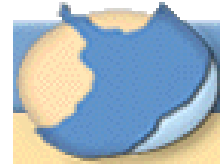




INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



ANTECEDENTES SOBRE CALIDAD DEL AGUA DEL RIO DE LA PLATA

Componente B: Modelación de Calidad del Agua

Segundo Informe Parcial

Análisis de Antecedentes



**Proyecto PNUD ARG/09/G46: “Reducción y prevención de la contaminación de origen terrestre en el Río de la Plata y su Frente Marítimo mediante la implementación del Programa de Acción Estratégico de FREPLATA”.
Proyecto FREPLATA II**



*Proyecto INA1090
Informe INA 02-1090-12
Ezeiza, Julio de 2012*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Mag. María Fernanda LOPOLITO

Ing. Mag. Mariano RE

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Mag. Mariano RE

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

ANTECEDENTES SOBRE CALIDAD DEL AGUA DEL RIO DE LA PLATA

Componente B: Modelación de Calidad del Agua

Informe

Análisis de Antecedentes

RESUMEN

Se efectúa una síntesis de los resultados más significativos que han surgido de los estudios de modelación antecedentes, estructurados en función de grandes problemáticas, con énfasis en los aspectos que hacen a la gestión del recurso hídrico. Ello provee una visión interpretativa de los principales problemas, a saber, los patrones generales de circulación, la distribución de salinidad en el Río de la Plata Exterior, la distribución de contaminantes a diversas escalas, y la dinámica de sedimentos finos a diversas escalas. También se puntualizan observaciones sobre la metodología de modelación.

Descriptor temático: Modelación, Hidrodinámica, Calidad del Agua, Transporte de Sedimentos, Transporte de Contaminantes.

Descriptor geográfico: Río de la Plata, Argentina, Uruguay.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	LÍNEA DE TIEMPO	5
3	GRANDES PATRONES DE CIRCULACIÓN	7
3.1	Zonificación	7
3.2	Río de la Plata Interior	8
3.3	Río de la Plata Exterior	11
3.4	Región de Bahía de Samborombon	12
3.5	Región costera de Montevideo	12
4	SALINIDAD	14
4.1	Frente Salino	14
4.2	Corrientes de densidad	16
4.3	Efectos del viento	16
5	DINÁMICA DE CONTAMINANTES	18
5.1	Transporte	18
5.2	Balance de Nutrientes	18
5.3	Emisarios subacuáticos	19
5.3.1	Emisario Berazategui	19

5.3.2	Emisario Capital / Dock Sud	20
5.3.3	Emisario Punta del Este	21
5.3.4	Emisario Punta Lobos	22
5.4	Descargas térmicas	22
5.4.1	Central Térmica 'José Battle y Ordoñez'	22
5.4.2	Central Térmica 'Dock Sud'	23
5.4.3	Central Térmica 'Costanera Sur'	23
5.4.4	Central Térmica 'Puerto Nuevo'	24
5.5	Zonas de Uso	25
6	DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS	28
6.1	Gradación	28
6.2	Sedimentación en canales de navegación	28
6.3	Plumas de turbidez	29
6.4	Efectos de rellenos	30
6.5	Avance del Frente del Delta del Paraná	31
6.6	Dinámica general	34
7	ELEMENTOS DE MODELACIÓN	37
7.1	Forzantes del transporte	37
7.1.1	Mareas en el Río de la Plata	37
7.1.2	Campos de vientos	37
7.1.3	Condiciones de borde de caudal	38
7.2	Condicionantes del transporte	38
7.2.1	Batimetría	38
7.2.2	Condiciones de borde oceánicas	38

7.2.3	Rugosidad del fondo	38
7.2.4	Difusividad	39
7.3	Decaimiento bacteriano	39
7.4	Tamaño de sedimentos	39
7.5	Códigos numéricos y software	39
7.6	Discretización	40
7.7	Esquemas Numéricos	40
8	CONCLUSIONES	41

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto PNUD ARG/09/G46: *“Reducción y prevención de la contaminación de origen terrestre en el Río de la Plata y su Frente Marítimo mediante la implementación del Programa de Acción Estratégico de FREPLATA”* ha encomendado al Instituto Nacional del Agua (INA) su participación en el estudio de *“Antecedentes sobre Calidad del Agua del Río de la Plata”*. Este se desarrolla a partir de tres líneas de trabajo, consideradas en tres diferentes componentes: A) Monitoreo de Calidad del Agua, B) Modelación de Calidad del Agua, y C) Monitoreo de Floraciones Algales.

El grupo de trabajo está conformado por personal del Programa Nacional de Calidad de Aguas (PNCA-Gerencia de Programas y Proyectos) para la Componente A, el Programa de Hidráulica Computacional (PHC-Laboratorio de Hidráulica) para la Componente B, y del Programa de Investigación sobre los Ecosistemas Acuáticos (PEA-Gerencia de Programas y Proyectos) para la Componente C.

En el Primer Informe Parcial de la Componente B se presentó una recopilación de los antecedentes sobre modelación de calidad del agua para el Río de la Plata, materializada en fichas bibliográficas y publicaciones asociadas, accesibles mediante una Base de Datos (DBRdP v1.0). En este Segundo Informe Parcial de la Componente B se efectúa, en base a esos antecedentes, una síntesis de los resultados más significativos que han surgido de los estudios de modelación, estructurados en función de grandes problemáticas, con énfasis en los aspectos que hacen a la gestión del recurso hídrico.

La organización del Informe es la siguiente: en primer lugar se describe brevemente la evolución histórica de los estudios de modelación (capítulo 2); luego se presentan las síntesis para cada una de las grandes problemáticas identificadas (cada una con una serie de problemas particulares), a saber, patrones de circulación (capítulo 3), salinidad (capítulo 4), dinámica de contaminantes (capítulo 5) y dinámica de sedimentos finos (capítulo 6); a continuación se incluyen comentarios sobre aspectos de la metodología de modelación (capítulo 7); el informe se cierra con las Conclusiones (capítulo 8).

2 LÍNEA DE TIEMPO

La Figura 2.1 presenta, en una línea de tiempo, la secuencia de los trabajos de modelación matemática sobre simulación de la hidrodinámica, el transporte de contaminantes y el transporte de sedimentos en el Río de la Plata.

Los primeros antecedentes sobre modelación matemática en el Río de la Plata se remontan a la década de 1970, en donde se probaron diferentes esquemas numéricos para resolver en primera aproximación la hidrodinámica del Río de la Plata Interior (Makler, 1976; Makler et al., 1976; Marshall et al. 1978).

A partir de la década de 1980 comenzaron las primeras aplicaciones sistemáticas de modelación matemática hidrodinámica en el Río de la Plata (Molinari, 1986; Albarracin, 1987; Olalde 1988). Con estas aplicaciones se demostró la factibilidad de simular el patrón de corrientes en el Río de la Plata con un código numérico que resolvía las ecuaciones para aguas poco profundas (Menéndez, 1985), alcanzándose una primera interpretación integral del funcionamiento del sistema. También, según lo revisado por Piedra-Cueva et al. (2002a), se dieron una serie de aplicaciones enfocadas a la dinámica costera uruguaya del Río de la Plata con fines ingenieriles. Como aplicación de calidad de agua aparece en este período un primer estudio de envergadura en donde se analiza la dispersión del efluente cloacal de la ciudad de Buenos Aires, vertido en el Río de la Plata a través del emisario submarino de Berazategui (Carreras y Menéndez, 1987; 1988; 1989; 1990; Menéndez, 1991).

La década de 1990 avanzó con las primeras publicaciones científicas sobre la dinámica del Río de la Plata (Rodrigues Vieira, 1990; O'Connor, 1991) y la presentación de un modelo síntesis de todas las experiencias anteriores (Jaime y Menéndez, 1999). En el campo de la modelación de calidad de agua surgieron una serie de estudios vinculados con problemáticas costeras locales (Menéndez, 1996; Menéndez, 1997a,b; EIH, 1998; Menéndez et al., 1999). En cuanto a la modelación del transporte de sedimentos, se plantearon las bases de un primer modelo integral del Río de la Plata (Guarga et al., 1991).

Durante la década de 2000, y junto con el desarrollo del Proyecto FREPLATA, se destacan una serie de trabajos en donde se analizaron detalladamente los patrones de circulación del Río de la Plata, conjugando distintas visiones y experiencias (Piedra-Cueva y Fossati, 2003; Simionato et al., 2003; Re y Menéndez, 2004; entre otros). Se planteó (Jaime et al., 2001) y se fortaleció (Simionato et al., 2003; Re y Menéndez, 2006; Piedra-Cueva y Fossati, 2007; entre otros) el concepto de '*Corredores de Flujo*' en el Río de la Plata Interior. Además, se trabajó fuertemente en el análisis del frente salino (Destuynder y Tarela, 2002; Simionato y Núñez, 2002; Kind, 2004; Fossati y Piedra-Cueva, 2008; entre otros). Hacia finales de esta década se destacan varios estudios que abordan problemáticas costeras (Fossati et al., 2008; Re et al., 2009), un abordaje exhaustivo de la temática de emisarios submarinos, tanto en la costa uruguaya como en la argentina (Fossati et al., 2009; Roberts y Villegas, 2009; Menéndez et al., 2009), el primer estudio hidrosedimentológico a escala de todo el Río de la

Plata (Piedra-Cueva et al., 2006), y la evaluación de la calidad del agua en la Franja Costera Sur (Menéndez et al., 2011).

En la actualidad se sigue trabajando en un modelo integral de transporte de sedimentos finos para comprender su dinámica a escala de todo el río, dando continuidad a la red de modeladores formada con el Proyecto FREPLATA (Simionato et al., 2011), y en la puesta a punto de un modelo operacional del Río de la Plata (Santoro et al., 2011).

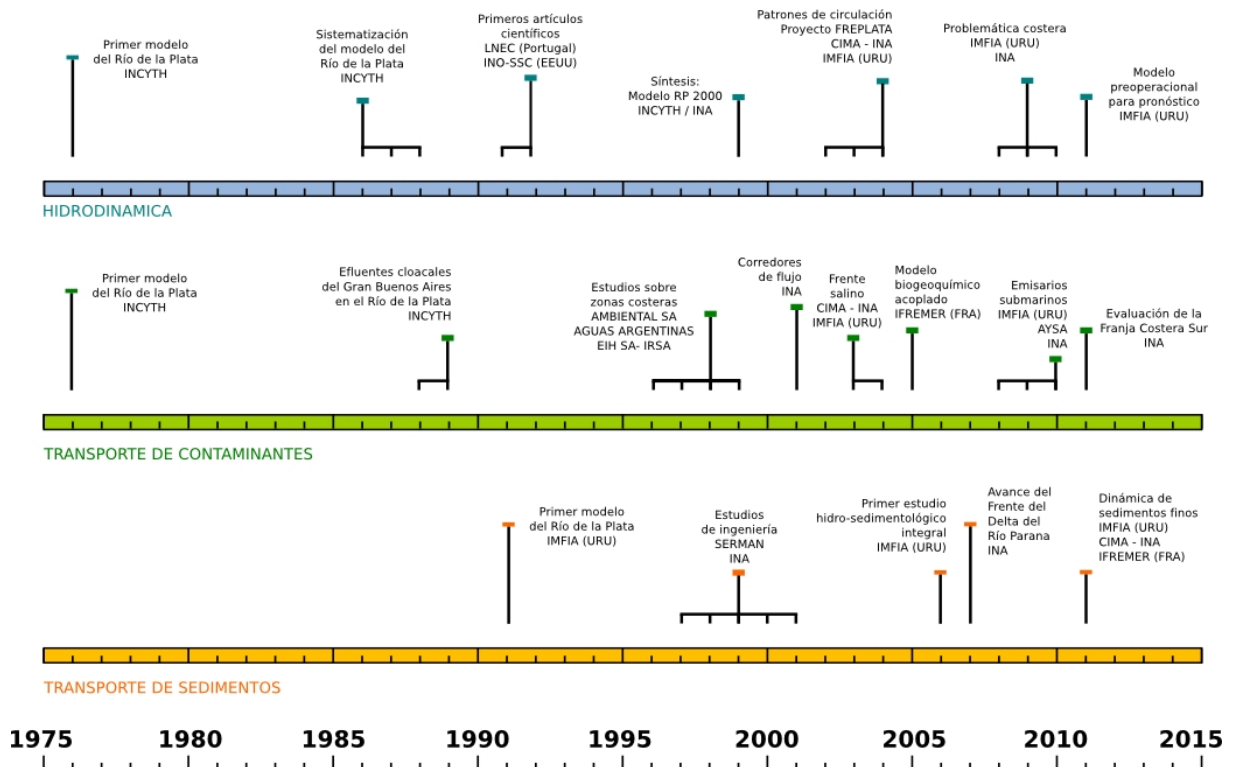


Figura 2.1. Línea de tiempo de antecedentes principales de modelación matemática en el Río de la Plata.

3 GRANDES PATRONES DE CIRCULACIÓN

3.1 Zonificación

La circulación en el Río de la Plata depende principalmente de la batimetría, la onda de marea ingresante al estuario, las descargas de los tributarios y el campo de vientos (Simionato *et al.*, 2004; Piedra-Cueva y Fossati, 2007; entre otros). Los grandes patrones de circulación del Río de la Plata pueden ser descriptos con mayor detalle según las dos regiones en que se suele dividir al estuario: Río de la Plata Interior (subdividido en Río de la Plata Superior y Río de la Plata Intermedio) y Río de la Plata Exterior (Figura 3.1).



Figura 3.1. Río de la Plata Interior y Exterior.

Dentro de cada región existen zonas con dinámicas particulares, tales como la Bahía de Samborombon y la zona costera de Montevideo.

3.2 Río de la Plata Interior

En el Río de la Plata Interior la batimetría juega un rol central en la circulación, en donde el flujo tiende a seguir los canales naturales, con relativamente baja influencia de la descarga continental (Simionato et al., 2003). La variación de la descarga continental no produce cambios importantes en los patrones de circulación, sino sólo en la intensidad del transporte (Figura 3.2).



Figura 3.2. Mapa de velocidades de corriente en el Río de la Plata (Jaime y Menéndez, 1999)

En condiciones hidrometeorológicas medias, en el Río de la Plata Interior pueden identificarse tres corredores de flujo (Figura 3.3), con escasa mezcla entre ellos, cada uno de los cuales conduce las aguas descargadas por los tres principales afluentes: Paraná de las Palmas, Paraná Guazú y Uruguay, tal como fue planteado por Jaime et al. (2001), y confirmado en estudios posteriores (Simionato et al., 2003; Piedra-Cueva y Fossati, 2007). Esta asociación con los tributarios de origen constituye los denominados corredores de flujo. Tanto en condiciones medias de invierno como de verano, el espesor de la zona donde se desarrolla algún nivel de mezcla significativa es del orden, como máximo, de unos pocos kilómetros en el Río de la Plata Superior (que se extiende hasta la línea imaginaria Buenos Aires-Colonia), duplicándose recién al llegar al final del Río de la Plata Interior. Las capas de mezcla sufren desplazamientos laterales de entre aproximadamente 500 y 2500 m bajo la acción del régimen de mareas, como se muestra en la Figura 3.4 (Re y Menéndez, 2004).

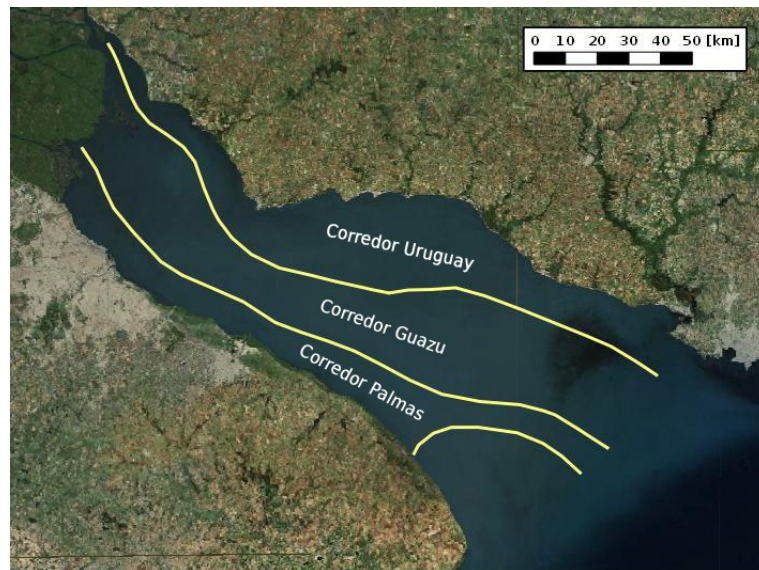


Figura 3.3. Corredores de flujo en el Río de la Plata Interior (Jaime et al., 2001)

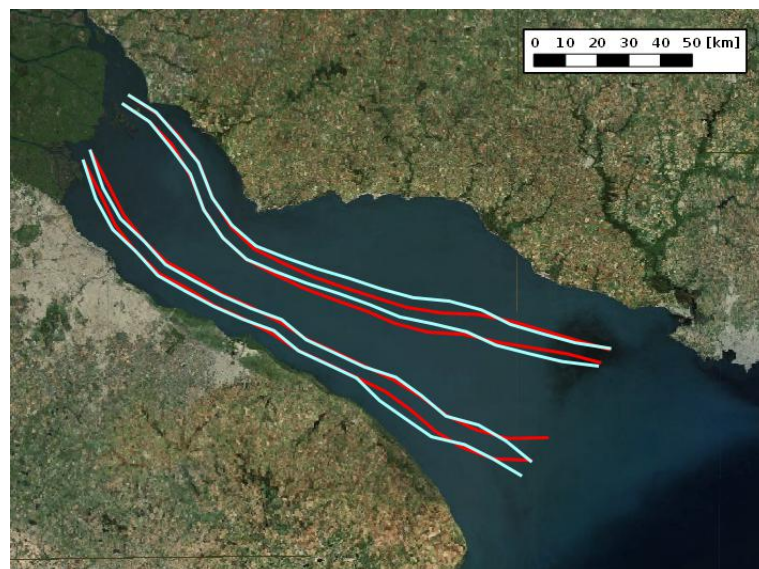


Figura 3.4. Envolturas de espesores de capas de mezcla para condiciones medias en los forzantes (Rojo: Verano, Celeste: Invierno) (Re y Menéndez, 2004).

Durante las tormentas asociadas a Sudestadas, el nivel del Río de la Plata está básicamente controlado por la onda ingresante por su boca. Las líneas de isonivel de la superficie libre resultan normales a la dirección del viento, determinando que las corrientes de deriva sigan la dirección del viento. Por efectos del apilamiento aparecen corrientes de gradiente, las cuales dependen básicamente de la batimetría (Olalde, 1988). La contribución de los vientos locales al aumento de nivel de la superficie libre es secundaria (Jaime y Menéndez, 1999). El ingreso de una onda de tormenta produce, por un lado, el frenado, e incluso el retroceso del flujo descargado por los tributarios, y por otro, una mezcla de gran escala de las masas de agua. Estos efectos cesan junto con la tormenta, observándose una tendencia a la reconstrucción de los corredores de flujo, particularmente rápida en el Río de la Plata Superior (Figura 3.5). El espesor de las capas de mezcla varía temporariamente,

aumentando en la zona superior y disminuyendo en la zona media del río, pero esa variación desaparece rápidamente al cesar la tormenta (Re y Menéndez, 2006).

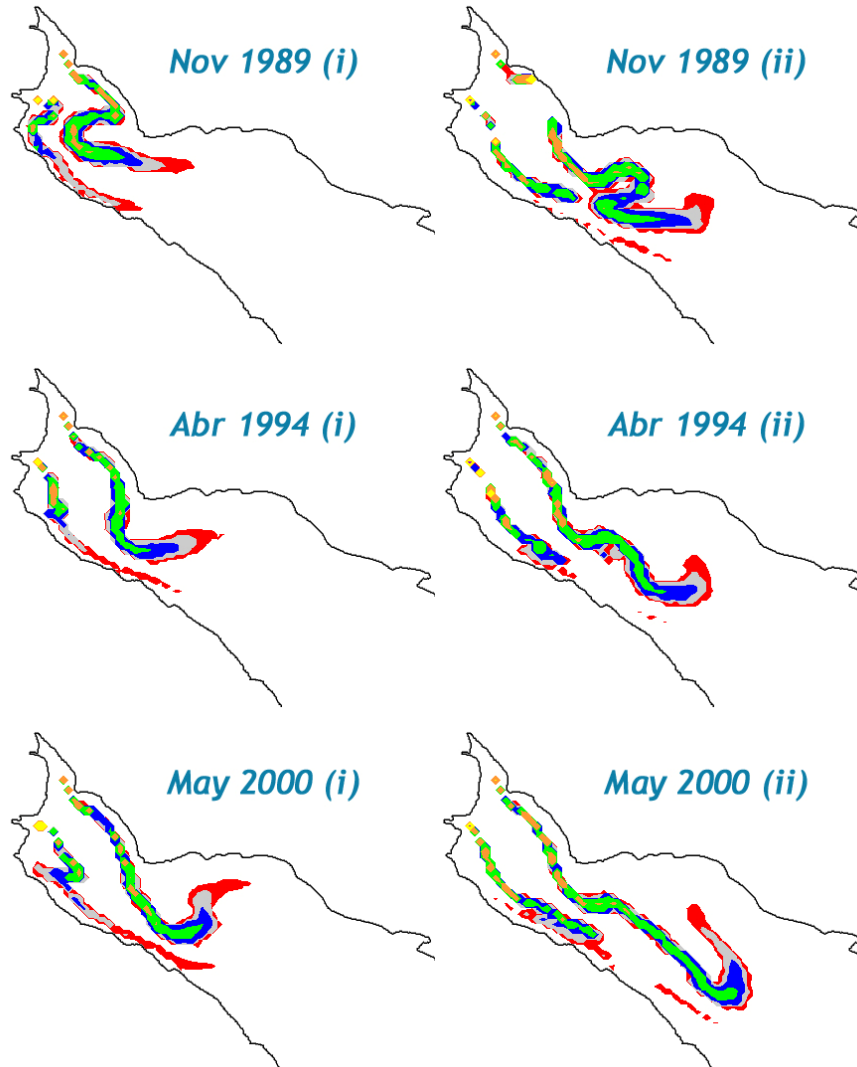


Figura 3.5. Distribución de concentraciones de las plumas de difusión en la capa de mezcla entre corredores de flujo para tres Sudestadas: i) Llegada del pico a Buenos Aires – ii) Tres días después del máximo (Re y Menéndez, 2006).

Estos resultados indican que, en general, la calidad del agua en cada una de las dos costas del Río de la Plata Interior (Argentina y Uruguay) es responsabilidad directa del manejo de las descargas antrópicas efectuadas por cada país (Re y Menéndez, 2004). Sólo durante las tormentas de gran magnitud, asociadas a Sudestadas, se producen mezclas de gran escala que podrían transportar temporalmente las descargas antrópicas de una costa a la otra (Re y Menéndez, 2006).

3.3 Río de la Plata Exterior

El flujo de energía que entra al Río de la Plata lo hace por el sector sudoeste de su boca. El flujo de energía se concentra principalmente a lo largo de la costa bonaerense, mientras que del lado uruguayo los valores computados son bastante menores (Simionato et al., 2002).

La propagación de la onda de marea en el Río de la Plata presenta características diferentes en las zonas exterior e interior (Albarracín, 1987) (Figura 3.6). En la primera convive la onda de Kelvin con el primer modo de oscilación de Poincare, excitado por el hecho de que la onda de marea oceánica incide sobre la boca del Río de la Plata con un ángulo significativo respecto del eje del río. Es esta onda de Poincare la que le otorga las características bidimensionales al movimiento resultante. En cambio, en la zona interior sólo sobrevive la onda de Kelvin, ya que la oscilación de Poincare no puede penetrar y decae bruscamente, explicando el carácter unidireccional del movimiento en esta región.

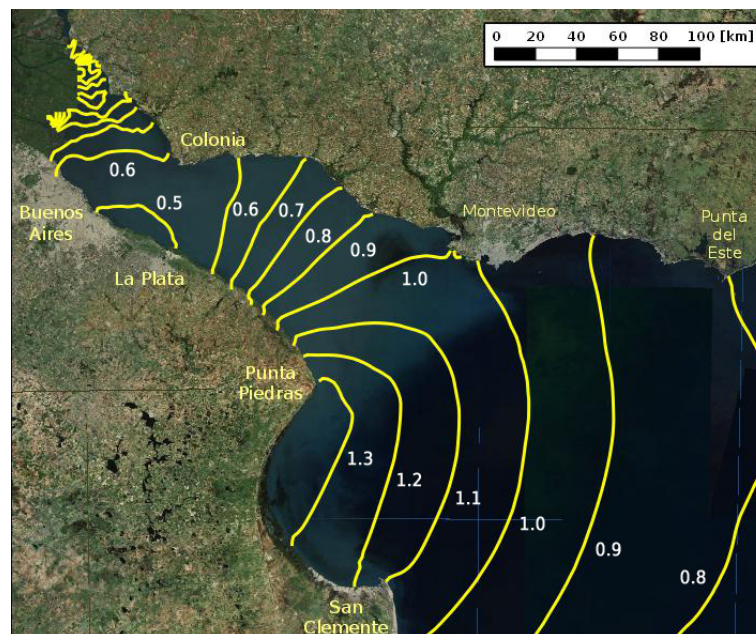


Figura 3.6. Curvas de isonivel en metros (Modelo RPP2D - Re y Menéndez, 2004).

El Río de la Plata Exterior tiene características más oceánicas, y su circulación no está tan asociada a las descargas y la batimetría, pero sí a la rotación terrestre (Simionato et al., 2004b). El efecto de la fuerza de Coriolis sobre las corrientes transversales entre las dos costas del Río de la Plata Exterior es significativo (Rodrigues Vieira, 1990). Esto es consistente con el valor del radio de deformación de Rossby (barotrópico), que para una profundidad media de 10 m es del orden de 100 Km (Simionato et al., 2003).

Sobre la costa uruguayo, los forzantes combinados crean un flujo residual (Piedra-Cueva y Fossati, 2007).

En el Río de la Plata Exterior el flujo es más sensible a los vientos, produciéndose una reversión en el sentido de circulación de invierno a verano, lo cual es consistente con lo que se conoce de la distribución de salinidad (Simionato et al., 2003).

Del análisis de series de corrientes colectadas en dos puntos del Río de la Plata Exterior (Meccia, 2008), se encontró que la marea sólo explica alrededor de un 25% de la varianza,

otro 25% está asociado con actividad de ondas internas en los puntos de adquisición de datos, que corresponden a zonas de fuerte estratificación; y el 50% restante de energía está forzado por el viento en las escalas de tiempo sinóptica a intra-estacional.

3.4 Región de Bahía de Samborombon

Existe una débil circulación circular en sentido horario en la Bahía de Samborombon, hacia el exterior del río (Simionato et al., 2003; Piedra-Cueva y Fossati, 2007). La extensión y forma de esta celda cambia con la estación pero poco con las descargas, sugiriendo que se encuentra afectada por los vientos.

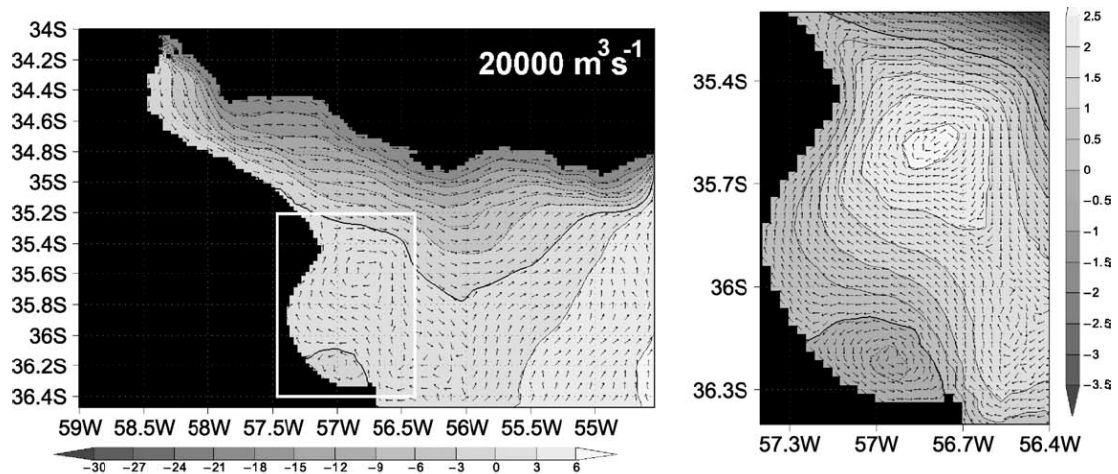


Figura 3.7. Detalle de la circulación en la Bahía de Samborombon para un caudal ingresante al Río de la Plata de $20000 \text{ m}^3/\text{s}$ (transporte de masa residual en miles de m^3/s - Simionato et al., 2004b).

Si bien los tiempos de residencia para todo el río oscilan entre 40 y 80 días, en la Bahía de Samborombon se estimaron como mayores a los 120 días (Piedra-Cueva y Fossati, 2007).

Gran parte de la disipación del flujo de energía que ingresa por la boca del Río de la Plata ocurre en los extremos norte y sur de la Bahía de Samborombon (Simionato et al., 2002).

3.5 Región costera de Montevideo

Santoro et al. (2008) identificaron seis celdas de circulación característica del flujo en la Bahía de Montevideo, con una ocurrencia del 62% del tiempo. Un escenario de descarga del Río de la Plata 'bajo' no tiene influencia sobre la circulación, mientras que la descarga 'alta' modifica el patrón de flujos generado por las descargas locales (arroyos). La influencia de la descarga de los arroyos sobre la circulación es importante, y para condiciones de caudal 'medio' a 'alto' esta circulación se modifica y puede llegar a invertirse. Se identificaron distintas celdas de circulación asociadas al ciclo de marea. En el ciclo de marea completo ocurren cuatro rotaciones del flujo en la zona de ingreso a la bahía. En general cuando la marea crece el flujo ingresa a la bahía por el Canal de Acceso y cuando se da la bajante el flujo ingresa por el Cerro. El viento es el forzante dominante de la dinámica en la bahía, y tiene una gran influencia sobre las distribuciones de corrientes dependiendo de la intensidad y duración (Figura 3.8).

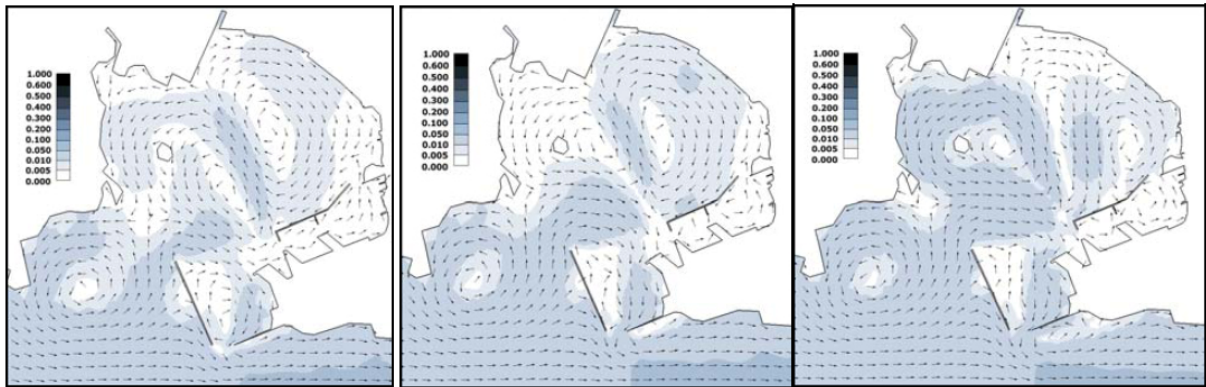


Figura 3.8. Circulación residual en la Bahía de Montevideo generada por caudal fluvial y marea astronómica (izquierda), generada por caudal fluvial, marea astronómica y marea meteorológica (centro) y generada por caudal fluvial, marea astronómica, marea meteorológica y campo de vientos (derecha). Intensidades en cm/s (Santoro et al., 2008).

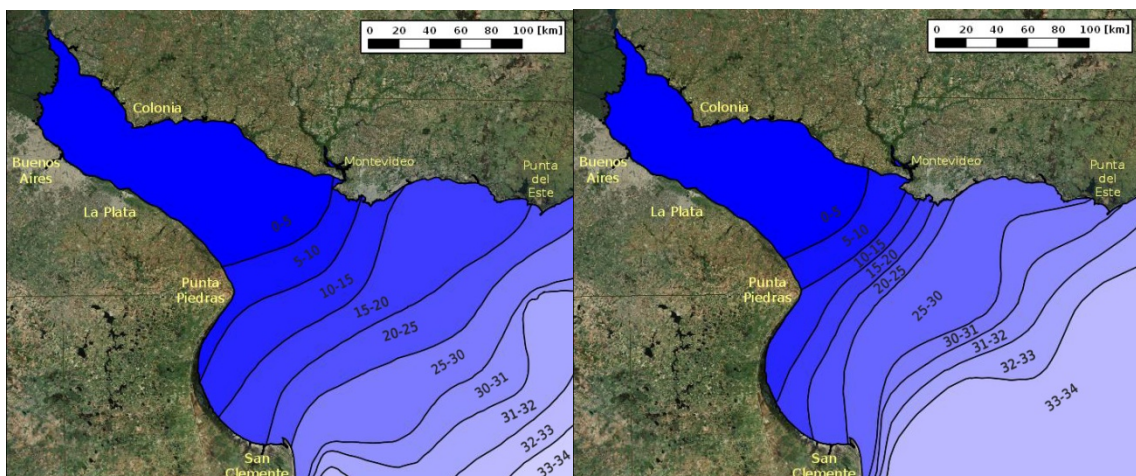
4 SALINIDAD

4.1 Frente Salino

La transición entre las aguas dulces del Río de la Plata Interior y el Océano se da a través del 'Frente Salino', que en rigor es una cuña (con el agua más salada en el fondo y la más dulce en superficie) que se desarrolla en la parte superior del Río de la Plata Exterior.

Las características del frente de salinidad fueron descritas por Guerrero *et al.* (1997) y por Framiñan *et al.* (1999). En estos trabajos se muestra una variabilidad estacional muy marcada del frente salino debida a la variabilidad de los caudales de los ríos tributarios y de los vientos dominantes. Aunque la estructura de cuña salina es una consecuencia de la intensa descarga continental en la región, los vientos predominantes favorecen su mantenimiento (Meccia, 2008).

La señal estacional es el resultado de la mayor frecuencia de ocurrencia de vientos provenientes de direcciones determinadas a lo largo de las diversas estaciones, pudiendo desarrollarse situaciones caracterizadas como típicas de invierno o verano a lo largo de todo el año con gran variabilidad (Meccia, 2008) (Figuras 4.1 y 4.2).



a) Invierno - Fondo

b) Invierno - Superficie

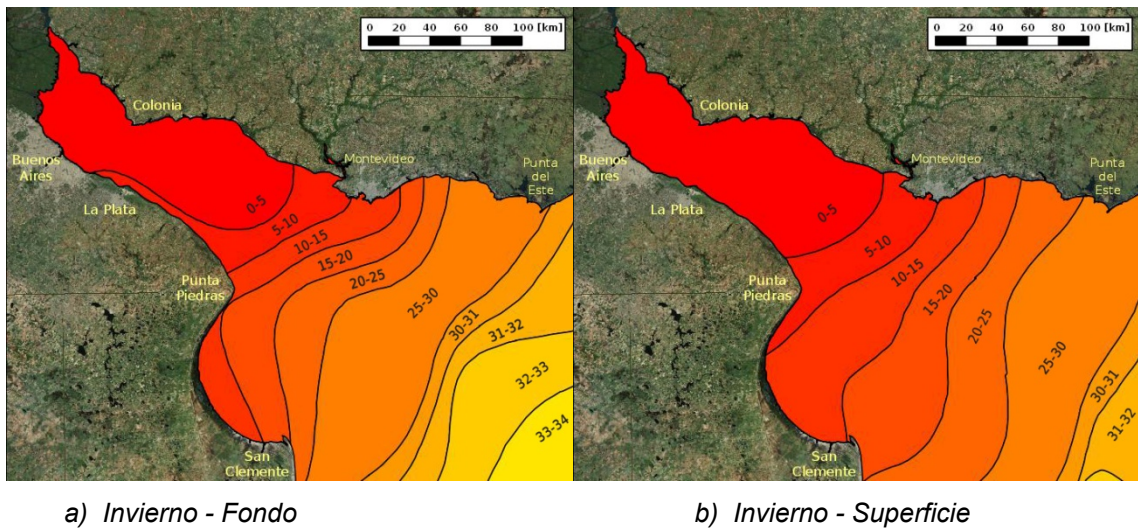


Figura 4.1. Campos de salinidad superficial y de fondo en invierno y verano. Proyecto FREPLATA - Sistema de Información - Cartografía (www.freplata.org).

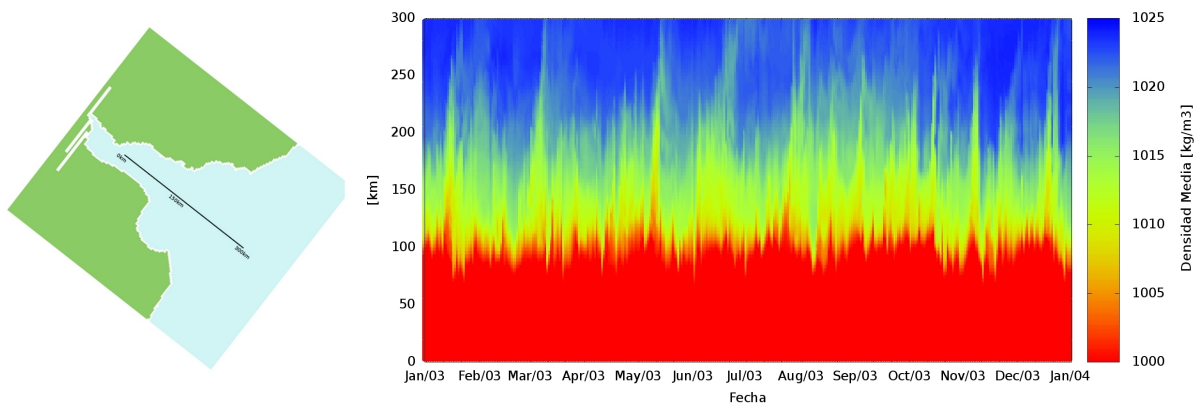


Figura 4.2. Densidad media en la vertical en el frente salino para un año de simulación (Re y Sabarots Gerbec, 2010)

Como resultado del aumento del nivel medio del mar, bajo los efectos del Cambio Climático, el Frente Salino se desplazará hacia el interior del Río de la Plata. Este corrimiento ha sido estimado en alrededor de 10 km para el escenario de fin de siglo (Kind 2004), lo cual en principio se considera que no producirá efectos significativos sobre los usos del río que alerten sobre la necesidad de prever medidas de mitigación. Incluso en una situación hipotética extrema (extrapolando la tendencia de elevación del nivel hasta fines de milenio) no se produciría una afectación por salinidad en la zona de toma de agua para el consumo de la Región Metropolitana de Buenos Aires (Kind 2004) (Figura 4.3).

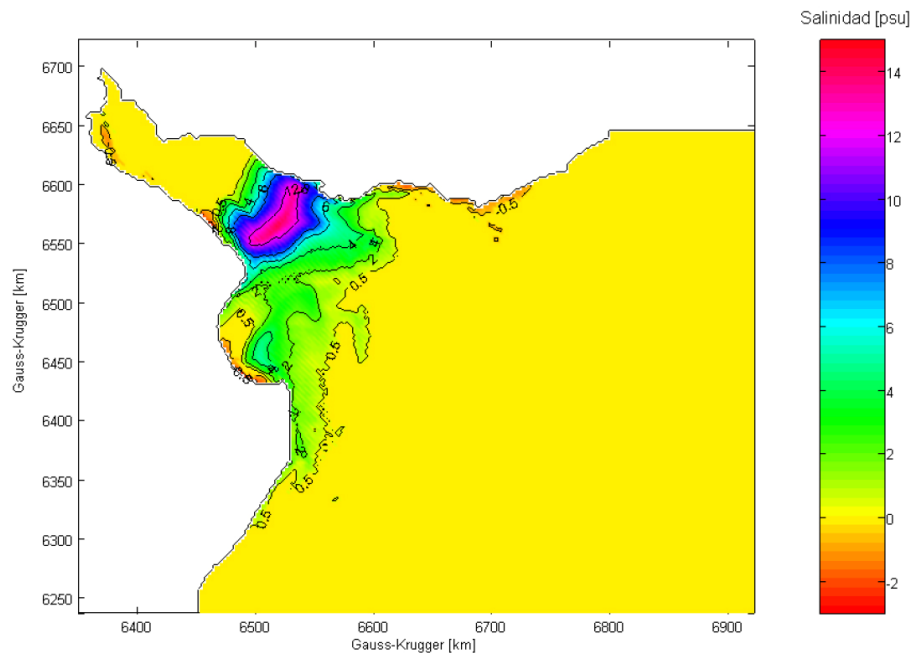


Figura 4.3. Diferencia de salinidad de fondo de verano para un escenario hipotético extremo respecto del escenario actual (Kind, 2004)

4.2 Corrientes de densidad

Las corrientes de agua dulce, producto de las descargas de los grandes tributarios (Paraná y Uruguay) se desarrollan principalmente sobre las zonas menos profundas del río (Bahía de Samborombon, zona costera de Montevideo, Banco Ingles y Banco Arquímedes), mientras que el agua salina tiende a ser advectada río arriba a lo largo de los canales más profundos (Canal Oriental y Canal Marítimo). Las corrientes de densidad bloquean la salida del Canal Oriental, incrementando velocidades en Bahía de Samborombon y en los bancos Ingles y Arquímedes (Fossati y Piedra-Cueva, 2008)

4.3 Efectos del viento

Los resultados de Simionato et al. (2001) resultaron consistentes con lo observado por Guerrero et al. (1997) y Framiñan et al. (1999) en cuanto al accionar de los vientos dominantes, mostrando que durante el verano, la dirección media del viento es del este-noreste siendo la responsable de la retracción hacia el sudoeste que se observa en el frente de salinidad superficial; y durante el invierno, los vientos medios rotan hacia el oeste-noroeste, extendiendo hacia el norte al frente de salinidad superficial.

Las simulaciones numéricas de Fossati y Piedra-Cueva (2008) muestran que los vientos del SO y NE tienen gran influencia sobre los campos de salinidad y velocidad (Figura 4.4). Los vientos del SO incrementan la salida del flujo sobre la costa uruguaya (disminuyendo la salinidad) y fuerzan un flujo hacia aguas arriba sobre la costa argentina (incrementando la salinidad). Los vientos del NE fuerzan un flujo hacia aguas arriba de agua salina sobre la costa uruguaya (incrementando la salinidad) y hacia aguas abajo en la costa argentina (disminuyendo la salinidad).

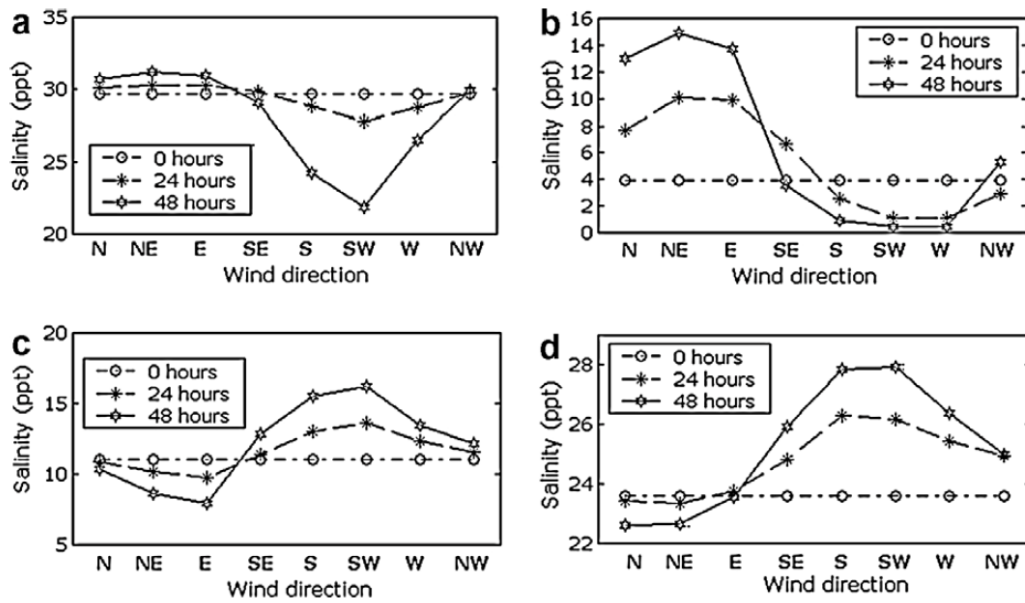


Figura 4.4. Variación de la salinidad en puntos de control: (a) Punta del Este (Río de la Plata Exterior), (b) Montevideo (límite entre el Río de la Plata Interior y Exterior), (c) Bahía de Samborombon (Río de la Plata Exterior) y (d) Cabo San Antoio (Frente Marítimo del Río de la Plata) (Fossati y Piedra-Cueva, 2008).

Solamente bajo vientos intensos o persistentes del sudeste la estratificación puede quebrarse completamente (Meccia, 2008). Sin embargo, la estructura vuelve a establecerse en un período de tiempo relativamente corto después de que los vientos se relajen.

5 DINÁMICA DE CONTAMINANTES

5.1 Transporte

En condiciones hidrometeorológicas normales, el transporte de contaminantes a lo largo de cada corredor de flujo es predominantemente advectivo (con la corriente de deriva como forzante neto), aunque en la transición desde el Río de la Plata Interior al Exterior aparece un intenso proceso de mezcla lateral, resultado de las oscilaciones transversales de la corriente debido a la onda de marea, lo que incrementa la difusión longitudinal y, entonces, da lugar a que puedan difundirse contaminantes desde el río exterior (Jaime et al., 2001). Entonces, la calidad de las aguas del corredor Guazú está determinada esencialmente por la del río Paraná Guazú, con alguna influencia eventual en su extremo final del Río de la Plata Exterior. En cambio, la calidad de las aguas de los dos corredores costeros se ve afectada no sólo por sus tributarios directos (y, eventualmente, el río exterior) sino también por las descargas costeras, particularmente significativas sobre el lado argentino (Jaime et al., 2001).

Tal como se explicó en el capítulo 3, durante las tormentas de gran magnitud, asociadas a Sudestadas, se producen mezclas de gran escala que podrían transportar temporariamente contaminantes de una costa a la otra (Re y Menéndez, 2006).

5.2 Balance de Nutrientes

Luego de identificar corredores de flujo, Jaime et al. (2001) efectuaron un balance de nutrientes en el Río de la Plata Interior, arribando a los siguientes resultados:

- Se detecta un relativamente lento proceso de nitrificación, con una constante de reacción de alrededor de 0,012 1/día. Tanto el fósforo de fosfato como el fósforo total muestran un comportamiento conservativo sobre la escala de análisis utilizada (al menos dentro del margen de error determinado por la calidad de los datos utilizados). El Nitrógeno Orgánico Total (NOT) también se manifiesta como conservativo sobre la escala de análisis utilizada. La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) sufre un lento proceso de decaimiento a lo largo del corredor Palmas (único con información disponible), con una constante de reacción de alrededor de 0,030 1/día.
- Por nitrificación se oxidan diariamente 82 toneladas de nitrógeno amoniacal (N-NH₄⁺) en nitrógeno de nitrato (N-NO₃⁻) en el Río de la Plata Interior, mientras que el flujo de nitrógeno orgánico no evidencia mineralización en esta zona del Río de la Plata (Figura 5.1). Los porcentajes de aporte fluvial de nitrógeno total y fósforo total son superiores al 80%.

- En la Franja Costera Sur, el aporte de cargas carbonáceas biodegradables provenientes de la margen argentina resulta el principal contribuyente a la carga de DBO₅ saliente del estuario (70%).

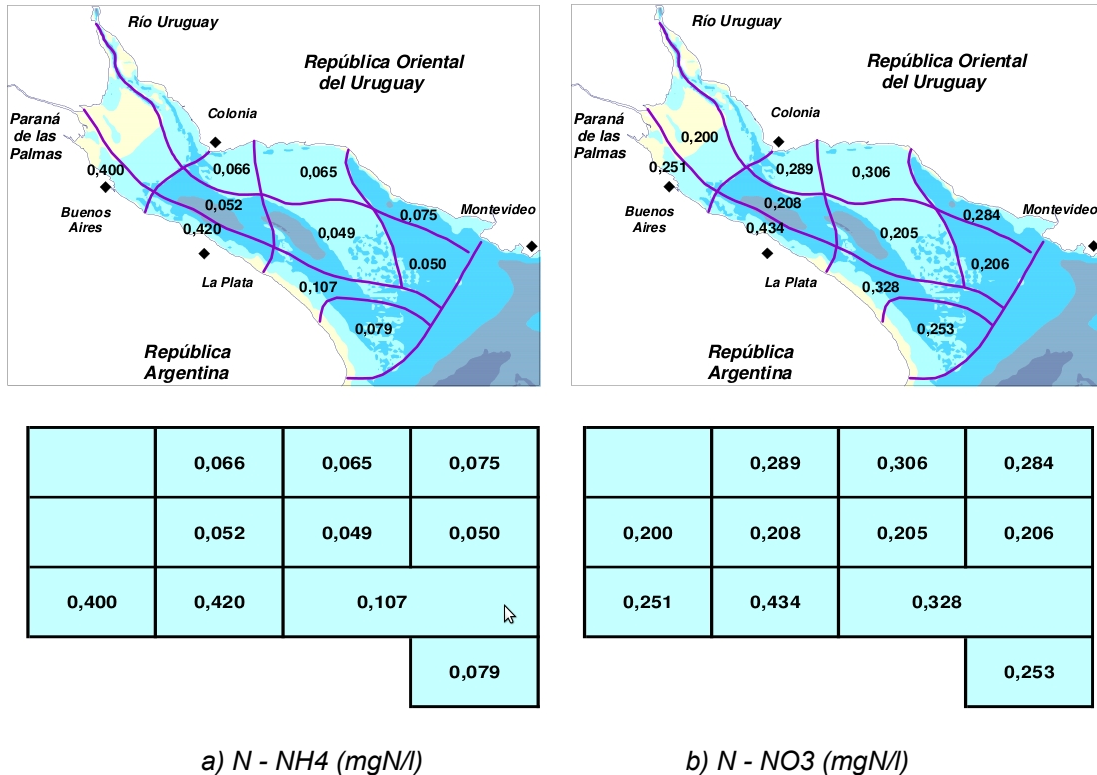


Figura 5.1. Concentraciones medias en segmentos de especies inorgánicas de N (Jaime et al., 2001)

5.3 Emisarios subacuáticos

Los emisarios subacuáticos constituyen un tipo de solución efectiva para disponer de efluentes líquidos resultantes de las actividades humanas, al descargarlos en zonas con mayor dinámica (entonces, con mayor poder de mezcla, aumentando la dilución inicial) y lejos de la zona costera, que es donde se concentran la mayor parte de las actividades de recreación.

5.3.1 Emisario Berazategui

El Emisario Berazategui descarga la mayor parte de los efluentes cloacales de la Región Metropolitana de Buenos Aires. El cuerpo principal de la pluma de contaminación tiende a desplazarse paralelamente a la línea de costa (Carreras y Menéndez, 1988). No obstante, llega a producir un impacto mensurable sobre la zona costera (Menéndez et al. 2011). Durante las grandes tormentas, asociadas a Sudestadas, la pluma puede impactar sobre la toma de agua de Bernal (Carreras y Menéndez, 1988). El viento influye principalmente a través de la generación de corrientes de deriva superficiales, que pueden transportar contaminantes hasta la zona costera (Carreras y Menéndez, 1988).

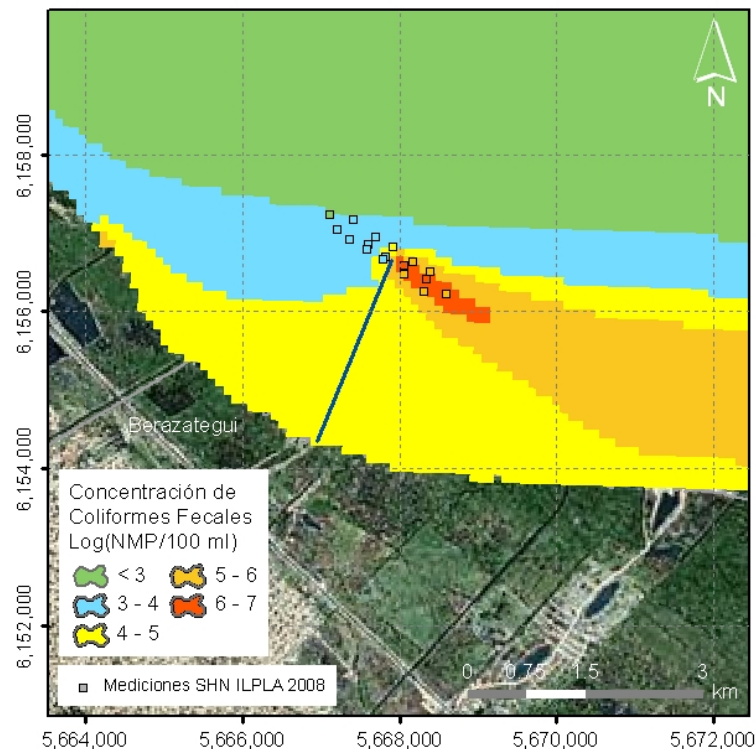


Figura 5.2. Distribución de concentraciones instantáneas de *E. Coli* alrededor del emisario de Berazategui (Menéndez et al. 2011)

Con el proyecto de extensión de este emisario desde sus actuales 2,5 km a 7,5 km de la costa, incluido dentro del Plan Director de AySA 2007-2020, se logrará prácticamente evitar el impacto contaminante sobre la costa y sobre la toma de agua (Menéndez et al. 2011).

5.3.2 Emisario Capital / Dock Sud

El Emisario Capital fue un proyecto de emisario establecido dentro del Plan de Saneamiento Integral (PSI) de Aguas Argentinas S.A. para fraccionar la descarga de efluentes cloacales desde la Región Metropolitana de Buenos Aires. Su implementación no empeoraría la calidad del agua de la franja costera adyacente a la descarga, aunque tampoco introduciría una mejora significativa sobre una calidad ya deficiente por la presencia de otras descargas (principalmente la del Matanza-Riachuelo) (Menéndez et al., 1999).

El actual proyecto de Emisario Dock Sud, que es una variante del anterior incluido dentro del Plan Director de AySA 2007-2020, concentrará su impacto en una zona alejada de la costa (Figura 5.3) (Menéndez et al., 2011).

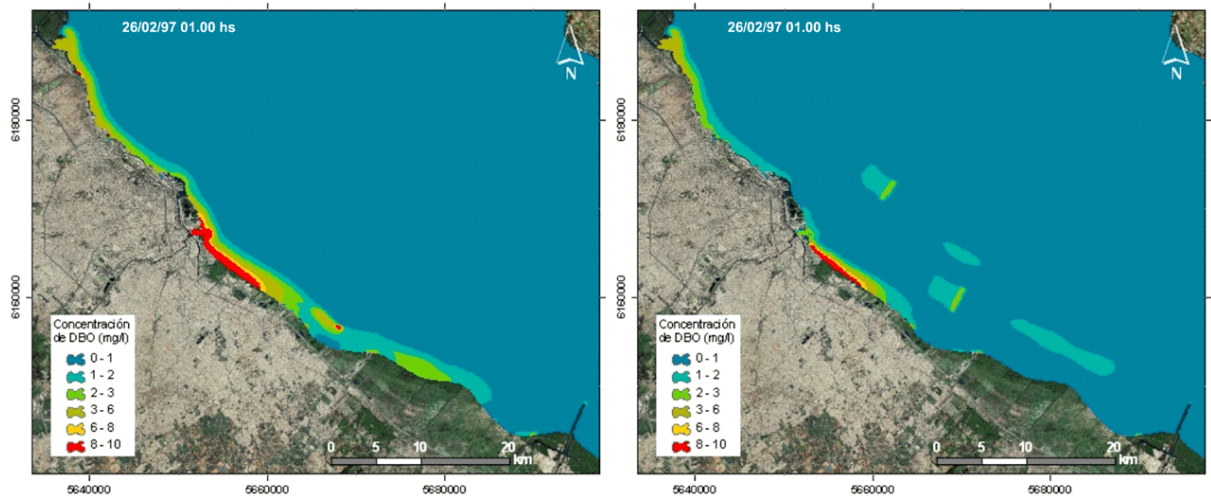


Figura 5.3. Situación actual versus situación de proyecto (Menéndez et al. 2011).

5.3.3 Emisario Punta del Este

El Emisario Punta del Este fue proyectado para descargar los efluentes cloacales de esa ciudad balnearia. Se considera que una alternativa aceptable, desde el punto de vista de la balneabilidad (Fossati et al., 2008) (Figura 5.4).

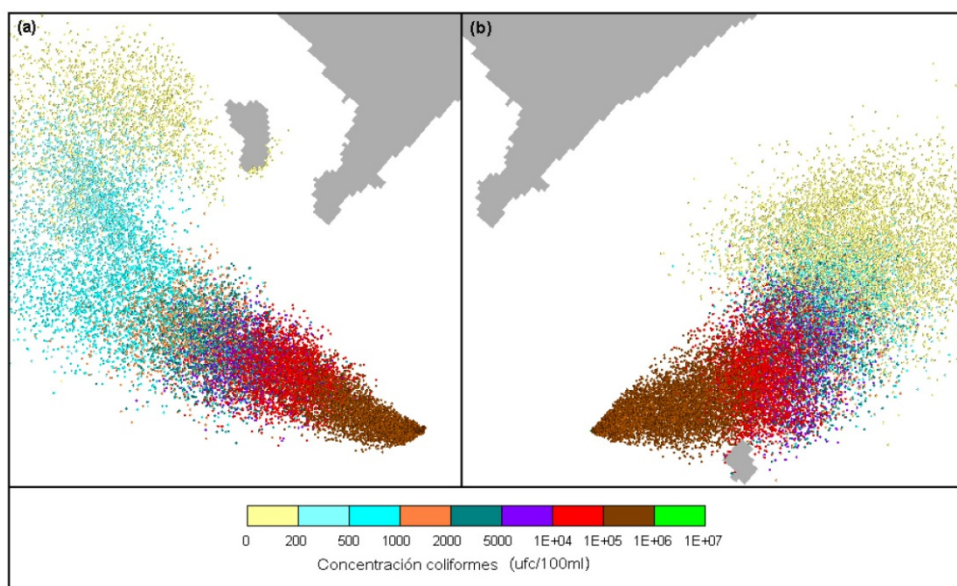


Figura 5.4. Descarga en Punta Salina (Punta del Este), a 5500m de la costa para dos instantes diferentes m (Fossati et al., 2008).

Del análisis del diseño del difusor surgió que la alineación de los puertos influye considerablemente en los valores de dilución inicial (y, en consecuencia, en las colimetrías registradas en la zona costera cerca de la descarga). Se determinó que las descargas en el plano horizontal y en dirección perpendicular a la costa favorecen la mezcla inicial (Fossati et al., 2008).

5.3.4 Emisario Punta Lobos

El Emisario Punta Lobos es una descarga adicional al Emisario Punta Carretas, proyectada para completar el Sistema de Saneamiento de Montevideo. Los estudios indicaron que la mejor ubicación para su punto de descarga se encuentra a 2500 m al sur de la costa, con lo que se obtendría, para el conjunto de playas montevideanas, colimetrías que no superarían las 1000 UFC/100ml el 50% del tiempo, y las 2000 UFC/100ml el 12% del tiempo (Piedra Cueva et al., 2002) (Figura 5.5).

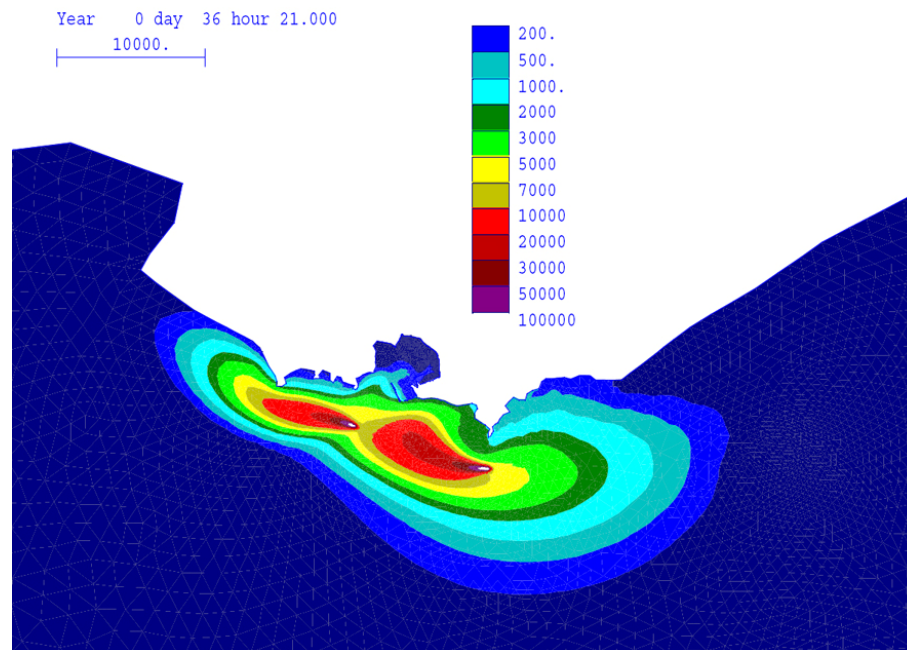


Figura 5.5. Concentración de coliformes fecales [UFC/100ml]. Escenario 2035 con vertidos en Punta Carretas y Punta Lobos (Piedra Cueva et al., 2002).

5.4 Descargas térmicas

5.4.1 Central Térmica ‘José Battle y Ordoñez’

La Central Térmica ‘José Battle y Ordoñez’ descarga el agua de refrigeración en la Bahía de Montevideo, desde donde se alimenta. En determinadas circunstancias las corrientes se dirigen desde la zona de descarga hacia la toma de agua de la Central (Figura 5.6), afectando negativamente su rendimiento. Se determinó que solo el 26,5% del tiempo no hay afectación de la descarga sobre la toma, y que durante el 28,5% del tiempo la descarga incrementa por lo menos 1°C la temperatura en la toma (Fossati et al., 2008).

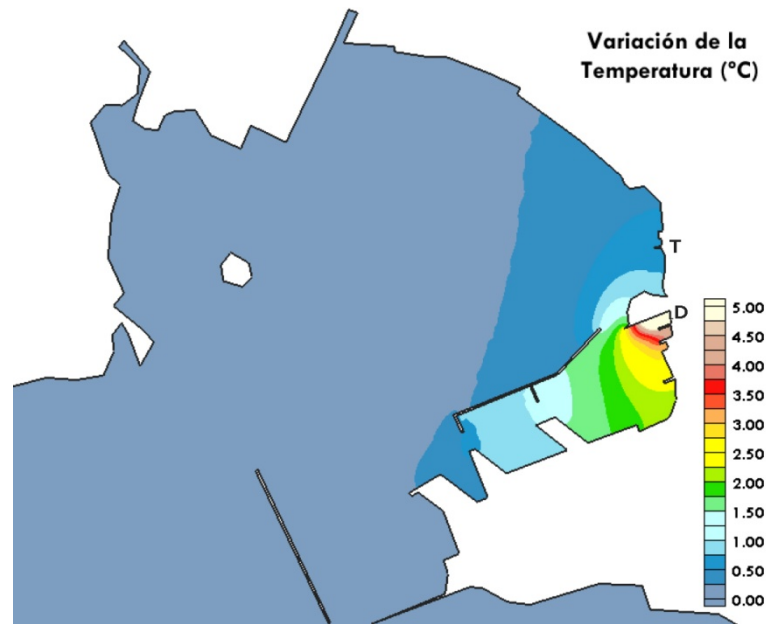


Figura 5.6. Diferencia promedio entre los campos de temperatura con y sin la Central Térmica 'José Battle y Ordoñez' en funcionamiento. Periodo 19/03/2004 a 30/04/2004. D: Descarga – T: Toma. (Fossati et al., 2008).

5.4.2 Central Térmica 'Dock Sud'

La descarga al Río de la Plata del agua de refrigeración de la Central Térmica Dock Sud, ubicada en la zona del Puerto de Dock Sud, determina una zona de impacto (sobretemperaturas mayor a 3°C) con una extensión transversal que no alcanza los 300 m, y una extensión longitudinal menor a 100 m y 400 m en las direcciones NO y SE, respectivamente (Menéndez, 1996).

Por su parte, la succión del agua de refrigeración desde el Puerto de Dock Sud genera una dilución adicional de contaminantes en la boca del Riachuelo en una proporción variable entre 0 y 100% respecto de las condiciones sin succión. La acción del viento (con su influencia sobre los niveles de marea) se manifiesta en diluciones mayores y más prolongadas en tanto produzca crecientes de gran excursión, pero genera efectos contrarios durante bajantes intensas (Menéndez, 1997a).

5.4.3 Central Térmica 'Costanera Sur'

El efecto de la descarga del agua de refrigeración de la Central Térmica Costanera Sur hacia el Río de la Plata sobre su obra de toma, en función de su proyecto de ampliación, fue estudiado con un modelo bidimensional (Menéndez, 1997b). Se concluyó que el efecto de retroalimentación sería muy pequeño, debido a que el tiempo de viaje del agua sobrecalentada es del orden de la mitad del ciclo de las mareas, haciendo difícil su llegada al sitio de toma (Figura 5.7).

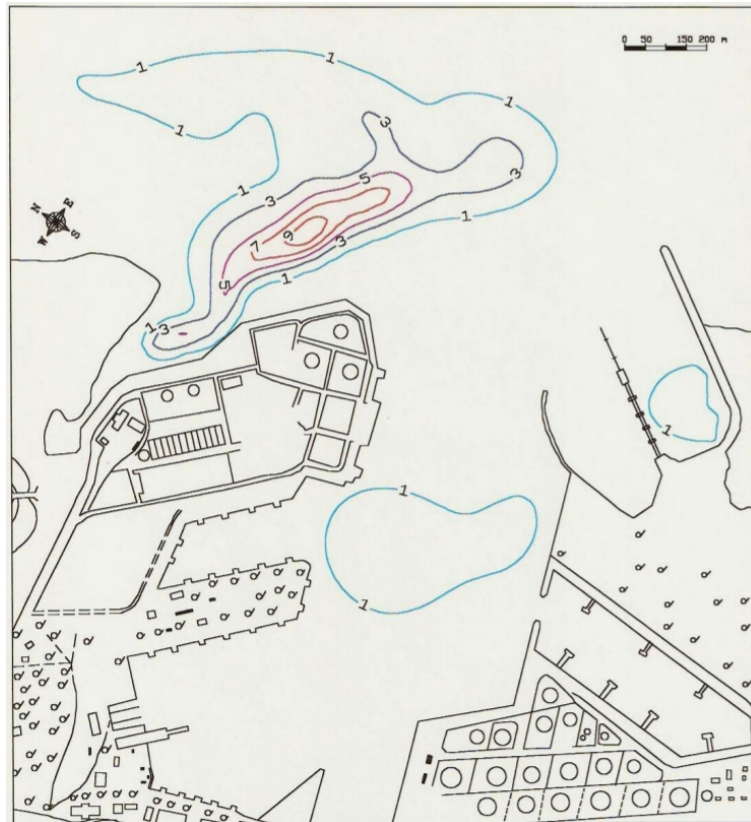


Figura 5.7. Pluma de sobretemperatura en Central Costanera

5.4.4 Central Térmica 'Puerto Nuevo'

Con un modelo hidrotérmico cero-dimensional de dos capas, Menéndez y Tarela (1999) estudiaron la zona posterior del Puerto de Buenos Aires, donde existe estratificación debido a la circulación del agua de refrigeración de dos centrales térmicas (Puerto Nuevo y Nuevo Puerto). En esta zona, la capa fría recibe agua desde el puerto principal y provee agua a las tomas de las centrales térmicas. A su vez, la capa cálida recibe agua desde la descarga de la Central Puerto Nuevo y entrega la mayor parte del agua al puerto principal, excepto por una pequeña fracción que va a las tomas de agua. Este modelo permitió establecer la estabilidad térmica del sistema de refrigeración (Figura 5.8), y prever el mantenimiento de esas condiciones de estabilidad para un escenario futuro con las centrales ampliadas.

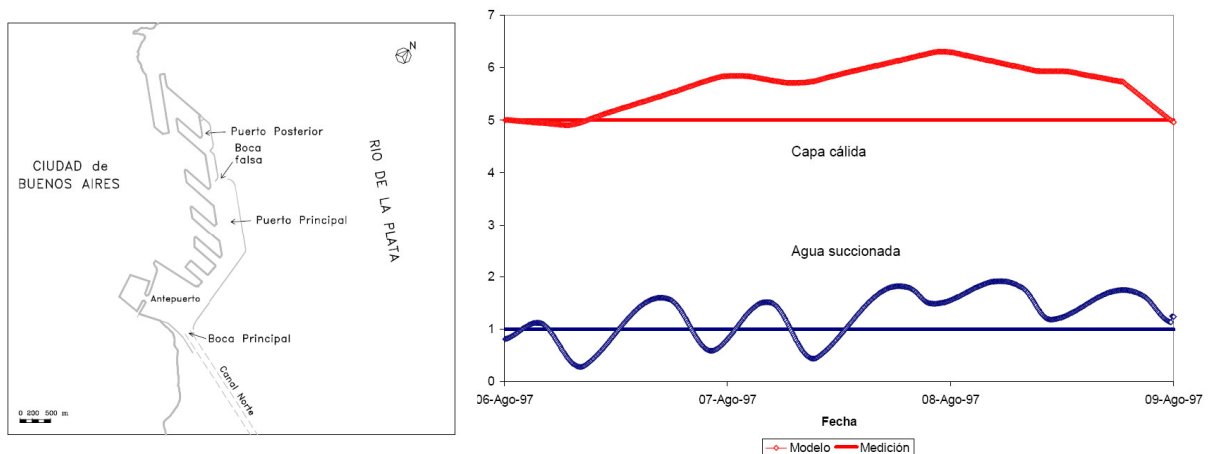


Figura 5.8. Comparación entre sobretemperaturas medidas y simuladas en la Central Térmica Puerto Nuevo (Menéndez y Tarela, 1999)

5.5 Zonas de Uso

Menéndez et al. (2011) establecieron criterios para definir 8 usos del agua, en base a la imposición de concentraciones límites a 21 parámetros de calidad:

- Uso I – Apta para consumo humano con tratamiento convencional;
- Uso II – Apta para actividades recreativas con contacto directo (ó contacto primario);
- Uso III – Apta para actividades recreativas sin contacto directo (ó contacto secundario);
- Uso IV – Apta para actividades recreativas pasivas;
- Uso V – Apta para preservación de vida acuática con exposición prolongada;
- Uso VI – Apta para preservación de vida acuática sin exposición prolongada;
- Uso VII – Apta para preservación de especies de peces sin efectos subletales;
- Uso VIII – Apta para preservación de especies de peces sin efecto letal.

Los valores límites se indican en la Figura 5.9:

Uso	OD (mg/l)	DBO (mg/l)	Compuestos Nitrogenados (mg N/l)		E. Coli (NMP/100 ml)	Fósforo Total (µg/l)	Sustancias Fenólicas (µg/l)	Detergentes (mg/l)	Metales (µg/l)	
			N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻					Cr	Pb
I Apta para consumo humano con tratamiento convencional	> 4 ⁽¹⁾	< 5 ^(11,12)	NR ^(1,4)	< 10 ^(1,5,8,11,12)	< 2000 ⁽³⁾	NR ^(2,4)	< 10 ⁽³⁾	< 0,5 ^(2,11,12)	< 50 ^(2,4,5,8,10,11,12)	< 50 ⁽²⁾
II Apta para actividades recreativas con contacto directo	> 5 ^(2,11,12)	< 3 ⁽¹¹⁾	NR ⁽¹⁾	< 10 ^(11,12)	< 200 ⁽¹¹⁾	100 ^(9,11)	< 50 ⁽¹⁰⁾	< 0,5 ⁽¹¹⁾	< 50 ^(2,11,12)	< 10 ⁽¹¹⁾
III Apta para actividades recreativas sin contacto directo	> 4 ⁽¹¹⁾	< 10 ⁽¹¹⁾	NR ⁽¹⁾	< 10 ⁽¹¹⁾	< 20.000 ⁽⁷⁾	1000 ⁽⁷⁾	< 100 ⁽⁷⁾	< 5 ⁽⁷⁾	NR ⁽⁷⁾	NR ⁽⁷⁾
IV Apta para actividades recreativas pasivas	> 2 ⁽¹¹⁾	< 15 ⁽¹²⁾	NR ⁽¹⁾	NR ⁽⁷⁾	< 200.000 ⁽⁷⁾	1000 ⁽⁷⁾	< 1000 ⁽¹¹⁾	< 5 ⁽⁷⁾	NR ⁽⁷⁾	NR ⁽⁷⁾
V Apta para preservación de vida acuática con exposición prolongada	> 5 ⁽²⁾	< 3 ⁽²⁾	< 0,6 ⁽⁶⁾	NR ⁽¹⁾	NR ⁽²⁾	10 ⁽⁸⁾	< 4 ⁽⁴⁾	NR ^(1,2)	< 2 ^(2,6) (*)	< 2 ^(4,6)
VI Apta para preservación de vida acuática sin exposición prolongada	> 3 ⁽⁷⁾	< 10 ⁽¹²⁾	< 6 ⁽⁶⁾	NR ^(1,2)	NR ⁽²⁾	100 ⁽⁸⁾	< 50 ⁽⁴⁾	NR ^(1,2)	< 20 ⁽⁶⁾ (*)	< 20 ⁽⁶⁾
VII Apta para preservación de especies de peces sin efectos subletales	NE	NE	1	108	NE	NE	5000	NE	15000 ⁽⁷⁾	800
VIII Apta para preservación de especies de peces sin efecto letal	NE	NE	1,84	1080	NE	NE	50000	NE	93600 ⁽⁷⁾	8000

■	Cumplimiento 100% del tiempo
■	Cumplimiento 90% del tiempo
■	Cumplimiento 80% del tiempo
■	Sin restricción (NR)
■	No evaluado (NE)

(1)	SSRH	(5)	USEPA	(9)	OMS
(2)	CIC	(6)	EEUU (California)	(10)	EC
(3)	AySA	(7)	GTT	(11)	CONAMA-Brasil
(4)	Canadá	(8)	Australia	(12)	Uruguay

Notas: NMP: Número Más Probable; mg: miligramo; µg: microgramo; Cr: cromo; Pb: plomo; Sustancias Fenólicas: no incluye fenoles halogenados; (*)Corresponde a Cr⁶⁺

Figura 5.9. Criterios de zonas de uso para parámetros básicos

Se implementó y calibró un modelo de calidad del agua, motorizado por un modelo hidrodinámico, para representar las distribuciones de 9 parámetros de calidad (DBO, OD, E.Coli, Amonio, Nitrato, Fósforo, Sustancias Fenólicas, Cromo y Plomo) sobre la Franja Costera Sur del Río de la Plata Interior (Menéndez et al., 2011) (Figura 5.10). La aplicación de los criterios de uso a los resultados provistos por el modelo de calidad de agua permitió determinar las zonas de uso limitado para la situación actual (Figura 5.11).

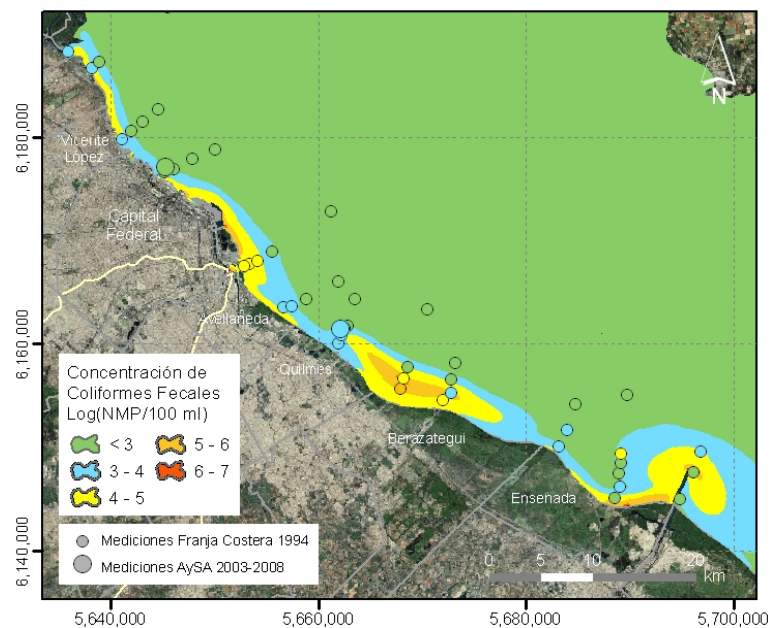


Figura 5.10. Calibración de Coliformes Fecales (Menéndez et al., 2011).

El modelo fue luego aplicado al Escenario de Proyecto asociado al Plan Integral de Saneamiento de la Cuenca Matanza-Riachuelo (PISA, que incluye al Plan Director de AySA), indicando que: (i) se logrará una gran ampliación del margen de seguridad para las tomas de agua de AySA (Uso I); (ii) se generará una redistribución de las zonas no aptas para recreación con contacto directo (Uso II); (iii) se logrará la recuperación de una parte significativa de la zona costera para recreación sin contacto directo (Uso III), pero con el costo de la aparición de zonas de uso limitado costa afuera; (iv) disminuirá levemente la extensión de la zona para recreación pasiva (Uso IV); (v) no habrá cambio en la situación de la zona no apta en cuanto a preservación de vida acuática con exposición prolongada (Uso V).

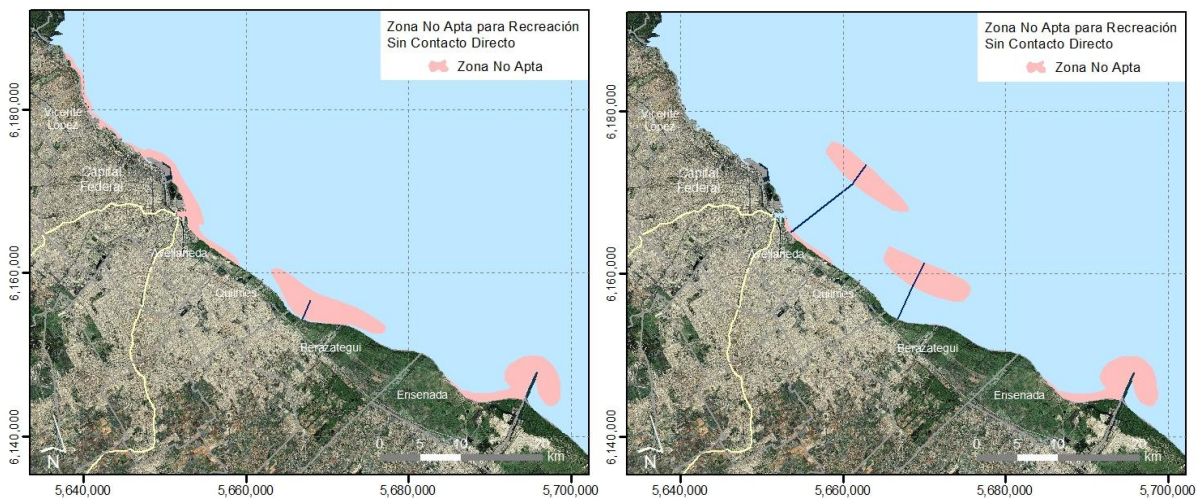


Figura 5.11. Zonas restringidas de uso del agua para recreación sin contacto directo. Escenario actual y escenario de Proyecto.

6 DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS

6.1 Gradación

De los sedimentos transportados por los grandes tributarios, al Río de la Plata básicamente accede la fracción más fina transportada en suspensión. Las arenas finas y los limos gruesos contribuyen al avance del Frente del Delta del Paraná. Parte de los limos se depositan en los bancos del Río de la Plata Interior y en los canales de navegación dragados. La mayoría de las arcillas alcanzan el Río de la Plata Exterior, pero una cantidad importante se deposita en su cabecera por efecto de la floculación.

6.2 Sedimentación en canales de navegación

Para mantener condiciones de calado en los canales de navegación del Río de la Plata se desarrollan permanentemente actividades de dragado de mantenimiento. Mediante la simulación numérica del proceso de sedimentación en los canales de navegación (con un modelo bidimensional en el plano vertical), particionado en distintos tramos de acuerdo a las condiciones hidrodinámicas y su orientación relativa a las corrientes, se determinaron las necesidades de dragado de mantenimiento para un amplio rango de calados (Menéndez, 1994) (Figura 6.1).

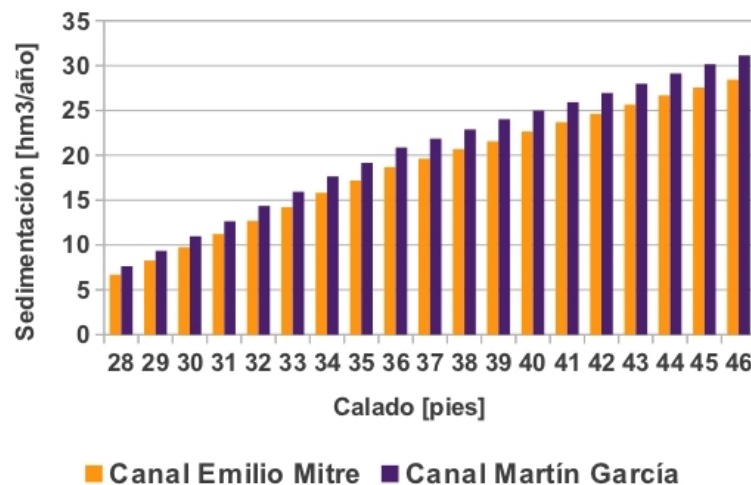


Figura 6.1. Dragado de mantenimiento para distintos calados (Menéndez, 1994)

6.3 Plumas de turbidez

La disposición del material dragado, de tal manera que la pluma de sedimentos no afecte a tomas de agua cercanas, fue abordada mediante modelación matemática.

Para evaluar esta posible afectación, Cardini et al. (2002) implementaron un sistema de pronóstico a 60 horas de la posición de la pluma generada en el punto de descarga del material (Figura 6.2). Teniendo en cuenta que las variaciones de la turbidez de base del río es fuertemente afectada por condiciones de vientos intensos, el nivel de producción puede ser regulado en función de los pronósticos de afectación de las tomas de agua realizados mediante la modelación matemática, en especial en el tramo más cercano a la costa.

Menéndez (2002) simuló el desarrollo de las plumas de turbidez originadas en la resuspensión del material dragado, lo cual resultó de utilidad para establecer zonas de refulado (Figura 6.3).

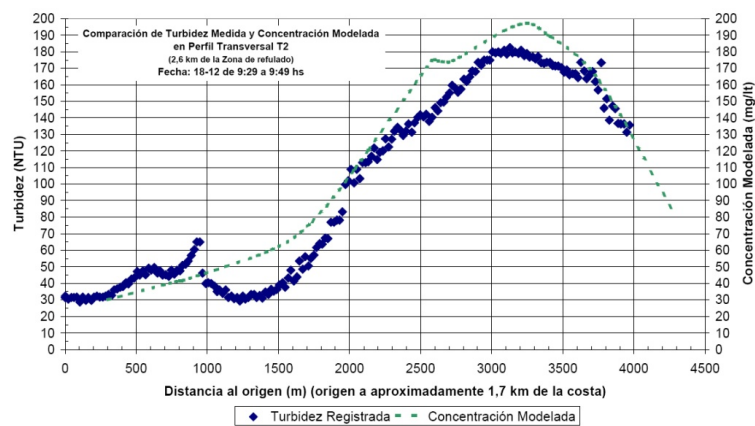


Figura 6.2. Comparación de turbidez observada y concentración simulada en un perfil transversal a la costa que cruza la pluma de turbidez (Cardini et al., 2002).

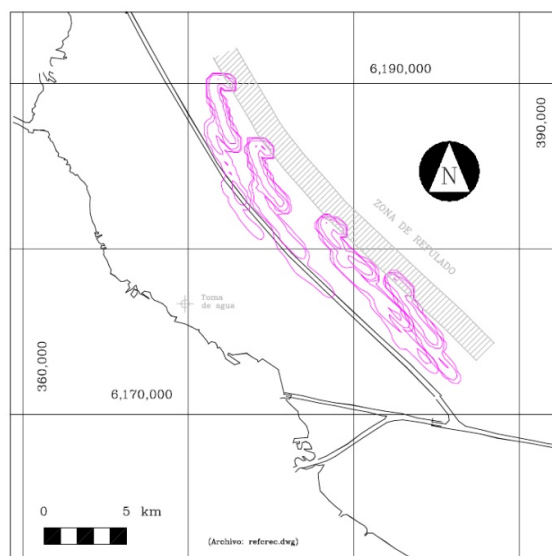


Figura 6.3. Plumaz de turbidez que surgen del vertido de los sedimentos dragados del canal Emilio Mitre (Menéndez, 2002)

6.4 Efectos de rellenos

En el caso de un relleno para la generación artificial de territorio, ya sea como isla ó como apéndice costero, se produce una disminución de la velocidad de la corriente en el frente y contrafrente – en relación a la dirección preponderante de las corrientes –, donde se genera sedimentación del sedimento suspendido, y un incremento compensatorio en la(s) zona(s) lateral(es), donde puede generarse erosión del fondo.

En el caso de la construcción de una isla artificial en el Río de la Plata Superior, para proteger las pilas principales del puente principal del proyecto de conexión Buenos Aires-Colonia, se detectó un patrón morfológico compuesto por dos barras longitudinales que arrancan desde cada uno de los dos frentes de la isla (con la barra que se extiende hacia el océano será más larga y alta debido al efecto de la corriente de deriva), y fosos de erosión a ambos lados de la isla. Las olas limitan la altura de las crestas de las barras adyacentes a los frentes de la isla. El proceso evoluciona hasta que las formas se estabilizan. Se concluyó que la longitud de las barras sería de entre 1 y 3 km y la altura máxima estaría comprendida entre 3 y 6 m (Figura 6.4).

En el caso de un relleno costero sobre la ciudad de Buenos Aires, Re y Menéndez (2009) definieron un indicador de sedimentación basado en el factor de Krone, detectando una relativamente fina 'aureola' (de 100 a 200 m de ancho) de mayor deposición que se produciría alrededor de los rellenos, pero que no impactarían en la sedimentación en los canales de navegación (Figura 6.5).

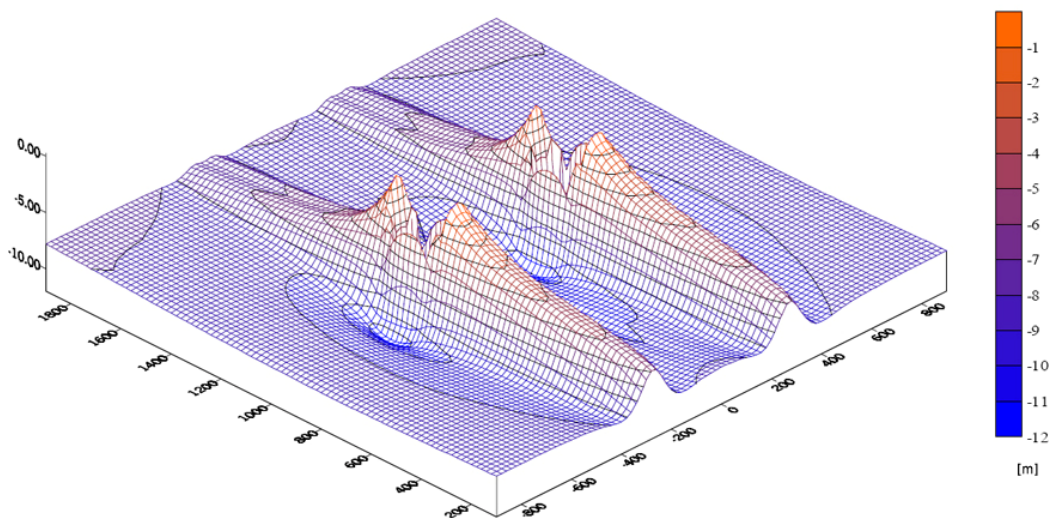


Figura 6.4. Forma final de las barras longitudinales alrededor de las islas de protección del Puente Buenos Aires – Colonia (Menéndez y Castellano, 2000).

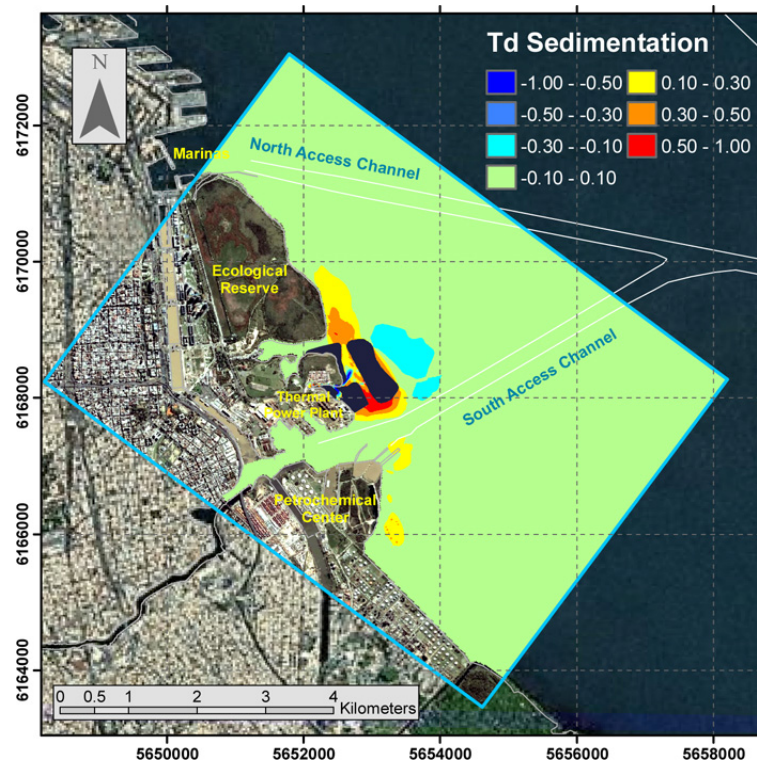


Figura 6.5. Diferencia entre los indicadores de sedimentación (factor de Korne) para condiciones medias entre los escenarios con y sin relleno costero (Re y Menéndez, 2009).

6.5 Avance del Frente del Delta del Paraná

Sarubbi (2007) cuantificó y caracterizó la carga de sedimentos en suspensión y de fondo transportados por el Río Paraná, determinando que en el Frente del Delta se deposita prácticamente la totalidad de la arena (fina) aportada y la fracción más gruesa menor de los limos, provocando su avance. Las arenas tienen preponderancia en el crecimiento en longitud (bancos), mientras que los limos tienen mayor peso en el crecimiento en cota por sobre el nivel del agua. Se identificaron dos frentes principales de avance: el sub-frente (Sf) Paraná Guazú (PG) al norte, y el Paraná de las Palmas (PP) al sur, con tasas de avance variables: 0-25 m año⁻¹ y 50-75 m año⁻¹ respectivamente (Figura 6.6).

Producto de simulaciones numéricas de escenarios futuros, Sarubbi (2007) determinó que las mayores deposiciones se concentrarían en dos zonas: una al Norte en torno a la zona de islas, y otra en correspondencia con el sub-frente Sur del Paraná de las Palmas. Estos resultados son consistentes con los de mayor precisión presentados en Badano et al. (2012), que indican que las mayores tasas de crecimiento del Frente del Delta deben ser esperadas en dos zonas: entre el Paraná Mini y el Paraná de las Palmas, y entre el Canal del Este y el río Urión, con una tasa media de crecimiento de 1,6 km² año⁻¹.

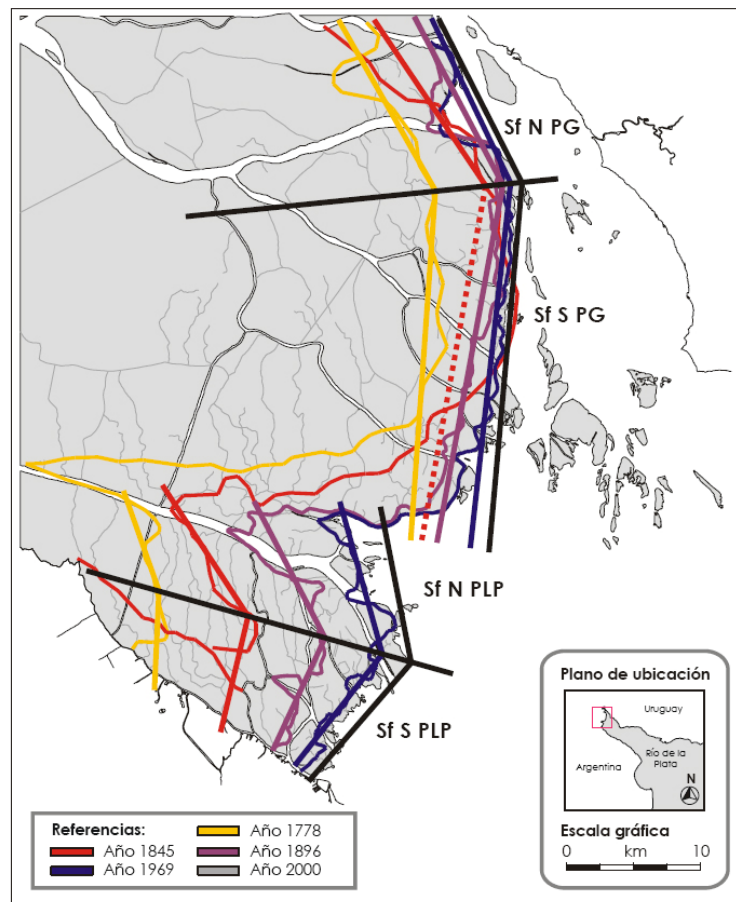


Figura 6.6. Avance histórico del Frente del Delta del río Paraná: Subfrente Paraná Guazú (Norte y Sur) y Subfrente Paraná de las Palmas (Norte y Sur) (Sarubbi, 2007).

De acuerdo a las proyecciones planteadas por Sarubbi (2007), hacia fines de siglo XXI el Frente del Delta podría llegar hasta la localidad de Vicente López, viéndose afectada la estrategia de dragado del Canal Emilio Mitre, y modificándose las tasas de sedimentación en los puertos de San Isidro y Vicente López. La toma de agua de Palermo podría presentar algunos inconvenientes. Las descargas de efluentes domésticos desde el emisario Berazategui y del futuro emisario Dock Sud no se verían afectadas.

En la zona del Río de la Plata Superior, simulaciones de escenarios futuros (Figuras 6.7 y 6.8) indican que el aumento del nivel medio del mar es un factor clave en la dinámica del Frente del Delta del río Paraná (Badano et al., 2011), generando una reducción de la tasa de crecimiento. El efecto de la variación en las cargas de sedimentos es poco significativo.

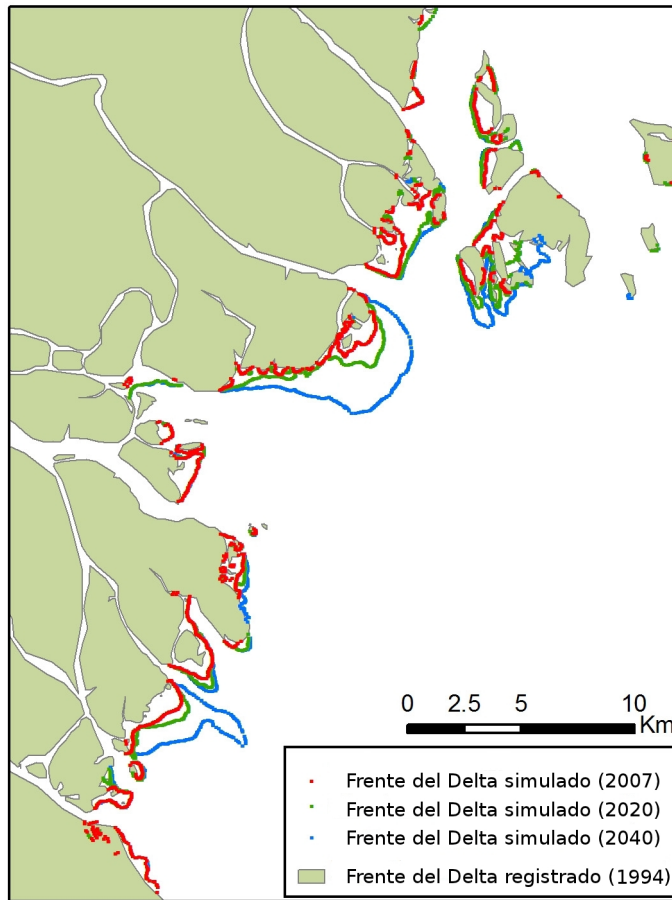


Figura 6.7. Modelación del avance del frente del Delta (Badano et al., 2012)

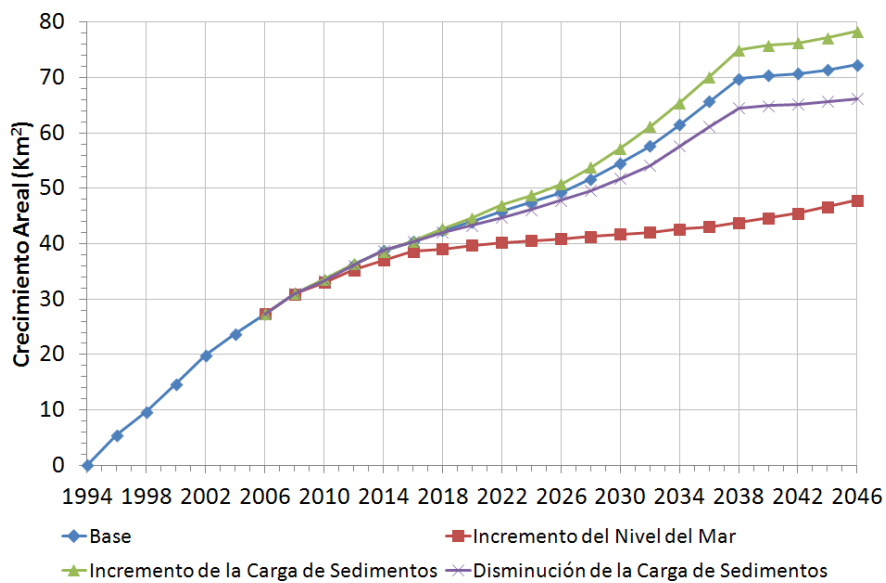


Figura 6.8. Evolución del crecimiento en área del Frente del Delta del río Paraná para distintos escenarios (Badano et al., 2012)

6.6 Dinámica general

La metodología utilizada para modelar la dinámica de sedimentos en el Río de la Plata se basa en la aplicación de un modelo de transporte de sedimentos finos en suspensión, que incluye un término sumidero (deposición) y un término fuente (resuspensión).

Las primeras aproximaciones hacia una comprensión de la dinámica general de sedimentos finos fueron planteadas por Guarga et al. (1991), en donde se presentó una revisión de la dinámica sedimentaria del Río de la Plata y una interpretación de los mecanismos de transporte-erosión-deposición de sedimentos en base a los resultados obtenidos con un modelo de corrientes. van Avermaete (2004) pudo representar el fenómeno de transporte de sedimentos a nivel cualitativo, mostrando claramente los corredores de flujo, las corrientes litorales y campos superficiales de sedimentos compatibles con las imágenes satelitales. Piedra-Cueva et al. (2006) obtuvieron distribuciones espaciales de concentración de sedimentos en suspensión para diferentes escenarios de interés; en este trabajo se muestra que, considerando como único forzante exterior a la marea astronómica, en la zona de Montevideo no se genera una estratificación importante en la concentración de sedimento en suspensión, la zona de Colonia se presenta con erosión predominante, y la zona de Buenos Aires muestra una predominancia de la deposición.

En el marco del proyecto FREPLATA-FFEM, Simionato et al. (2011), se efectuaron simulaciones numéricas de la dinámica sedimentológica forzada por la descarga continental (fue desarrollada una metodología para la obtención de series temporales diarias de descarga sólida en los ríos Paraná de las Palmas y Guazú basada en datos continuamente accesibles, Re et al. 2009), el viento local y la marea astronómica. Las comparaciones de las soluciones numéricas obtenidas con los datos adquiridos durante las campañas oceanográficas mostraron que el modelo reproduce adecuadamente el orden de magnitud y el rango de variabilidad exhibido por las observaciones. La comparación con observaciones satelitales MODIS indicó que, con el grado actual de desarrollo, el modelo reproduce razonablemente las zonas de máxima concentración de sedimentos suspendidos en varias zonas del Río de la Plata Interior (Simionato et al., 2011).

El análisis de las simulaciones permitió hacer inferencias acerca de los procesos físicos que determinan la dinámica sedimentológica en el Río de la Plata. En este sentido, se concluyó que éste puede dividirse en cuatro regiones fundamentales en términos de dichos procesos Re y Menéndez, 2011) (Figura 6.9):

- i) En el Río de la Plata Superior la dinámica está dominada por la deposición de sedimentos provenientes de los tributarios y, en menor medida, por la marea. En esta región el viento impacta como tercer forzante en orden de importancia, advectando el sedimento junto con el agua;
- ii) En el Río de la Plata Medio la concentración de los sedimentos en suspensión se reduce significativamente, como consecuencia de que los sedimentos decantan mayoritariamente en la región precedente;
- iii) En proximidades y al norte de Punta Piedras, en condiciones hidrometeorológicas moderadas, los sedimentos son resuspendidos por efectos de la marea, que incrementa su magnitud significativamente hacia la Punta. En cambio, durante las grandes tormentas esta región probablemente se rellene, de modo de conducir al relativo equilibrio morfológico observado en la naturaleza. En esta zona se

observa una fuerte vinculación entre la concentración de los sedimentos suspendidos y los ciclos de sicigias y cuadraturas de la marea;

- iv) En la región comprendida entre Punta Piedras y Montevideo y la Barra del Indio, en condiciones hidrometeorológicas moderadas se produce la deposición del sedimento resuspendido en la zona anterior. En esta zona, los vientos parecen afectar la concentración de sedimentos en suspensión (Figura 6.10). Durante las grandes tormentas, se resuspende el material depositado, generando erosión del fondo.

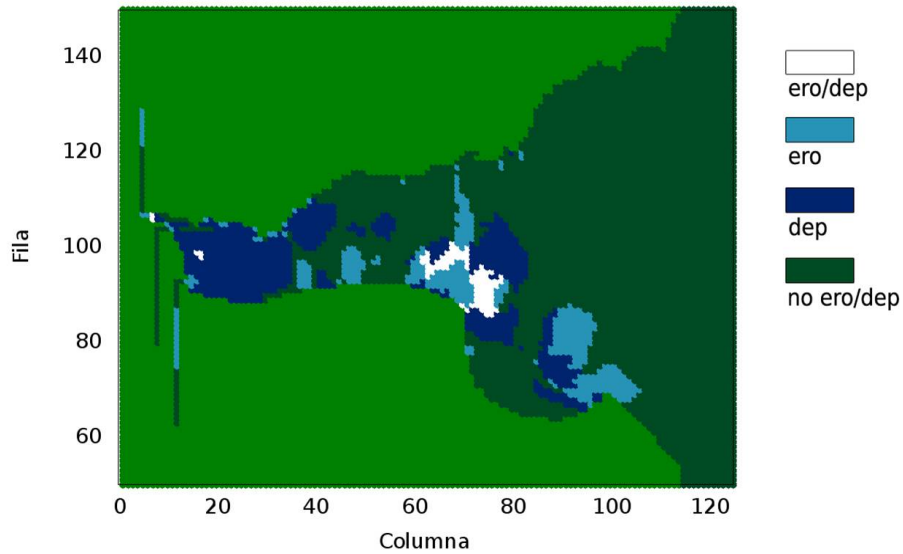


Figura 6.9. Zonas de erosión y deposición (Re y Menéndez, 2011)

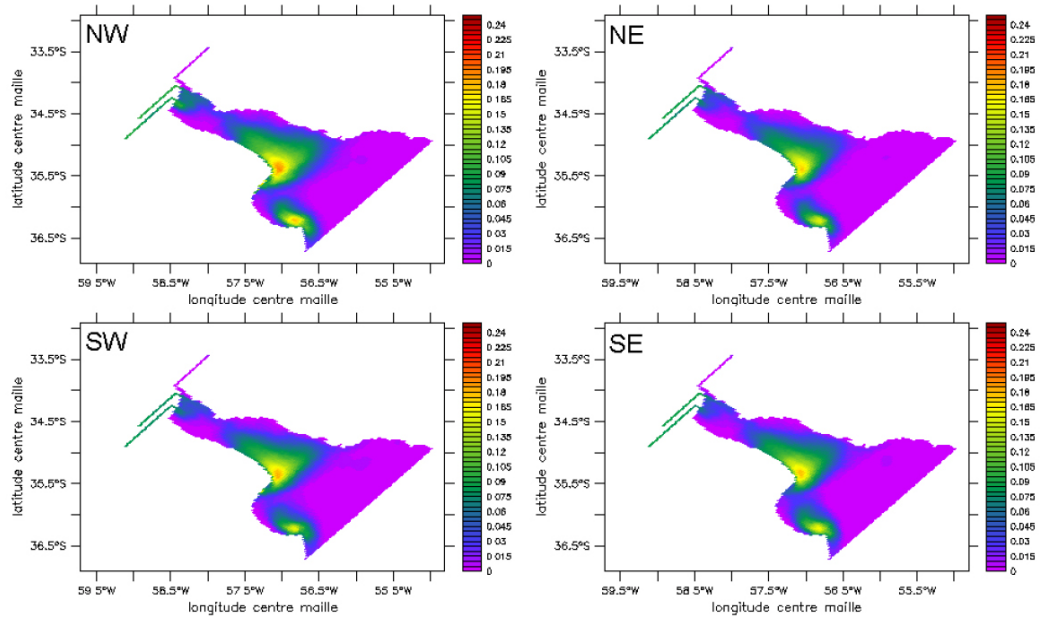


Figura 6.10. Concentración de sedimentos en superficie para diferentes direcciones del viento (Simionato et al., 2011).

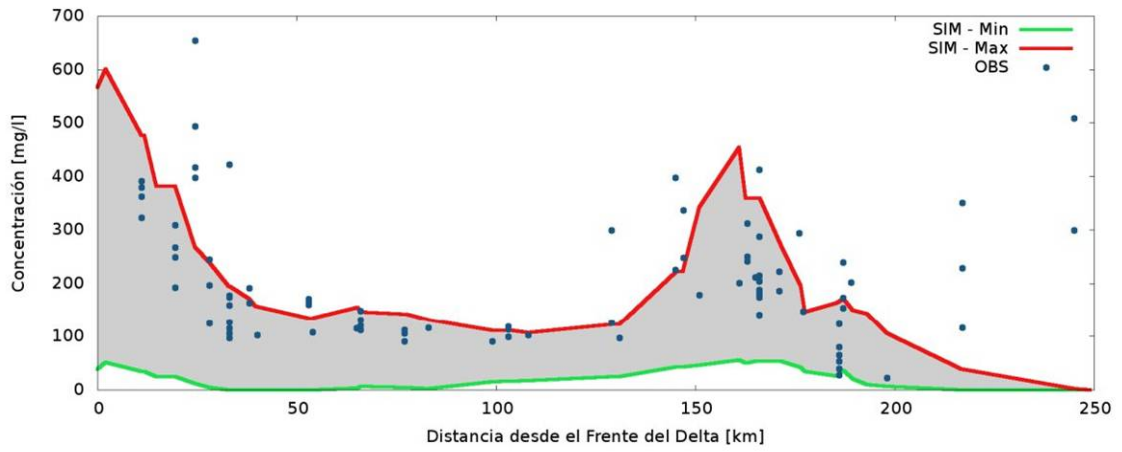


Figura 6.10. *Envolvente de concentración de sedimentos en suspensión a lo largo de la ruta de navegación (Re y Menéndez, 2011)*

7 ELEMENTOS DE MODELACIÓN

7.1 Forzantes del transporte

7.1.1 Mareas en el Río de la Plata

En general, el forzante de mareas es representado a partir de la componente principal de marea M_2 , que es la más importante de la región estudiada (Simionato et al., 2002; Re y Menéndez, 2004). Piedra-Cueva y Fossati (2003) realizaron ensayos considerando las componentes M_2 , O_1 , Q_1 , N_2 y S_2 de marea astronómica, mostrando que no modifican sensiblemente los resultados obtenidos considerando solamente a la componente fundamental M_2 .

Otras representaciones, como la de Santoro et al. (2011) utiliza trece componentes de marea obteniendo los mejores resultados en la representación de componentes semidiurnas como M_2 y N_2 , y la de Simionato et al. (2011) que utiliza catorce componentes de marea, obteniendo una buena representación tanto en amplitud como en fase de las componentes M_2 , O_1 , N_2 , Q_1 y K_2 .

7.1.2 Campos de vientos

El viento es un forzante muy importante de la circulación en el Río de la Plata. Particularmente en el Río de la Plata Exterior afecta la dinámica en todas las escalas, y cuando se originan vientos muy intensos del Sudeste (*Sudestadas*) la dinámica se ve afectada más fuertemente en el Río de la Plata Superior.

La circulación general de la atmósfera en la región del Río de la Plata está controlada por la influencia del sistema de alta presión semipermanente del Atlántico Sur.

La mejor información libremente disponible para forzar los modelos con campos de vientos actuantes sobre la superficie del Río de la Plata corresponde a los reanálisis de NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996). Esta información está dada en una grilla espacial de 1.9048° de latitud y 1.875° de longitud (en esta región aproximadamente 240 km por 180 km), con un intervalo temporal de 6 horas (las 0:00, 6:00, 12:00 y 18:00 de cada día; GMT, Greenwich Mean Time).

Los reanálisis de NCEP/NCAR tienden a subestimar la velocidad del viento, por lo tanto, si no se interviene sobre los datos de viento (Meccia, 2008) la elección de la mejor forma de calcular el coeficiente de arrastre del viento debe surgir de un acuerdo global de validación.

Metodologías previas, tomaron la información de vientos de estaciones meteorológicas costeras como Carrasco en Montevideo o Aeroparque en Buenos Aires para generar los campos de vientos (por ejemplo, Jaime y Menéndez, 1999).

7.1.3 Condiciones de borde de caudal

Ensayos efectuados por Jaime y Menéndez (1999) variando el coeficiente de modulación del caudal ingresante mostraron que su influencia sobre los niveles del río en las estaciones de control es débil. Esto muestra que, en la práctica, las simulaciones pueden efectuarse considerando los caudales ingresantes constantes en el tiempo si el objetivo es representar los niveles del río.

Sin embargo, la descarga constante impuesta como condición de borde no resulta una condición adecuada para representar con precisión las corrientes en el Río de la Plata Superior. Prario et al. (2011) presentan una condición de borde más realista, planteada en términos de la imposición de una pendiente hidráulica y la variación del nivel de acuerdo a la onda de marea, que mejora notablemente la simulación de corrientes en el Río de la Plata Superior respecto de aquellas simulaciones con descargas constantes en esos bordes.

7.2 Condicionantes del transporte

7.2.1 Batimetría

La batimetría juega un rol central en la circulación del Río de la Plata: en el Río de la Plata Interior el flujo se concentra a lo largo de los canales profundos; y en el Río de la Plata Intermedio, el efecto Coriolis se empieza a sentir y el transporte se concentra en el norte (Simionato et al., 2004).

En el Río de la Plata intermedio se manifiesta una disipación del flujo de energía que en los canales profundos, al igual que en el Río de la Plata Superior (Simionato et al., 2002)

7.2.2 Condiciones de borde oceánicas

Santoro et al. (2011) demostraron que la aplicación al borde oceánico de una condición de radiación (*Blumberg y Kantha*) tiene una importante influencia en los resultados de las simulaciones del Río de la Plata.

En el modelo de Re y Menéndez (2004) los bordes oceánicos fueron tratados como borde no reflejante (invariantes de Neumann, borde norte) y cerrado (borde este).

7.2.3 Rugosidad del fondo

O'Connor (1991) indicó que el coeficiente de fricción para el Río de la Plata Interior tiene una influencia significativa en la velocidad de la corriente. En cambio, las condiciones hidrodinámicas en el Río de la Plata Exterior se muestran relativamente insensibles a los cambios en este coeficiente.

Jaime y Menéndez (1999) no encontraron necesario zonificar la rugosidad del fondo, fijando un valor uniforme del coeficiente de rugosidad de Manning que, por calibración, resultó de 0,015.

7.2.4 Difusividad

Ensayos con trazadores radioactivos efectuados en el Río de la Plata Interior indicaron un valor medio del coeficiente de difusividad longitudinal (incluye mezcla turbulenta y advección diferencial en dirección vertical) de alrededor de 20, y uno de difusividad lateral (incluye sólo mezcla turbulenta) del orden de 1 (Carreras y Menéndez, 1987; 1988; 1989; 1990).

Mediante registros de turbidez, Cardini et al. (2002) ajustaron día a día los valores del coeficiente de dispersión del material.

7.3 Decaimiento bacteriano

Para el decaimiento de coliformes fecales, utilizado como parámetro indicador de contaminación bacteriana, se han tomado muchas veces valores constantes de su tasa, expresada en términos del T90 (tiempo para el cual la concentración cae el 90%). Fernandez et al. (2011) aplicaron una formulación para el T90 en función de la salinidad, la temperatura y la radiación solar, obteniendo valores dentro de un rango de entre 20 y 72 horas). Fossati et al. (2008) se basaron en la formulación de Chapra para el T90, ajustándola en función de observaciones, que en Montevideo mostraban (en superficie y durante la temporada estival) un valor medio diario de aproximadamente 20 hs, mientras que en Punta del Este era de entre 2 y 4 horas.

7.4 Tamaño de sedimentos

Se dispone de determinaciones del tamaño medio de sedimentos suspendidos sobre gran parte del Río de la Plata (Simionato et al., 2011).

7.5 Códigos numéricos y software

En los estudios de modelación se han aplicado una gran variedad de códigos numéricos y algún software comercial, entre ellos:

- RMA-10: Fue utilizado en el IMFIA. Se discontinuó por los altos costos computacionales.
- MOHID: Fue utilizado en el INA. Ha sido exitoso para simular la hidrodinámica pero aún no funcionó adecuadamente para simular el transporte de sedimentos.
- HIDROBID II: Ha sido desarrollado en el INA, donde se aplicó. Es particularmente apto en el Río de la Plata Interior, donde prácticamente no se desarrollan corrientes de densidad.
- Tidal y PTidal: Fueron desarrollados y utilizados en el IMFIA.

- HamSOM/CIMA: Fue utilizado en el CIMA.
- COHERENS: Fue utilizado en el INA.
- POM (2D y 3D): Fue utilizado en el INA.
- RMA-2 + SED2D-WES2: Fue utilizado en Serman & Asociados.
- RMA-2 + RMA-11: Fue utilizado en el IMFIA.
- Mike 21-ECOLAB del DHI Water & Environment: Fue utilizado en el INA.
- ECOM (Estuary, Coastal, and Ocean Model: Fue utilizado en el CIMA.
- MARS 3D: Fue utilizado en el CIMA, IMFIA e INA.
- SIM3D y DYNTRAN: Fue utilizado por CDM & Asociados (Montevideo).
- MHD2: Fue utilizado por INTECSA (Montevideo).

7.6 Discretización

El paso temporal de la serie de datos de vientos regionales utilizada para forzar el modelo hidrodinámico, influye significativamente en la capacidad del modelo de poder representar con precisión adecuada la estadística de duraciones de las crecidas en la Región Metropolitana de Buenos Aires (Lecertua, 2010).

Una estrategia adoptada para mejorar la discretización de los modelos ha sido la de anidar grillas de resolución espacial creciente, forzando los modelos locales con resultados de aplicaciones de mayor escala (Simionato et al., 2004; Fossati et al., 2008; Re et al., 2009).

7.7 Esquemas Numéricos

En la mayoría de los estudios se han utilizado esquemas numéricos con 'upwind' de bajo orden para los términos advectivos, no habiéndose determinado la ventaja de recurrir a aproximaciones de mayor orden.

8 CONCLUSIONES

Los estudios de modelación numérica de la dinámica del Río de la Plata, incluyendo el transporte de contaminantes y sedimentos, han tenido un desarrollo continuo, consistente y profundo desde sus comienzos, en la década de 1970. Se han atacado las grandes problemáticas, con distintos objetivos y puntos de vista. La síntesis de sus resultados, que se presenta en este Informe, permite disponer de una visión interpretativa de los principales problemas, muchos de ellos relacionados directamente con la gestión del recurso:

- Han sido comprendidos los patrones generales de circulación.
- Se ha podido representar exitosamente la evolución de la distribución de salinidad en el Río de la Plata Exterior.
- Se ha podido explicar la distribución de contaminantes a diversas escalas: global (que ha permitido efectuar un balance de nutrientes del Río de la Plata Interior), regional (que ha permitido determinar zonas de uso limitado en la Franja Costera Sur) y local (que ha permitido establecer el impacto de descargas puntuales del tipo emisarios subacuáticos ó descargas térmicas).
- Ha sido analizada la dinámica de sedimentos finos a diversas escalas: global (proveyendo una explicación fenomenológica), regional (pudiendo representarse el avance del Frente del Delta) y local (asociada a varios problemas de gestión, a saber, dragados de mantenimiento de canales de navegación, impacto de plumas de turbidez, impacto de rellenos).
- Se han puntualizado observaciones sobre la metodología de modelación, que hacen tanto a los datos de alimentación, como a las técnicas de representación.

REFERENCIAS

- Albarracín, J.I., 1987. Análisis de la hidrodinámica del Río de la Plata a partir de una simulación numérica. Informe LHA 065-001-88, pp. 147.
- Badano, N.D., Sabarots Gerbec, M., Re, M., Menéndez, A.N., 2011. Desarrollo y aplicación de un modelo acoplado hidrodinámico-sedimentológico basado en OpenFOAM. XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF 2011, Rosario, Argentina.
- Badano, N.D., Sabarots Gerbec, M., Re, M., Menéndez, A.N., 2012. A coupled hydro-sedimentologic model to assess the advance of the Parana River Delta Front. River Flow 2012, San Jose, Costa Rica, September.
- Bottelli D., Montes S., Baione B., 2004. Emisario Berazategui. Análisis de la dispersión – Campo lejano. Aguas Argentinas, pp. 56.
- Cardini, J.C., Garea, M., Campos, M.R., 2002. Modelación del transporte de sedimentos puestos en suspensión por actividades de dragado en el Río de la Plata, para la generación en tiempo real de pronósticos de afectación de áreas costeras. MECOM 2002, First South-American Congress on Computational Mechanics, Santa Fe-Paraná, Argentina, Octubre.
- Carreras, P.E., Menéndez, A.N., 1987. Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Modelo matemático hidrodinámico. Informe LHA-INCYTH 070-002-88.
- Carreras, P.E., Menéndez, A.N., 1988. Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Modelos matemáticos de dispersión de contaminantes. Informe LHA-INCYTH 070-003-88.
- Carreras P., Menéndez A. N., 1988. Tratamiento y disposición de efluentes cloacales del Gran Buenos Aires en el Río de la Plata. Informe LHA- INCYTH 070-004-88, pp. 65.
- Carreras, P.E., Menéndez, A.N., 1989. Modelación matemática de la dispersión de un contaminante, Cuarta Reunión Técnica sobre Desarrollo Tecnológico y Tecnologías Apropriadadas para el Saneamiento, Buenos Aires, Abril.
- Carreras, P.E., Menéndez, A.N., 1989. Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Modelación de la Contaminación en la Costa. Informe LHA-INCYTH 070-007-89.
- Carreras, P.E., Menéndez, A.N., 1990. Mathematical simulation of pollutant dispersion,

Journal of Ecological Modelling, 52, Noviembre.

- CDM y Asociados, 1982. Informe final sobre los modelos desarrollados por CDM y Asociados para determinar la calidad de las aguas costeras del Río de la Plata entre Punta Lobos y el Arroyo Carrasco.
- CDM y Asociados, 1985. Saneamiento Urbano de Montevideo, Estudio de factibilidad para la zona al oeste de Punta Carreta.
- Destuynder V., Tarela P., 2002. Modelación de la Cuña Salina del Río de la Plata. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, Octubre.
- Destuynder, V., 2002. Modelación hidrodinámica tridimensional del Río de la Plata, Informe INA LHA-214-01-02.
- EIH (Estudio de Ingeniería Hidráulica S.A.), 1998. Modelo de Calidad de Agua de la Franja Costera del Río de la Plata. Memoria Técnica – Doc. 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 Etapa I – Vol. 1 y 2) del Plan de Saneamiento Integral.
- Ezzatti, P., Fossati, M., 2009. Mejora del desempeño computacional del modelo RMA-11. Reporte Técnico RT 09-02. PEDECIBA Informática, Instituto de Computación (FI), UDELAR.
- Ezzatti, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I., 2011. An efficient version of the RMA-11 model. CLEI Electronic Journal, 14(2):4. August.
- Fernández, M., Fossati, M., Piedra-Cueva, I., 2011. 3D Lagrangian Modeling of Montevideo’s Submarine Outfall Plume. International Symposium on Outfall Systems, Mar del Plata, Argentina.
- Fossati, M., Piedra-Cueva, I., 2003. Salinity simulations of the Río de la Plata, International Conference on Estuaries and Coasts, November 9-11, 2003, Hangzhou, China.
- Fossati, M., 2005. Modelación bidimensional del campo salino en el Río de la Plata. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay, pp. 267.
- Fossati, M., Fernández, M., Piedra-Cueva, I., 2008. Evaluación de alternativas de descarga utilizando un modelo de transporte lagrangiano. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Fossati, M., Fernández, M., Piedra-Cueva, I., 2008. Modelación hidrodinámica tridimensional del Río de la Plata utilizando modelos encajados. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia. Septiembre.
- Fossati, M., Piedra-Cueva, I., 2008. Numerical modelling of residual flow and salinity in the Río de la Plata. Applied Mathematical Modelling, 32, pp. 1066-1086.
- Fossati, M., Urrestarazu, S., Santoro, P., Piedra-Cueva, I., 2008. Modelación de la temperatura del agua en la Bahía de Montevideo: Toma y descarga de agua de una central térmica. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Fossati, M., Fernández, M., Piedra-Cueva, I., 2009. Implementation of a 3D Lagrangian Model for evaluating submarine outfalls in the Río de la Plata coastal area. 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment.
- Fossati, M., Moreira, D., Simionato, C., Cayocca, F., Tessier, C., Sarubbi, A., Re, M., 2010. Estudio del transporte de sedimentos en el Río de la Plata: Primeros de la modelación numérica, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, Noviembre.

- Fossati, M., Santoro, P., Urrestarazu, S., Piedra-Cueva, I., 2011. Numerical study of the effect of a power plant cooling water discharge in the Montevideo Bay. *Journal of Applied Mathematics*, Volume 2011, 23 pp.
- Framiñan, M.B., Etala, M.P., Acha, E.M., Guerrero, R.A., Lasta, C.A., y Brown, O.B., 1999. Physical characteristics and processes of the Río de la Plata estuary, in *Estuaries of South America*, Perillo, G.M., Piccolo, M.C. y Pino, M. (Editores), Springer - Verlag, 8, 161-194.
- Guarga R., Vinzón S., Rodríguez H., Piedra-Cueva, I., Kaplan E., 1991. Corrientes y sedimentos en el Río de la Plata. Informe CARP (Comisión Administradora del Río de la Plata), pp. 115.
- Guarga, R., Kaplan, E., Vinzón, S., Rodríguez, H., 1991. Aplicación de un modelo de circulación al Río de la Plata. *Jornadas de Investigación Científica en Materia de Contaminación de las Aguas*, Montevideo, Uruguay. Agosto.
- Guerrero, R. A., E. M. Acha, M. B. Framiñan y C. A. Lasta, 1997: Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. *Continental Shelf Research*, 17(7), 727-742.
- Hausstein H., 2008. Simulation of the Transport of Suspended Particulate Matter in the Río de la Plata. Informe Institut of Coastal Research (Department Geowissenschaften), Universität Hamburg, Alemania, pp. 115.
- Huret M., Dadou I., Dumas F., Lazure P., Garçon V., 2005. Coupling physical and biogeochemical processes in the Río de la Plata plume. *Continental Shelf Research*, 25, pp. 629–653.
- Huret, M., 2005. Apports des données 'couleur de l'eau' a la modélisation couplée physique-biogéochimie en milierdynamique côtier: Application au Río de la Plata et au Golfe de Gascogne. Tesis de Doctorado, Universidad de Toulouse III, Francia.
- INTECSA, 1987. Plan de desarrollo a largo plazo para el Puerto de Montevideo incluyendo un estudio de las condiciones hidráulicas de la Bahía de Montevideo y del canal de acceso. *Estudios Hidráulicos y Sedimentológicos*.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 1999. Modelo Hidrodinámico "RÍO DE LA PLATA 2000". Informe LHA 01-183-99, pp. 172.
- Jaime, P.R., Menéndez, A.N., Natale, O., 2001. Balance y Dinámica de Nutrientes Principales en el Río de la Plata. Informe Proyecto INA 10.4, 01, pp. 158.
- Kalnay et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.
- Kaplan, 1998. A shallow water model distributed using domain decomposition. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
- Kind, V.M., 2004. Desplazamiento del frente de salinidad del Río de la Plata debido al aumento del nivel medio del mar. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad de Buenos Aires (UBA), pp. 172
- Lecertúa, E.A., 2010. Análisis de riesgo de duración de inundaciones en las áreas costeras del Río de la Plata considerando Cambio Climático. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad de Buenos Aires (UBA), pp. 125.
- Lecertúa, E.A., Menéndez, A.N., Re, M., 2012. Mapas de Riesgo de Duración de Inundaciones en la Región Metropolitana de Buenos Aires. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica, Septiembre.
- Makler S., 1976. Aspectos de un modelo hidrodinámico para el estuario del Río de la Plata.

Laboratorio de Análisis Numérico, Instituto de Informática Hídrica (INCyTH).

- Makler S., Marshall G., Caponi E., Casañas R., 1976. Aspectos básicos de un modelo de calidad de aguas para el estuario del Río de la Plata. Informe INCYTH N° 2/76, pp. 21.
- Marazzi, M.L., Menéndez, A.N., 1991. Estudio de las corrientes en los canales de navegación en el Río de la Plata. Informe LHA 114-003-91, pp.
- Marshall, G., Moledo, L., Makler, S., 1978. Aspectos computacionales de un modelo de calidad de aguas para el estuario del Río de la Plata utilizando el método de los residuos ponderados con el criterio de Galerkin. En 'Métodos Numéricos en la mecánica del Continuo', Marshall Ed., EUDEBA, pp. 8.
- Mazio, C.A., 1990. Modelo hidrodinámico para el Río de la Plata. Revista Frente Marítimo, 7 (sección A), pp. 87-94.
- Mazio, C.A., Dragani, W.C., 1991. Estimación de la deriva en el Río de la Plata aplicada al transporte de contaminantes. Jornadas de Investigación Científica en Materia de Contaminación de las Aguas, Montevideo, Uruguay.
- Meccia, V.L., 2008. Estudios de la circulación forzada por el viento en el estuario del Río de la Plata y sus implicancias en la estratificación: resultados del análisis de datos y simulaciones numéricas. Tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Universidad de Buenos Aires (UBA), pp. 168.
- Meccia, V.L., Simionato, C.G., Fiore, M.E., D'Onofrio, E.E., Dragani, W.C., 2009. Sea surface height variability in the Rio de la Plata estuary from synoptic to inter-annual scales: Results of numerical simulations. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 85, 327-343.
- Menéndez, A.N., 1985. Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre. Informe LHC-INCYTH S5-016-85. Ezeiza, Argentina.
- Menéndez, A.N., 1990. Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 6(1), pp. 25-36.
- Menéndez, A.N., Carreras, P.E., 1990. Simulación numérica de dispersión de contaminantes, XIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Montevideo, Uruguay, Noviembre.
- Menéndez, A.N., 1991. Estudio con modelo matemático de la contaminación debida a fuentes urbanas en el Río de la Plata, Jornadas de Investigación Científica en Materia de Contaminación de las Aguas, Montevideo, Uruguay, Agosto.
- Menéndez, A.N., 1991. Métodos numéricos para problemas de transporte de contaminantes, XII Congreso Ibero-Latino-Americano sobre Métodos Computacionales para Ingeniería y III Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM'91, Santa Fe-Paraná, Argentina, Setiembre.
- Menéndez, A.N., 1994. Simulación numérica de la sedimentación en canales de navegación, Información Tecnológica - Revista Latinoamericana, 5 (4).
- Menéndez A.N., 1996. Disipación térmica de la descarga al Río de la Plata del agua de refrigeración de la Central Térmica Dock Sud. Informe Complementario, Ambiental S.A, pp. 4.
- Menéndez A.N., 1996. Disipación térmica de la descarga al Río de la Plata del agua de refrigeración de la Central Térmica Dock Sud. Informe Final, Ambiental S.A, pp. 35.
- Menéndez A.N., 1997a. Estudio de la mezcla entre las aguas del Río de la Plata y del

- Riachuelo en las inmediaciones de la Boca del Dock Sud. Informe Final, Ambiental S.A, pp. 55.
- Menéndez, A.N., 1997b. Hydraulic studies for the water intake of Central Costanera. Informe LHA 01-155a-97, pp. 122.
- Menéndez, A.N., Brea, J.D., Tarela, P.A., 1999. Calidad de las aguas de la zona costera del Río de la Plata adyacente a la urbanización Santa María. Informe IRSA, pp. 94
- Menéndez, A.N., Tarela, P.A., 1999. Simulación numérica de la estratificación de un reservorio. MECOM99, VI Congreso Argentino de Mecánica Computacional, Mendoza, 6-10 de septiembre.
- Menéndez, A.N., Castellano, R., 2000. Simulation of sedimentation in an estuary due to an artificial island. 4th International Conference HydroInformatics, Cedar Rapids, Iowa, USA, July.
- Menéndez, A.N., Castellano, R., 2000. Simulación numérica de problemas con escalas temporales disímiles: crecimiento de una barra de sedimentación. ENIEF 2000 - XI Congreso sobre Métodos. Numéricos y sus Aplicaciones, San Carlos de Bariloche, Argentina, noviembre.
- Menéndez, A. N., Jaime, P., Natale, O. E., 2002. Balance de nutrientes en el Río de la Plata usando modelación matemática. XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, octubre.
- Menéndez, A. N., Jaime, P., Natale, O. E., 2002. Nutrients balance in the Rio de la Plata River using mathematical modelling, 5th International Conference HydroInformatics 2002, Cardiff, UK, July.
- Menéndez, A. N., Sarubbi, A., 2007. A model to predict the Paraná Delta Front advancement. Workshop on Morphodynamic Processes in Large Lowland Rivers, Santa Fe, Argentina, November.
- Menéndez, A. N., Badano, N. D., Re, M., García, P. E., Lecertúa, E. A., Lopolito, M. F., Sarubbi, A., 2009. Numerical simulation to study the wastewater disposal project in the coastal zone of Buenos Aires. 33rd. Congress of IAHR, Vancouver, Canada, August.
- Menéndez, A.N., Lopolito, M.F, Badano, N., Re, M., 2011. Evaluación de la calidad del agua en la Franja Costera Sur del Río de la Plata mediante modelación numérica. Informe LHA 02-1207-11, pp. 186.
- Menéndez, A.N., Lopolito, M.F., Badano, N.D., Re, M., 2011. Influence of projected outfalls in the Plata River on limited water use zones. International Symposium on Outfall Systems, Mar del Plata, Argentina, Mayo.
- Molinari, G.N., 1986. Simulación numérica de la circulación en el Río de la Plata. Informe LHA-INCYTH S5-017-86, pp. 116.
- Montes S., Charette J., Bottelli D., 2005. Modelo del Río de la Plata. Validación de resultados en la zona de descarga del Emisario Berazategui actual. Modelización. Aguas Argentinas, Abril.
- Moreira, D., Simionato, C.G., Tessier, C., Nuñez, M.N., Cayocca, F., Fossati, M., Sarubbi, A., Re, M., 2009. Primeros resultados de la implementación de un modelo hidrodinámico de alta resolución para estudiar la dinámica de los sedimentos en el Río de la Plata, VII Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Bahía Blanca, diciembre.
- O'Connor, W.P., 1991. A numerical model of tides and storm surges in the Rio de la Plata Estuary. Continental Shelf Research, 11 (12), pp. 1491-1508.

- Olalde, A.M., 1988. Simulación numérica de corrientes de deriva en el Río de la Plata. Informe LHA 065-002-88, pp. 91.
- Petroni, R.N., 2000. Desarrollo y aplicación de un modelo bidimensional de calidad de agua. Parte 1. Revista Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 52, pp. 34-44, set-oct, Buenos Aires, Argentina.
- Piedra-Cueva, I., Pedocchi, F., Fossati, M., 2002. Estudio de Antecedentes sobre el Uso de Modelos en la Costa Uruguaya del Río de la Plata. Informe IMFIA, pp. 35.
- Piedra-Cueva, I., Lorenzo, E., Fossati, M., 2002. Modelación numérica del futuro emisario Punta Lobos (Montevideo). XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, octubre.
- Piedra-Cueva, I., Fossati, M., 2003. Corredores de circulación en el Río de la Plata. V Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, XIII Coloquio Argentino de Oceanografía, Mar del Plata, Argentina.
- Piedra-Cueva, I., Fossati, M., 2003. Corredores fluviales en el Río de La Plata Interior. Informe IMFIA, pp. 46.
- Piedra-Cueva, I., Fossati, M., 2003. Modelación numérica hidrodinámica del frente salino en el Río de la Plata. Informe Proyecto FREPLATA, Julio.
- Piedra-Cueva, I., Fossati, M., 2003. Simulación numérica de la distribución estacional del frente salino. Informe IMFIA, noviembre.
- Piedra-Cueva, I., Rodriguez Borelli, H., 2003. Finite element modeling of the Rio de la Plata. International Conference on Estuaries and Coasts, November 9-11, Hangzhou, China.
- Piedra-Cueva, I., Lorenzo, E., Fossati, M., Bellón, D., Ezzatti, P., 2006. Modelación hidrosedimentológica del Río de la Plata. Informe UDELAR, Proyecto de investigación PDT S/C/OP/19/04, pp. 233
- Piedra-Cueva, I., Fossati, M., 2007. Residual currents and corridor of flow in the Rio de la Plata. Applied Mathematical Modelling, 31, pp. 564-577.
- Prario, B.E., Dragani, W., Mediavilla, D.G., D'Onofrio, E., 2011. Hydrodynamic numerical simulation at the mouths of the Parana and Uruguay rivers and the upper Rio de la Plata estuary: A realistic boundary condition. Applied Mathematical Modelling, 35, pp. 5265-5275.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2003. Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo, Informe INA-LHA 03-216-03.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2004. Estudio de los corredores de flujo del Río de la Plata Interior a partir del modelo de circulación RPP-2D. Informe INA-LHA 04-216-04, pp. 58.
- Re, M., Kind, V.M., Menéndez, A. N., 2004. La elección del dominio de cálculo, el modelo matemático y la escala de resolución en la modelación numérica. XIV Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF'2004, Bariloche, Noviembre.
- Re, M., Menéndez, A. N., 2005. Estudio de los corredores de flujo del Río de la Plata Interior con el modelo RPP-2D. XX Congreso Nacional del Agua, CONAGUA'2005, Mendoza, Mayo.
- Re, M., 2005. Impacto del Cambio Climático Global en las costas del Río de la Plata. Tesis de Maestría, Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEyN), Universidad de Buenos Aires (UBA), pp. 120.
- Re, M., Menéndez, A. N., 2006. Desarrollo de capas de mezcla entre los corredores de flujo

- del Río de la Plata Interior. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela, Octubre.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2007. Impacto del Cambio Climático en las Costas del Río de la Plata, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, 7 (1).
- Re, M., Menéndez, A.N., 2008. Modelación del impacto de un relleno costero sobre la dinámica del Río de la Plata. Informe de Avance 1. Informe LHA 02-300-08.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2009. Modelación del Impacto de un Relleno Costero sobre la Dinámica del Río de la Plata Informe de Avance 3. Informe LHA 04-300-09.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2009. Modelación del impacto de un relleno costero sobre la dinámica del Río de la Plata. Informe de Avance 5. Informe LHA 06-300-09.
- Re, M., Lecertúa, E. A., García, P. E., Menéndez, A. N., 2009. Zoning for hydraulic impact studies on the coastal zone of the Plata River. 6th. Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM, Santa Fe, Argentina, September.
- Re, M., García, P. E., Lecertúa, E. A., Menéndez, A. N., 2010. Modelación del impacto hidráulico de un relleno costero en zona compleja, XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay, noviembre.
- Re, M. y Sabarots Gerbec, M., 2010. Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata: Análisis de sensibilidad hidrodinámica, Informe LHA 05-296-10, Ezeiza, octubre.
- Re, M., Menéndez, A.N., 2011. Modelación Hidro-Sedimentológica del Río de la Plata: Dinámica de sedimentos bajo condiciones hidrometeorológicas normales. Informe INA-LHA 07-296-11, Ezeiza.
- Roberts P., Villegas B., 2009. Modeling the proposed Buenos Aires outfalls. Informe Preliminar AySA, pp. 45.
- Roberts P., Villegas B., 2010. Modeling the proposed Buenos Aires outfalls. Informe Final AySA, pp. 127.
- Roberts, P.J.W., Villegas, B.E., 2011. The proposed Buenos Aires outfalls: outfall design. International Symposium on Outfall Systems, Mar del Plata, Argentina.
- Rodrigues Vieira, J., 1990. Modelação matemática da circulação e transporte hidrodinâmicos em regiões costeiras. Aplicação ao Rio de la Plata. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 6 (1), pp. 119-134.
- Rodrigues Vieira, J., Lanfredi, N.W., 1996. A Hydrodynamic Model for the Río de La Plata, Argentina. Journal of Coastal Research, 12 (2), 430-446.
- Santoro, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I., 2008. Análisis de la circulación en la Bahía de Montevideo. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Santoro, P., Fernández, M., Fossati, M., Cazes, G., Terra, R., Piedra-Cueva, I., 2011. Pre-operational forecasting of sea level height for the Río de la Plata. Applied Mathematical Modelling, 35, pp. 2462-2478.
- Sarubbi A., 2007. Análisis del Avance del Frente del Delta del Río Paraná. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad de Buenos Aires (UBA), pp. 145.
- Sarubbi, A., Menéndez, A. N., 2007. Un modelo numérico para representar el avance del Frente del Delta del Río de la Plata a escala secular. XVI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF'2007, Córdoba, octubre.

- Simionato, C.G., Núñez, M.N., Engel, M., 2000. Investigaciones numéricas tridimensionales de la propagación de la onda de marea en la Plataforma Continental Argentina y el Río de la Plata, Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar, Puerto Madryn, 11-15 Septiembre.
- Simionato, C.G., Núñez, M., Engel, M., 2001. The Salinity Front of the Rio de la Plata: a numerical case study for winter and summer conditions. *Geophysical Research Letters*, 28 (13), pp. 2641-2644.
- Simionato, C.G., Núñez, M., 2002. Procesos que determinan la variabilidad invierno-verano en el frente superficial de salinidad del Río de la Plata: un estudio numérico de casos. Informe CIMA/Oc-02-03, pp. 27.
- Simionato, C.G., Dragani, W., Núñez, M., 2002. Modelo HamSOM/CIMA: Propagación de la onda de marea en la Plataforma Continental argentina y el Río de la Plata. Parte I: M2. Informe CIMA/Oc-02-05, pp. 61.
- Simionato, C.G., Dragani, W., Núñez, M., Meccia, V., Renaud, T., 2002. Modelo HamSOM-CIMA: Simulaciones de corrientes y alturas en el Río de la Plata. Comparación con observaciones. Informe CIMA/Oc-02-02. Septiembre.
- Simionato, C., Meccia, V., Dragani, W., Núñez, M., 2003. Modelo HamSOM/CIMA: Circulación estacional y plumas de los tributarios principales en el Río de la Plata. Informe CIMA/Oc-03-01, pp. 111.
- Simionato, C.G., Dragani, W., Núñez, M., Engel, M., 2004. A Set of 3-D Nested Models for Tidal Propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Rio de la Plata Estuary. Part I: M2. *Journal of Coastal Research*, 20 (3).
- Simionato, C.G., Dragani, W., Meccia, V.L., Núñez, M., 2004. A numerical study of the barotropic circulation of the Rio de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 61, pp. 261-273.
- Simionato, C.G., Berasategui, A., Meccia, V.L., Acha, M., Mianzan, H., 2006. The potential role of wind variability on plankton retention in the Río de la Plata Estuary: a numerical study. *Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguazu, Brazil, April, INPE*, p. 1383-1391.
- Simionato, C.G., Meccia, V.L., Dragani, W.C., Núñez, M.N., 2006. On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modeling barotropic circulation in the Rio de la Plata Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70, 195-206.
- Simionato, C.G., Meccia, V.L., Guerrero, R., Dragani, W.C., Núñez, M., 2007. Rio de la Plata estuary response to wind variability in synoptic to intraseasonal scales: 2. Currents' vertical structure and its implications for the salt wedge structure. *Journal of Geophysical Research*, 112, C07005.
- Simionato, C.G., Berasategui, A., Meccia, V.L., Acha, M., Mianzan, H., 2008. Short time-scale wind forced variability in the Rio de la Plata Estuary and its role on ichthyoplankton retention, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76, 211-226.
- Simionato, C.G., Moreira, D., Núñez, M.N., Cayocca, F., Piedra-Cueva, I., Fossati, M., Guerrero, R., Menéndez, A.N., Re, M., 2011. Dinámica de los sedimentos finos en el Río de la Plata. Informe Final Proyecto FREPLATA-FFEM, pp. 525.
- Simionato, C.G., Moreira, D., Piedra-Cueva, I., Fossati, M., Re, M., Sabarots Gerbec, M., Menéndez, A.N., Cayocca, F., 2011. Proyecto FREPLATA-FFEM Modelado numérico y mediciones in-situ y remotas de las transferencias de sedimentos finos a través del Río de la Plata. Parte B: Simulaciones numéricas, *Revista Frente Marítimo*, 22, 265-

304.

- Simionato, C.G., Moreira, D., Re, M., Fossati, M. 2011 Estudio de la dinámica Hidro-sedimentologica del Río de la Plata: observación y modelación numérica de los sedimentos finos. Proyecto FREPLATA. ISBN 978-92-990052-9-3
- Tarela, P.A., Menéndez, A.N., Bombardelli, F.A., Vilela, C.P.X., 1997. Modelación hidrosedimentologica en tomas de agua afectadas por un régimen de marea. ENIEF 97, X Congress on Numerical Methods and their Applications, San Carlos de Bariloche, Argentina, Noviembre.
- Van Avermaete, F.J., 2004. Propiedades de transporte del Río de la Plata: estudio mediante modelación hidrodinámica tridimensional e imágenes satelitales. Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería (FI), Universidad de Buenos Aires (UBA).
- Villegas, B.E., Roberts, P.J.W., 2011. The proposed Buenos Aires outfalls: hydrodynamic modelling. International Symposium on Outfall Systems, Mar del Plata, Argentina.