesta a punto de un modelo de calidad*. Informe del Instituto Nacional del Agua.
6. Jaime, P. and Menéndez, A.N. (1999) *Modelo hidrodinámico RIO DE LA PLATA 2000*. Informe LHA-INA 183-01-99.
7. Jaime, P., Menéndez, A.N. y Natale, O. (2001) *Balance y dinámica de nutrientes principales en el Río de la Plata Interior*. Informe INA 10.4-01, Setiembre.

8. Menéndez, A.N. (1990) *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, vol. 6, 1.
9. Menéndez, A.N. (2000) *Description and modeling of the hydrosedimentologic mechanisms in the Río de la Plata River*. In Proc. of VII International Seminar on Recent Advances in Fluid Mechanics, Physics of Fluids and Associated Complex Systems, Buenos Aires, Argentina, October.
10. Menéndez, A.N. and Castellano, R. (2000) *Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island*. In Proc. of the 4th International Conference Hydroinformatics 2000, Cedar Rapids, Iowa, USA, July.
11. Quirós, R. and Senone, H. (1985) *Niveles de nutrientes y pigmentos fotosintéticos en el Río de la Plata interior*. Informe Técnico No. 1, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero.