

# VALIDACIÓN SINÓPTICA DE UN MODELO HIDRODINÁMICO DEL RÍO DE LA PLATA MEDIANTE TELEDETECCIÓN DEL FRENTE DE TURBIDEZ

Fernanda Maciel, Pablo Santoro, Ismael Piedra Cueva, Francisco Pedocchi

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.  
fmaciel@fing.edu.uy, psantoro@fing.edu.uy, ismaelp@fing.edu.uy, kiko@fing.edu.uy

## Introducción

El Río de la Plata, localizado entre Uruguay y Argentina, puede dividirse en tres zonas: interior, intermedia y exterior. Las dos últimas pueden ser distinguidas por un límite transversal que une Montevideo con Punta Piedras, a lo largo de la Barra del Indio. Desde ahí hacia el mar se observa un cambio repentino en la batimetría, y los frentes de salinidad y turbidez típicamente se localizan en esta región (Framiñan y Brown, 1996). El estuario recibe 160 millones de toneladas anuales de sedimentos en suspensión de sus principales tributarios. Los sedimentos finos están sujetos a sucesivos ciclos de deposición-resuspensión-advección en las regiones interior e intermedia antes de alcanzar la región del frente, donde interactúan con agua salobre y eventualmente gran parte del material se deposita (Fossati et al, 2014). La dinámica de sedimentos tiene relevancia económica y ambiental, ya que afecta costos de dragado y contaminantes pueden ser transportados adsorbidos a los mismos.

Estudios de la dinámica de sedimentos en el Río de la Plata incluyen campañas de monitoreo, mediciones puntuales continuas, modelación numérica (ej. Fossati et al, 2014) y teledetección (ej. Moreira et al, 2013). Tanto los modelos como la teledetección han utilizado datos de campo para calibración, validación, o para respaldar sus resultados. Sin embargo, no se han encontrado estudios que utilicen imágenes satelitales para validar resultado de modelos numéricos en el río. En este trabajo se propone utilizar imágenes de MODIS-Aqua para evaluar de manera sinóptica el desempeño de un modelo hidro-sedimentológico 3D del Río de la Plata (Santoro, 2017). Para ello se comparan los frentes de turbidez detectados a partir de las imágenes y de los resultados de sólidos suspendidos totales (SST) del modelo.

## Métodos

El modelo numérico fue implementado en TELEMASCARET. La generación y propagación de oleaje es simulada con el módulo TOMAWAC, mientras que el transporte de sedimentos y evolución del fondo se resuelven con el módulo SEDI3D. El dominio incluye el estuario y su plataforma continental con una resolución espacial de aproximadamente 3 km que se afina a 100 m medida que se acerca a la Bahía de Montevideo. La simulación cubre el año 2015 con paso temporal de 1 hora. Fue calibrado y validado con series temporales puntuales de la bahía y zonas cercanas. Información detallada se puede encontrar en Santoro (2017).

La información satelital corresponde a la del sensor MODIS-Aqua en el mismo período que la simulación numérica (año 2015). Se obtuvieron imágenes diarias (nivel 1B) con resolución espacial de aproximadamente 1 km. Luego de descartar las imágenes afectadas por la presencia de nubes, se obtiene un total de 109 imágenes útiles. La información de las mismas es utilizada de una manera cualitativa, similar a la de los trabajos de Framiñan y Brown (1996), y de Nagy et al. (2008). A diferencia de estos estudios previos, donde el frente de turbidez se detecta manualmente, en este trabajo implementamos un algoritmo para detectarlo automáticamente en las imágenes.

El frente de turbidez ocurre a partir de la interacción de agua fresca y turbia de río con agua clara y salina del océano. La

zona de transición presenta típicamente altos gradientes horizontales. Ópticamente se puede detectar la turbidez debido a cambios bruscos de la reflectancia en ciertas longitudes de onda. En este trabajo utilizamos la banda roja (645 nm) para detectar el frente, debido a que está directamente relacionada a la turbidez (Dogliotti et al, 2015). En la Figura 1 se puede observar claramente la alta reflectancia del agua turbia de río en la zona interior e intermedia del estuario, mientras que el agua clara de mar en la zona externa presenta valores despreciables. El frente de turbidez puede ser pensado como el nivel de reflectancia que “mejor” separe estas dos regiones. En este trabajo se seleccionó el método de Otsu (1979) para segmentar la imagen. Es un método de umbralización global basado en el histograma de intensidad de la imagen. La idea es que existen dos clases (agua turbia y agua clara) que son distintas con respecto a los valores de intensidad de sus píxeles (es decir, su reflectancia). El método es óptimo en el sentido de que maximiza la varianza entre clases, que se define como:

$$\sigma_B^2 = P_1(k)(m_1(k) - m_G)^2 + P_2(k)(m_2(k) - m_G)^2, \quad [1]$$

donde  $k$  es el nivel del umbral,  $P_1(k)$  y  $P_2(k)$  son las probabilidades de que un píxel sea asignado a la clase 1 o 2 respectivamente,  $m_1(k)$  y  $m_2(k)$  son las intensidades medias de los píxeles asignados a las clases 1 y 2 respectivamente, y  $m_G$  es la intensidad promedio de toda la imagen o media global. Dado un valor de  $k$ ,  $P_1$  se calcula como el número de píxeles con intensidades menores a  $k$  dividido el número total de píxeles, y  $P_2 = 1 - P_1$ . La varianza entre clases es una medida de separabilidad, cuanto más alejadas estén las medias  $m_1$  y  $m_2$ , mayor es  $\sigma_B^2$ . La ecuación [1] es evaluada para diferentes valores de  $k$ , seleccionando el que resulta en un mayor  $\sigma_B^2$ . Esto se realiza para cada imagen, dividiendo su rango de intensidades en 200 intervalos discretos (solamente se consideran los píxeles de agua). Una vez segmentada la imagen en dos regiones, el frente es detectado como el borde entre las mismas. Para ello primero se suaviza la imagen con un filtro de mediana de 3x3 píxeles, y el borde se encuentra mediante la resta de la imagen segmentada original y la suavizada.

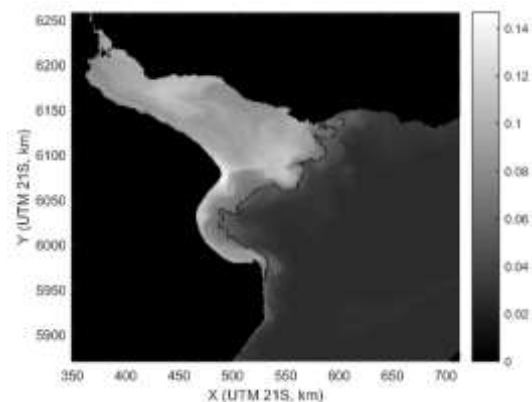


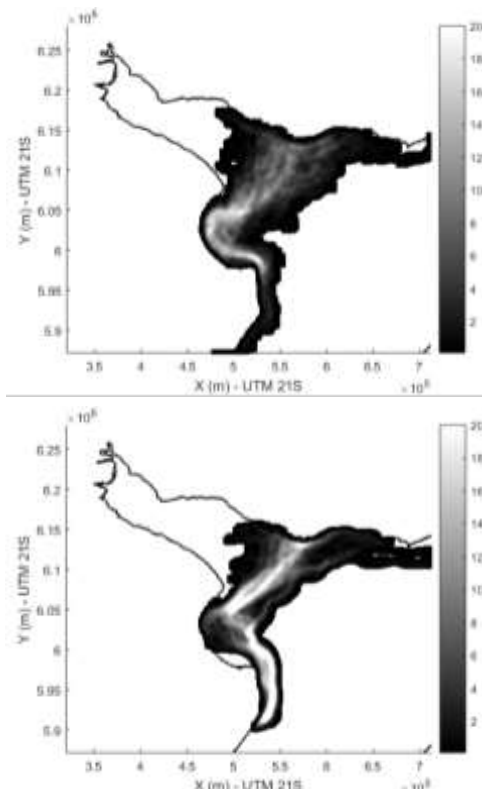
Figura 1.- Reflectancia en la banda roja (645 nm) de MODIS-Aqua en el Río de la Plata (25 de diciembre de 2015). Se indica el frente de turbidez detectado con el algoritmo descrito en el texto.

El mismo algoritmo es también aplicado a los resultados de SST del modelo numérico. Éstos son primeramente interpolados a una grilla regular de 1x1 km, y la intensidad de cada píxel está dada por la concentración de sedimentos en suspensión

calculada por el modelo. El modelo divide la columna de agua en 15 capas de igual profundidad para los cálculos numéricos. Se consideran solamente las 4 capas más superficiales para detectar el frente, considerando que las concentraciones cercanas al fondo probablemente no son detectadas en las imágenes satelitales.

## Resultados

Se compara la distribución del frente obtenida mediante las imágenes satelitales y los resultados del modelo durante el período de estudio, como se muestra en la Figura 2. Allí se observa que la distribución del frente detectada a partir de MODIS-Aqua muestra una mayor dispersión que en la modelación numérica. Sin embargo ambas coinciden en que la posición más frecuente del frente coincide aproximadamente con la ubicación de la Barra del Indio, al igual que lo concluido por Framiñan y Brown (1996). Los resultados son más similares en la costa uruguaya (norte) que en la argentina (sur). Ambos resultados presentan unos pocos casos donde el frente alcanza el Océano Atlántico a lo largo de la costa norte, y otros donde penetra a la región intermedia del estuario. Las imágenes satelitales muestran mayor ocurrencia de esta última situación, donde el frente alcanza posiciones más al oeste que en las simulaciones del modelo. Por otro lado, los resultados son relativamente distintos a lo largo de la costa sur. Los datos satelitales muestran mayor ocurrencia del frente en la Bahía de Sanborombón, siguiendo la forma de la costa, mientras que en el modelo la bahía presenta generalmente altas concentraciones de sedimentos en suspensión, y por lo tanto el frente se ubica más lejos de la costa, rodeando la bahía.



**Figura 2.-** Distribución del frente de turbidez detectado a partir de MODIS-Aqua (panel superior) y de los resultados de la modelación numérica en TELEMAC (panel inferior). Los valores indican la frecuencia de ocurrencia en % del tiempo.

Debido a que la Bahía de Montevideo es el foco del modelo, es de interés conocer el desempeño temporal del mismo en esta zona. Para ello se calcula la distancia de ambos frentes de turbidez (de MODIS-Aqua y del modelo numérico) a la Bahía

de Montevideo, en la dirección este-oeste y en instantes de tiempo coincidentes. Ambas series de tiempo presentan una correlación de 0,6 y si consideramos solamente la dirección (W u O), coinciden un 70% de las veces (de 103 casos).

Finalmente se calcula el área entre ambos frentes de turbidez en instante de tiempo coincidentes. No se considera la Bahía de Sanborombón debido a que allí el modelo no tiene un buen comportamiento, e incorpora ruido a la comparación. Se obtiene que el área promedio entre frentes es de 1900 km<sup>2</sup>, con una desviación estándar de 1100 km<sup>2</sup>. Comparando el signo del área se observa que presenta relación con el caudal de los principales tributarios del Río de la Plata (ríos Paraná y Uruguay). Cuando el caudal es bajo el frente del modelo se encuentra más hacia el mar que el de las imágenes satelitales, y lo contrario sucede cuando el caudal es alto.

## Conclusiones

Se detectó exitosamente el frente de turbidez a partir de imágenes satelitales de MODIS-Aqua del año 2015, mediante la implementación de un algoritmo basado en el método de Otsu (1979). El mismo algoritmo se aplicó a resultados de SST de un modelo hidro-sedimentológico del Río de la Plata (Santoro, 2017), con el objetivo de realizar una validación sinóptica del mismo. Comparando ambos resultados se observa una distribución similar de la posición del frente, aunque los resultados obtenidos a partir de la modelación presentan menor variabilidad que los de MODIS-Aqua. La ubicación predominante del frente de turbidez coincide aproximadamente con la Barra del Indio, presentando mayor variación en la costa uruguaya. El modelo presenta mejor desempeño en la costa norte que en la sur. Particularmente, su desempeño es pobre en la Bahía de Sanborombón. Esto puede deberse a que el foco del modelo es la Bahía de Montevideo. Allí posee una grilla más fina, y mayor cantidad de datos de campo de dicha zona se utilizaron en la calibración. El desempeño temporal del modelo es también evaluado, como se mencionó en la Sección Resultados. Ésta se ampliará en el artículo completo.

## Referencias Bibliográficas

- Dogliotti, A.I., K.G. Ruddick, B. Nechad, D. Doxaran y E. Knaeps (2015). "A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 156, pp. 157-168.
- Fossati, M., P. Santoro, R. Mosquera, C. Martínez, F. Ghiardo, P. Ezzatti, F. Pedocchi, e I. Piedra Cueva (2014b). "Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata." *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, Vol. 1, pp. 48-63.
- Framiñan, M.B. y O.B. Brown (1996). "Study of the Río de la Plata turbidity front, Part I: spatial and temporal distribution." *Continental Shelf Research*, Vol. 16, No. 10, pp. 1259-1282.
- Moreira, D., C.G. Simionato, F. Gohin, F. Cayocca y M.L.C. Tejedor (2013). "Suspended matter mean distribution and seasonal cycle in the Río de La Plata estuary and the adjacent shelf from ocean color satellite (MODIS) and in-situ observations." *Continental Shelf Research*, Vol. 68, pp. 51-66.
- Nagy, G.J., D.N. Severov, V.A. Pshennikov, M. De los Santos, J.J. Lagomarsino, K. Sansa y E.G. Morozov (2008). "Río de la Plata estuarine system: Relationship between river flow and frontal variability." *Advances in Space Research*, Vol. 41, pp. 1876-1881.
- Otsu, N. (1979). "A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 9, No. 1, pp. 62-66.
- Santoro, P. (2017). "Modelación numérica de la hidrodinámica y dinámica de sedimentos finos en la Bahía de Montevideo". Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, 2017, 325pp.