



## MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA Y DINÁMICA DE SEDIMENTOS FINOS EN LA BAHÍA DE MONTEVIDEO

**Pablo Santoro\***

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. Ingeniero Civil - Doctor en Mecánica de los Fluidos Aplicada, Asistente Gr. 2.

**Mónica Fossati**

IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

**Ismael Piedra-Cueva**

IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

**TEMA:** 4 – Medio ambiente

**CUENCA:** Río de la Plata

**ODS:** 14 – Vida Submarina



(\*): Herrera y Reissig 565, Montevideo, Montevideo – 11300 – Uruguay - Tel.: 27115276 – e-mail: [psantoro@fing.edu.uy](mailto:psantoro@fing.edu.uy)

### RESUMEN

Este trabajo presenta la implementación de un modelo acoplado corriente - oleaje - transporte de sedimento para el Río de la Plata y con alta resolución espacial en la Bahía de Montevideo. El modelo fue calibrado en base a información de diversas variables (niveles, corrientes, oleaje, salinidad, concentración de sedimento en suspensión, turbiedad) en varias estaciones de medición durante extensos períodos de tiempo. Los resultados obtenidos con todos los módulos reproducen satisfactoriamente los datos medidos, demostrando la capacidad del modelo para representar las principales características de la dinámica del Río de la Plata y específicamente de la Bahía de Montevideo.

En base a los resultados del modelo se realizó una caracterización de la hidrodinámica y dinámica de sedimentos finos en la Bahía de Montevideo. Se identificaron los principales patrones de circulación y su vínculo con los forzantes. Los eventos de marea meteorológica mostraron tener un rol relevante en el intercambio de agua y sedimento entre la bahía y el área costera adyacente, generando importantes anomalías respecto al comportamiento astronómico. Se realizó un análisis de los patrones de sedimentación, junto con un balance de sedimentos

**Palabras Clave (en negritas):** Bahía de Montevideo, sedimento cohesivo, TELEMAT

### INTRODUCCION

La Bahía de Montevideo ha jugado un rol fundamental desde los orígenes de la ciudad, siendo en la actualidad el principal puerto de nuestro país y responsable de un importante desarrollo industrial en su entorno. Durante los últimos años su actividad ha continuado incrementándose existiendo una fuerte demanda por mayores profundidades (cotas de calado) y más espacio para terminales de contenedores, graneleras, pesqueras, polos logísticos, desarrollos inmobiliarios; lo cual se traduce en la ejecución de diversos tipos de obras de infraestructura marítima. El estudio de la hidrodinámica y transporte de sedimentos en la Bahía resulta de interés para el propio diseño de este tipo de obras, pero además, es necesario desde el punto de vista ambiental evaluar el impacto sobre la misma generado por dichas obras. En este sentido como punto de partida se debe contar con una buena caracterización de la hidrodinámica y transporte de sedimentos en la Bahía y a su vez contar con las herramientas necesarias para evaluar su respuesta a las intervenciones antrópicas; es allí donde la modelación numérica resulta sumamente útil.



El conocimiento y la comprensión de la hidrodinámica y transporte de sedimentos es un requerimiento fundamental para la gestión del dragado en el Puerto de Montevideo. Por un lado permite planificar nuevas obras de dragado como nuevos canales y zonas de maniobra o profundización de las ya existentes. Permite además evaluar el efecto que las modificaciones en la línea de costa de la Bahía (dadas por ejemplo por la construcción de rellenos) podrían tener sobre la sedimentación en las vías de navegación. Finalmente, permite reevaluar la conveniencia de los puntos de descarga del dragado actuales y eventualmente la redefinición de los puntos de descarga.

Por otra parte, debido a la gran superficie específica de los sedimentos cohesivos, gran cantidad de contaminantes (por ejemplo, metales pesados) son adsorbidos en la superficie de sus partículas y transportados junto a los mismos. Comprender los mecanismos de transporte de los sedimentos tiene por tanto influencia directa sobre el transporte de contaminantes y la calidad ambiental de la Bahía.

## METODOLOGÍA

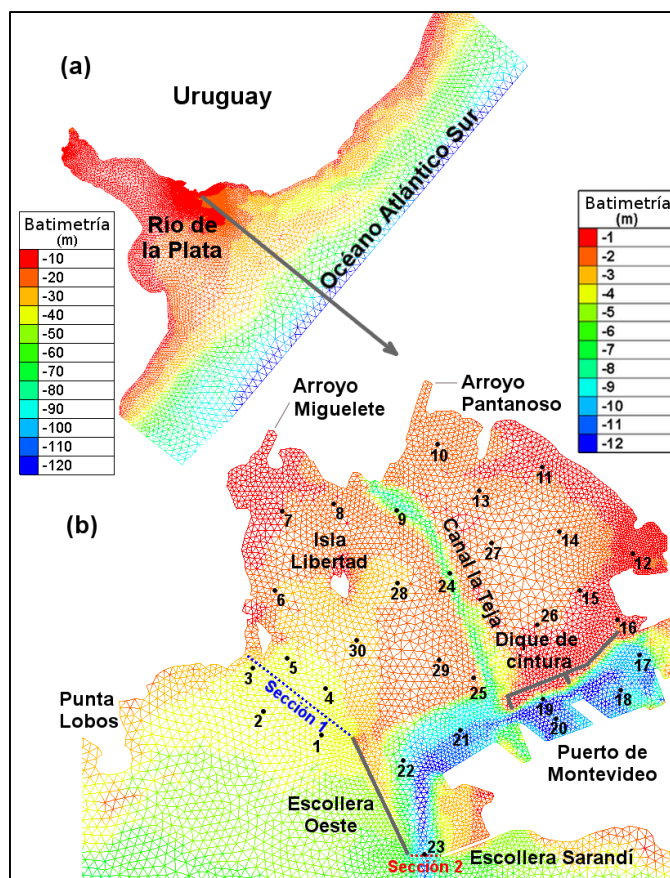
Se implementó un modelo hidrodinámico y sedimentológico tridimensional para la costa de Montevideo que incluye el efecto de la circulación, el oleaje y transporte de sedimento en suspensión (TELEMAC-MASCARET Modelling System). Dicha implementación considera las principales características de la dinámica del Río de la Plata, que muestra una variabilidad influenciada por la marea astronómica y los eventos de marea meteorológica u ondas de tormenta. Las primeras con régimen semidiurno con desigualdades diurnas, y las segundas y de frecuencia aproximadamente semanal y de varios días de duración (Santoro *et al.*, 2013).

El modelo TELEMAC fue implementado en el dominio que se muestra en la Figura 1. El mismo trabaja en elementos finitos y se utilizaron tres de sus módulos:

- El módulo de circulación tridimensional baroclínico TELEMAC 3D que permite simular la evolución temporal de la superficie libre, corrientes y la salinidad. Se consideraron los principales forzantes del sistema: aportes fluviales, ondas de marea astronómica y meteorológica, viento y presión atmosférica en la superficie libre.
- El módulo TOMAWAC, permite modelar la evolución en el espacio y en el tiempo del espectro de potencia del oleaje desde la escala oceánica hasta la escala costera. Los forzantes del modelo son el oleaje proveniente del océano y el viento en superficie.
- El módulo SEDI3D (librería dentro de TELEMAC3D) simula el transporte de sedimentos finos (cohesivo) y la evolución del fondo (procesos de erosión y sedimentación). Los procesos de erosión y deposición consideran tanto el efecto de las corrientes como del oleaje. El sedimento en suspensión actúa como un trazador activo que modifica la densidad del agua.

Los módulos de circulación y oleaje se encuentran acoplados, por lo cual el oleaje considera las variaciones temporales en la circulación (niveles y corrientes), y a su vez ésta es afectada por la presencia del oleaje. Ambos fueron calibrados y validados en base a series de niveles, corrientes, salinidad y parámetros de oleaje (altura de ola significativa, período pico y dirección) en diversas estaciones del Río de la Plata y con especial énfasis en la Bahía de Montevideo. Asimismo el modelo de transporte de sedimentos fue calibrado en base a series temporales de concentración de sedimento en suspensión y turbiedad en diversas estaciones del Río de la Plata (Santoro *et al.*, 2016).

El mayor interés de incluir el oleaje en la simulación es su relevancia como forzante para la dinámica de sedimentos finos. Los resultados muestran que la combinación de los tres módulos es capaz de reproducir adecuadamente las características principales de la dinámica de sedimentos finos en el estuario y en particular en la zona costera de Montevideo, caracterizada por picos de concentración de sedimento generados por resuspensión de material del fondo durante tormentas.



**Figura 1: Malla de cálculo y batimetría en todo el dominio del Río de la Plata (a) y detalle en la Bahía de Montevideo (b).**

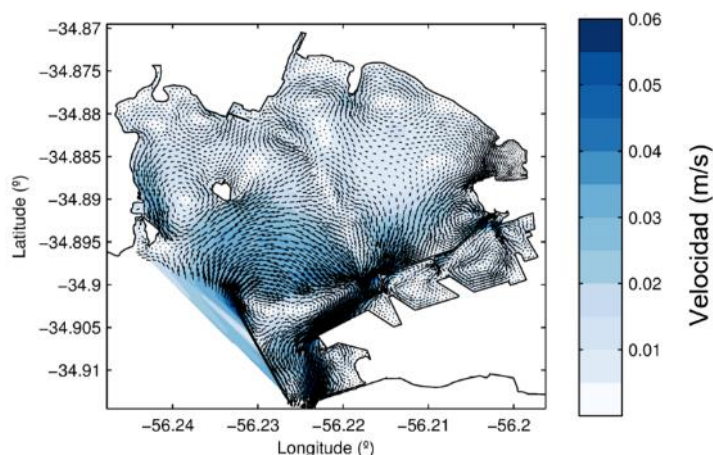
Para caracterizar la hidro-sedimentología de la Bahía se simuló un período de tiempo de un año de manera de incluir tanto eventos de calma dominados por marea astronómica y sin oleaje, como períodos de tormentas de marea meteorológica y fuerte oleaje. Por disponibilidad de condiciones de borde se selecciona el período de tiempo Octubre 2014 a Setiembre 2015. A partir de estos resultados en primer lugar se realiza una caracterización de las corrientes, sedimentos en suspensión y de las tensiones de corte de fondo generadas por oleaje y corrientes.

La metodología aplicada para el estudio de los patrones de circulación se basa en la técnica de Análisis de Componentes Principales (ACP) o también denominada EOF (Empirical Orthogonal Functions). La misma permite identificar en forma objetiva patrones dominantes de circulación, y además brinda información acerca de la intensidad con que dichos patrones están presentes a lo largo del tiempo. Esto último permite vincular dicho patrones con los principales forzantes por ejemplo niveles, viento local, etc. El análisis se realizó en base a campos horarios de corrientes integradas en vertical obtenidas a partir de los resultados del modelo tridimensional baroclínico TELEM3D.

La hidrodinámica en el Río de la Plata muestran una variabilidad influenciada claramente por dos procesos que tienen origen y escalas temporales distintas, la marea astronómica y los eventos de marea meteorológica u ondas de tormenta. Teniendo esto en cuenta es de interés separar el efecto de ambas señales en la circulación en la bahía. Esta separación se puede realizar de varias formas, en este trabajo se utilizó un filtro pasa bajos específico para la remoción de oscilaciones asociadas a la marea astronómica (filtro “120i913” en Thompson (1983)).

## RESULTADOS

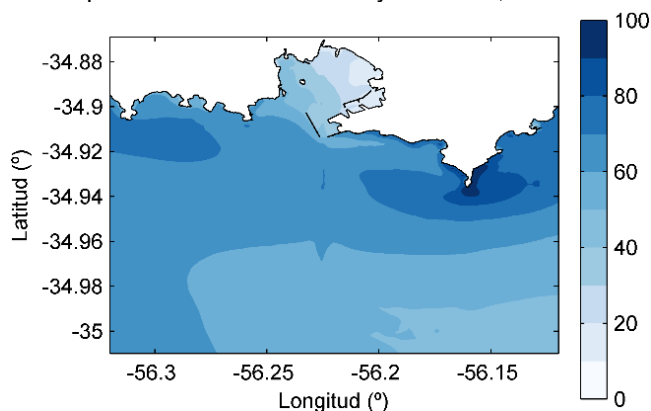
En términos globales se observa una variación en las intensidades de corriente a lo largo de la zona de la Bahía de Montevideo y recinto portuario: en la boca del canal de acceso la intensidad media es de 18 cm/s mientras que en la boca oeste es menor 10 cm/s y disminuye al ingresar en la Bahía a 6-7 cm/s antes del canal La Teja y en el fondo de la Bahía valores de 3-4 cm/s; en el recinto portuario la intensidad media disminuye a valores de 1-2 cm/s. El campo de corrientes promedio en vertical residuales (Figura 2) indica que las zonas de mayor circulación en la Bahía y recinto portuario son las cercanas a las bocas de intercambio con el Río de la Plata. En la zona Central de la Bahía se observa también cierto grado de circulación generado por el Canal La Teja y en el fondo por el pasaje detrás del dique cintura.



**Figura 2: Campos residual de corrientes integradas en vertical del período Oct 2014 – Set 2015.**

La dinámica de sedimentos finos en la zona está dominada por los procesos de erosión de fondo generados por las corrientes de marea y el oleaje. Los valores medios de tensiones inducidas por el oleaje son un orden de magnitud superior a los inducidos por las corrientes y por tanto dominan en las tensiones totales.

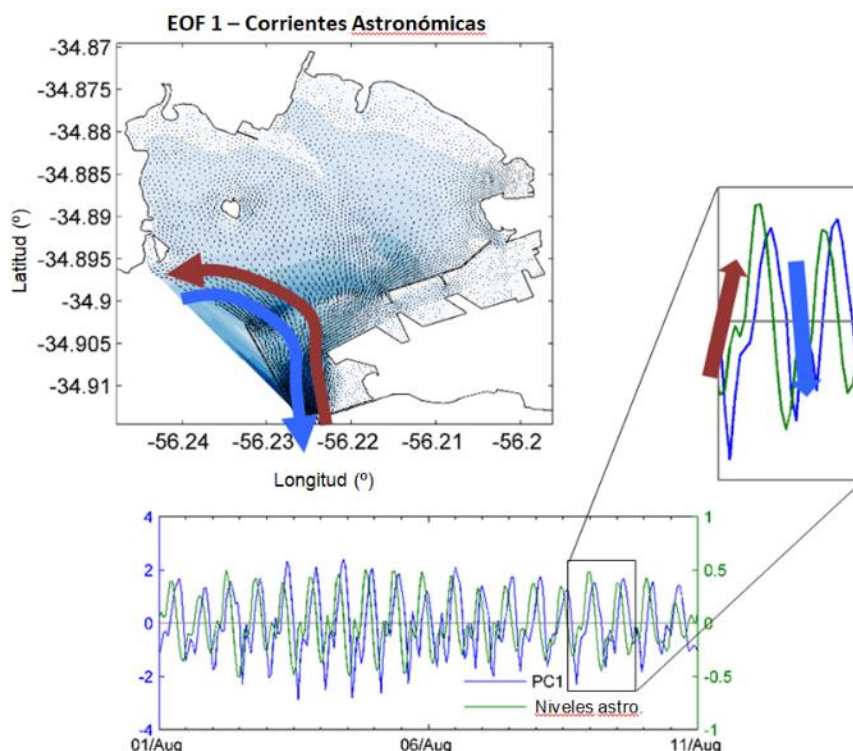
Las distribuciones espaciales del sedimento en suspensión (Figura 3) muestran que en la zona costera de Montevideo existe un valor base de concentración del orden de 10 mg/l mientras que los valores de concentración máxima integrada en vertical son cercanos a 300 mg/l. En la Bahía de Montevideo se obtienen valores de concentración máximos en las bocas de la bahía y decrecientes hacia el interior de la misma. Los valores mínimos durante el período simulado son menores a 5 mg/l en la zona exterior de la bahía y menores a 2 mg/l en la zona interior. Los valores máximos muestran una distribución espacial más uniforme que la observada para los valores medios y mínimos, siendo del orden de 250 mg/l.



**Figura 3: Campos medio de concentración de sedimento en suspensión integrada en la vertical durante el período Oct. 2014 – Set. 2015.**



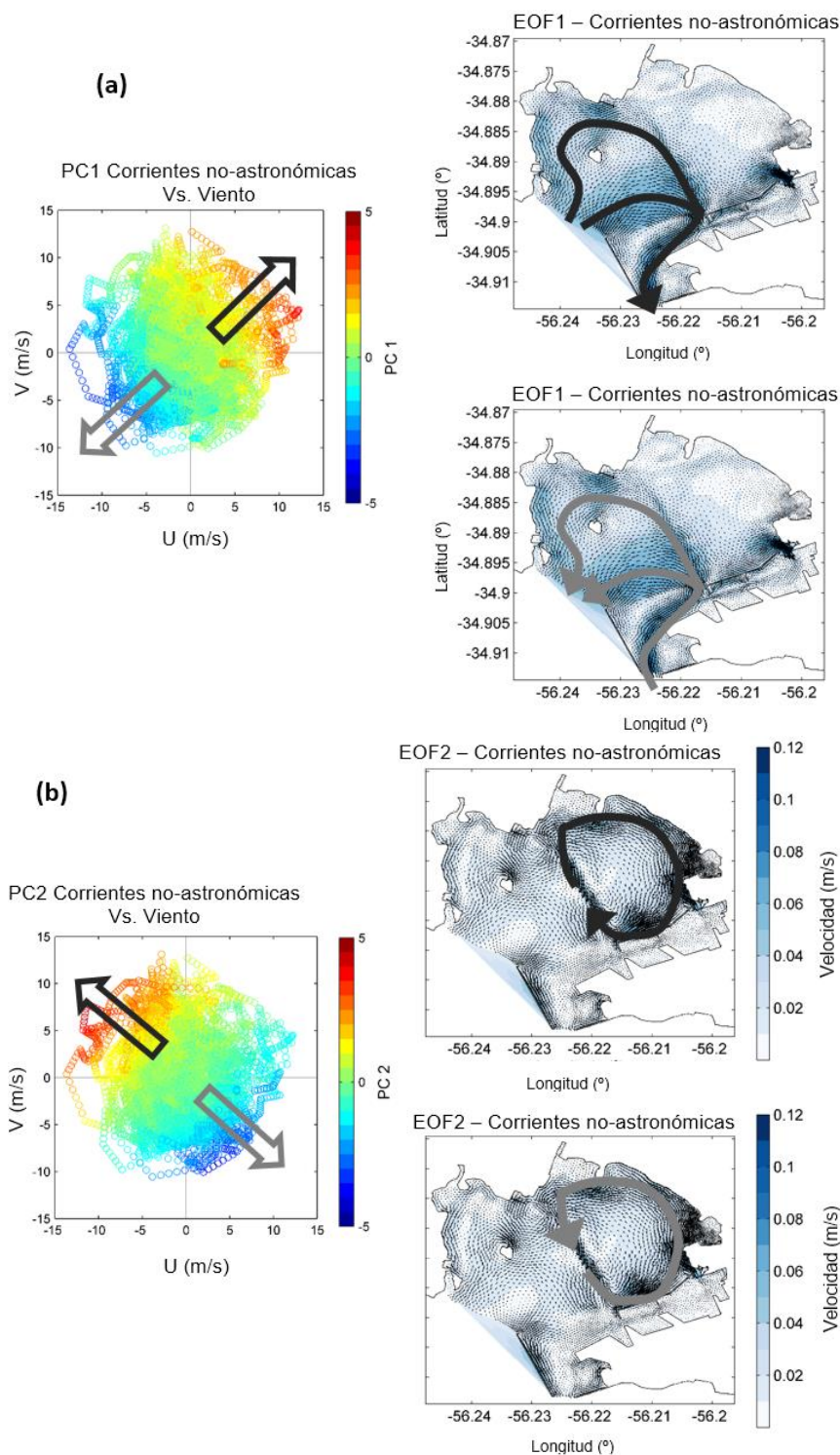
Utilizando la técnica de Análisis de Componentes Principales (EOF por su nombre en inglés) se identificaron patrones principales de flujo para las corrientes astronómicas y para las no-astronómicas (Figuras 4 y 5). La componente astronómica tiene un patrón principal que explica el 63% de la varianza y que muestra un ingreso de agua por la boca del canal de acceso y salida por la boca oeste en la fase ascendente de la marea y en fase descendente de la marea el agua tiende a ingresar por la boca oeste y salir por la boca del canal de acceso (Figura 4). Cerca de la pleamar y bajamar las corrientes son muy pequeñas asociadas a la rotación del flujo.



**Figura 4: Primer EOF del campo de corrientes astronómicas. Se muestra abajo el PC1 durante los primeros diez días de agosto 2015, junto con los niveles astronómicos. Se esquematiza el patrón de circulación y su sentido en relación con la evolución del nivel.**

Para las corrientes no-astronómicas se obtienen dos patrones principales. El primero explica el 61% de la varianza original y muestra un flujo de agua que ingresa a la bahía por la boca del canal de acceso, circula a través del ante-puerto y canal La Teja y sale de la bahía por la boca oeste. Este patrón se correlaciona con condiciones de viento NE mientras que vientos del SW están asociados a un flujo de agua que tiende a ingresar por la boca oeste y salir por la del canal de acceso (Figura 5a). El segundo patrón principal no-astronómico explica el 24% de la varianza original y esencialmente describe cómo es la circulación en la zona interior noreste de la bahía. Este patrón muestra que agua tiende a girar en sentido horario en la zona interior noreste de la bahía para condiciones de viento SE mientras que para condiciones de viento del NW este giro se da en sentido anti-horario (Figura 5b).

Se analizaron los flujos de agua y sedimento a través de las bocas de la Bahía. Se observaron tanto flujos entrantes como salientes a la Bahía. No obstante, se observan eventos de marea meteorológica importantes que duran varios días donde el flujo entra permanentemente por una boca (y sale por la otra), y viceversa. Estas ocasiones coinciden generalmente con los mayores valores de flujo, y por lo tanto son las que generan las corrientes máximas en la Bahía. Asimismo el flujo de sedimento se incrementa sustancialmente durante las tormentas debido a la mayor cantidad de sedimento en suspensión.



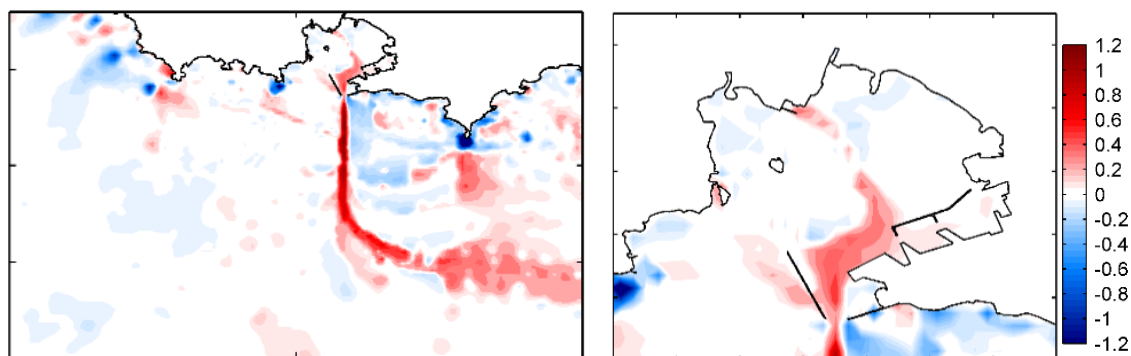
**Figura 5: (a) Nube de puntos de la velocidad del viento cada 6 horas en el período Octubre 2014 – Setiembre 2015 (Reanalysis ERAInterim) en un punto representativo de la Bahía de Montevideo (Izq.). Los colores indican la importancia en cada instante (valor de PC) del patrón espacial de las corrientes no-astronómicas en la bahía que se ve la derecha. (b) Análogo al anterior para el segundo patrón espacial más importante.**

Como se resume en la Tabla 1, cuantitativamente los resultados muestran que 40% del tiempo durante el período simulado se tuvo flujo hacia la bahía a través de la boca oeste y hacia afuera por la boca del canal de acceso (denominando Tipo 1), la condición opuesta flujo hacia la bahía por la boca del canal de acceso y hacia afuera por la boca oeste se dio 26% del tiempo (Tipo 2), durante un 18% del tiempo el agua entró a la bahía por ambas bocas (Tipo 3) y un 16% salió por ambas bocas (Tipo 4). En relación al flujo de sedimento, un 88% del tiempo se tiene un aporte de sedimento hacia dentro de la bahía, y tan solo un 12% hacia fuera. El aporte total (suma de ambas bocas en todas las condiciones de flujo) es de 341 ton hacia dentro de la Bahía. A su vez el neto por la boca oeste indica un ingreso de 358 ton mientras que por la boca del canal de acceso el neto indica una salida de 17 ton.

Flujos de agua (% de tiempo)				
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
	40	26	18	16
Tipo 1	Entra por boca oeste sale por boca de canal de acceso			
Tipo 2	Sale por boca oeste entra por boca del canal de acceso			
Tipo 3	Entra por ambas bocas			
Tipo 4	Sale por ambas bocas			

**Tabla 1: Porcentajes de tiempo durante el período simulado en que se dan las cuatro combinaciones posibles de flujo de agua entre ambas bocas de la Bahía.**

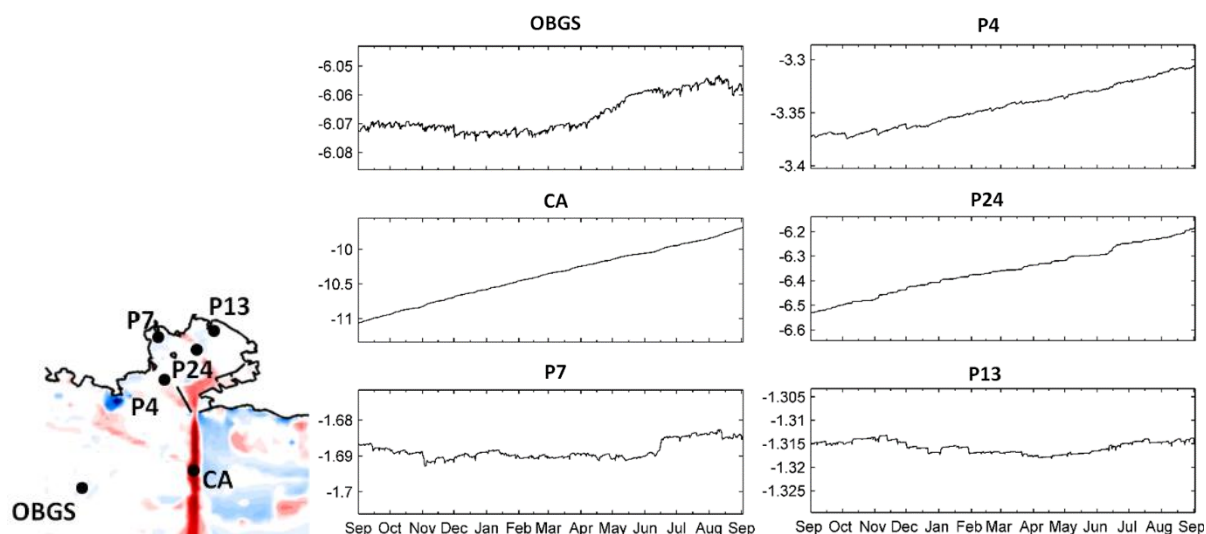
Los resultados del modelo muestran cómo varía el material depositado en el fondo durante el período de un año simulado (Figura 6).



**Figura 6: Evolución del fondo (m) simulada en la zona costera de Montevideo (panel superior) y en la Bahía de Montevideo (panel inferior) durante el período Setiembre 2014 – Octubre 2015.**

En la zona costera el principal cambio es la sedimentación del canal de acceso; en el tramo N-S del canal se tiene una deposición simulada superior a 1.2 m al cabo de un año. Dentro de la Bahía el principal cambio batimétrico es la deposición en el antepuerto y el canal La Teja. En dichas áreas el modelo muestra una deposición del orden de 0.4 m al cabo de un año (Figura 7).

Un análisis de la evolución temporal de la cota del fondo muestra en general procesos de erosión y deposición en la zona exterior de la Bahía (Figura 7). En la zona intermedia y al fondo de la Bahía únicamente hay deposición, teniendo lugar las mayores tasas durante los eventos de tormenta por la mayor cantidad de sedimento en suspensión disponible para sedimentar.



**Figura 7: Series temporales de evolución de la cota del fondo (m) simulada en el período Setiembre 2014 – Octubre 2015 en varias estaciones de la Bahía de Montevideo y el área costera adyacente.**

## CONCLUSIONES

El modelo tridimensional implementado es capaz de reproducir adecuadamente las características principales de la dinámica de sedimentos finos en el estuario y en particular en la zona costera de Montevideo. El mismo permitió realizar un análisis de las corrientes, sedimento en suspensión, y evolución del sedimento del fondo en la costa de Montevideo y en la Bahía y recinto portuario. Además, se ha realizado una caracterización de los patrones de circulación en la Bahía identificando el efecto de los principales forzantes, una cuantificación del flujo de agua y sedimento en las bocas de la Bahía y se han identificado los principales patrones de deposición y erosión de material de fondo.

A escala global del estuario los resultados muestran la importancia de las tensiones inducidas por las corrientes en el valor basal de concentración de sedimento en suspensión, y de las tensiones de oleaje durante los eventos de resuspensión más importantes. Dentro de la bahía el oleaje juega un rol relevante especialmente en la zona oeste la cual está más expuesta al oleaje proveniente de la boca más grande de la bahía. Sin embargo, la advección de sedimento proveniente de la zona costera y las condiciones de circulación son determinantes y pueden por ejemplo cambiar la tendencia de la evolución del fondo para similares condiciones de oleaje.

Esta herramienta permitirá estudiar distintos escenarios futuros para el área de estudio, y abordar la modelación de problemas más complejos como es el estudio de la calidad de agua.

## REFERENCIAS

- Santoro, P., Fossati, M. and Piedra-Cueva, I. (2013). "Study of the meteorological tide in the Río de la Plata". Continental Shelf Research, vol. 60, pp. 51-63.
- Santoro, P., Fossati, M., Tassi, P., Huybrechts, N., Pham Van Bang, D. and Piedra-Cueva, I. (2016). "2D and 3D numerical study of the Montevideo Bay hydrodynamics and fine sediment dynamics", in Proceedings of the XXIII TELEMAC Users Conference, París, Francia.
- Thompson, R.O.R.Y. (1983). Low-Pass Filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies. Journal of Physical Oceanography, 13, 1077-1083. 51, 180