

# PRONÓSTICO RESTROSPECTIVO (HINDCAST) DE NIVEL DE MAR EN LA COSTA DE URUGUAY

Michelle Jackson, Pablo Santoro, Sebastián Solari, Mónica Fossati

Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFIA. J. Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay  
[mjackson@fing.edu.uy](mailto:mjackson@fing.edu.uy), [psantoro@fing.edu.uy](mailto:psantoro@fing.edu.uy), [ssolari@fing.edu.uy](mailto:ssolari@fing.edu.uy), [mfossati@fing.edu.uy](mailto:mfossati@fing.edu.uy)

## Introducción

En el marco de un proyecto de escala nacional para evaluar los efectos del cambio climático sobre los riesgos de erosión e inundación en la costa Uruguaya, surge la necesidad de disponer de una base de datos de nivel de mar que cubra toda la costa de Uruguay, que sea homogénea, de alta resolución temporal y espacial y de larga duración.

La costa Uruguaya transcurre a lo largo del margen izquierdo del estuario del Río de la Plata y parte del Océano Atlántico Sur. Mientras que la modelación numérica del nivel de mar en el Océano Atlántico no presenta mayores dificultades, el Río de la Plata presenta ciertas características que vuelven dicha tarea más compleja. Existe una clara diferencia en el comportamiento de la zona interior-intermedia del estuario y la zona exterior, la cual se define a partir de la denominada “zona del frente”, donde coincide la gran expansión de la sección con un aumento de profundidad. La hidrodinámica del Río de la Plata, además de estar controlada por los forzantes locales (atmosféricos, caudales erogados por sus afluentes), depende fuertemente de la marea astronómica y meteorológica que ingresa desde el Océano Atlántico, en particular de las ondas que se propagan desde la plataforma continental Argentina (Santoro et al., 2013). Si bien existe vasta experiencia en la modelación numérica del nivel de mar y las corrientes en la costa Uruguaya (Piedra Cueva et al 2007; Fossati et al, 2013; Santoro et al., 2013), hasta la fecha no se ha implementado un pronóstico retrospectivo de nivel de mar a partir de dichos modelos.

El objetivo de este trabajo es obtener y analizar un pronóstico retrospectivo (*hindcast*) de alta resolución en la costa Uruguaya de la variable nivel de mar total, que tenga al menos 30 años de duración.

## Metodología

Se utiliza el modelo numérico TELEMAR-MASCARET (Hervouet, 2007), el cual cuenta con módulos hidrodinámicos tanto bidimensional como tridimensional baroclínico (TELEMAR2D, TELEMAR3D). Para este caso se utilizó la versión 2D, debido a que el dominio de modelación presenta bajas profundidades y a que no es de particular interés modelar la estratificación del flujo. La discretización utilizada por el modelo es de elementos finitos.

El modelo se implementó en el dominio que se muestra en la figura 1. Dicho dominio comprende la zona delimitada entre Mar del Plata (Argentina) y Río Grande (Brasil), incluyendo la zona de la desembocadura de los ríos Uruguay y Paraná y extendiéndose aproximadamente unos 170 kilómetros hacia la plataforma continental.

Se consideraron los principales forzantes del sistema: aportes fluviales, ondas de marea astronómica y meteorológica, viento y presión atmosférica. Los aportes fluviales considerados corresponden a los ríos Paraná, Uruguay y Santa Lucía, así como los arroyos Miguelete y Pantanoso. El período de simulación está determinado por la disponibilidad de datos de caudal, teniendo registros desde 1985. En la frontera oceánica se imponen niveles simulados por un modelo hidrodinámico de circulación regional (Martínez et al, 2015). Como paso previo, esta condición de contorno es corregida por cuantiles utilizando para ello datos medidos en Mar del Plata. Esta corrección disminuye el error medio cuadrático (RMSE) de los niveles en aproximadamente

1,5 cm. Los forzantes atmosféricos se consideran imponiendo en la superficie libre campos de viento y presión obtenidos del reanálisis de NCEP-CFSR (Saha et.al., 2010).

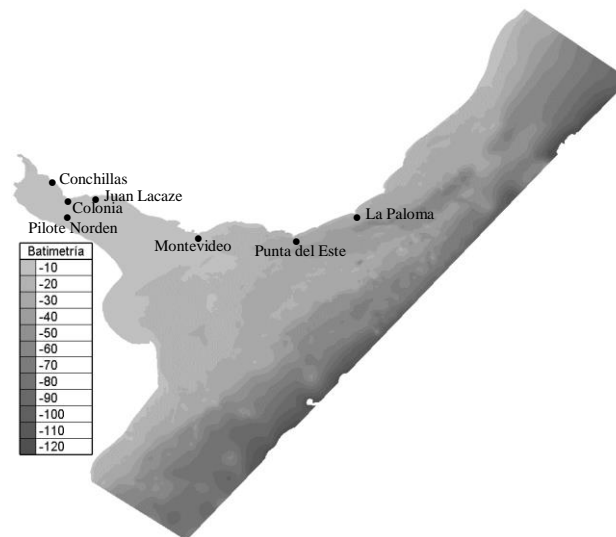


Figura 1- Dominio de cálculo y batimetría (en m) del modelo utilizado

El modelo se calibra con datos medidos en diferentes puntos del Río de la Plata y la costa atlántica. En la calibración se utiliza una estación en la zona interior del Río de la Plata (Colonia), una en la zona intermedia (Montevideo) y una en la zona exterior o frente marítimo (La Paloma), de forma de representar correctamente las tres zonas analizadas. Por otra parte se buscaron años con pocos datos faltantes y ocurrencia de eventos severos o extremos por encima de lo habitual, seleccionándose los años 2002, 2003 y 2004 para la calibración.

La calibración del modelo se realizó en función de 2 parámetros: el número de Manning ( $n$ ) y el coeficiente de arrastre del viento ( $C_D$ ). Para este último se evaluaron las alternativas de  $C_D$  constante, caso en el cual se calibra directamente el valor del parámetro, y  $C_D$  variable (función de la velocidad de viento), caso en el cual se calibra un parámetro de escala que mayor (o menor) el valor de  $C_D$  no uniforme obtenido a partir de la formulación de Flather (Flather, 1976). La validación del modelo se realiza comparando los datos disponibles en los restantes años e incluyendo también los datos disponibles en otras estaciones.

Por último, una vez realizado el *hindcast*, se comparan los regímenes medio y extremal obtenidos del mismo con los obtenidos a partir de los datos medidos.

## Información de niveles disponible

Se cuenta con niveles medidos en los diferentes puntos del dominio que se muestran en la figura 1. Estos niveles fueron medidos por distintas instituciones y en general las series presentan diversas frecuencias de muestreo, duración y cantidad de datos faltantes.

## Calibración

La calibración del modelo se realiza variando entre tres configuraciones: número de Manning constante en todo el dominio y coeficiente de arrastre del viento constante, número de Manning constante en todo el dominio y coeficiente de arrastre

del viento variable y número de Manning variable en el dominio, variando según zona interior, intermedia y exterior del Río de la Plata, y coeficiente de arrastre del viento variable con coeficiente de mayoración igual a 1.

La calidad de cada simulación se evalúa mediante el RMSE, el sesgo, gráficos de dispersión y gráficos cuantil-cuantil de todos los datos. Además se compara la distribución de los Picos de Tormenta medidos y modelados mediante gráficos cuantil-cuantil.

Se realizan simulaciones variando el número de Manning desde 0.007 hasta 0.02, el coeficiente de arrastre constante desde  $7.5 \cdot 10^{-7}$  hasta  $4 \cdot 10^{-6}$  y factor de escala para el coeficiente de arrastre variable entre 0.85 y 1.3. Se determina que los mejores resultados se obtienen para el caso de número de Manning variable en el dominio y coeficiente de arrastre del viento variable.

En la tabla 1 se muestran los resultados del RMSE y el sesgo para las estaciones evaluadas con la configuración seleccionada en el periodo de calibración. Se observa que el mayor sesgo se tiene para Montevideo donde no llega a alcanzar los 10 cm. En La Paloma es donde se da el menor RMSE siendo este de 18 cm, mientras que en las estaciones de Montevideo y Colonia llega a los 23 cm.

**Tabla 1-** Valores de RMSE (m) y BIAS (m) con la configuración seleccionada para el período de calibración

Estación	BIAS (m)	RMSE (m)
La Paloma	0.00	0.18
Montevideo	0.09	0.23
Colonia	0.01	0.23

## Validación

El modelo se valida con todos los datos medidos disponibles excepto los datos correspondientes a los 3 años utilizados para la calibración. En la figura 2 se muestran en el panel izquierdo los gráficos de dispersión de las tres estaciones de calibración, y en el panel derecho los gráficos cuantil-cuantil de los extremos (picos de las tormentas).

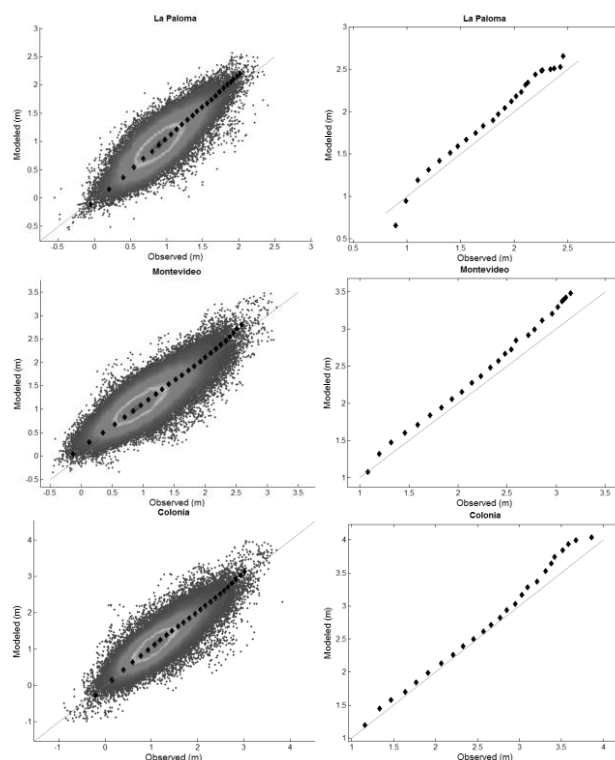
En general se observa que ninguno de los RMSE aumenta más que 3 cm respecto a la calibración, al igual que el BIAS. Por otra parte, en los gráficos cuantil-cuantil de los extremos se observa que el modelo sobrestima por alrededor de 30 cm los cuantiles más altos.

## Análisis de resultados

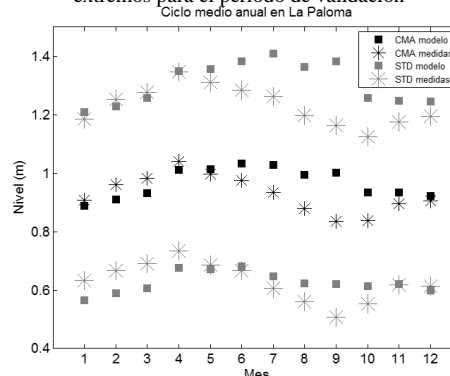
A modo de ejemplo, la figura 3 muestra, para la estación de La Paloma, el ciclo medio anual de la media mensual  $\pm$  la desviación estándar media mensual del nivel de mar total. Se observa que el modelo representa bien el ciclo medio anual desde enero hasta abril, pero no logra representar correctamente el descenso del nivel medio que se da en el resto del ciclo hasta setiembre.

## Conclusiones

A partir de la calibración del modelo TELEMAC 2D para un dominio que abarca toda la costa uruguaya, se obtiene un hindcast de nivel de mar de 31 años (1985-2016). El mismo se calibra con las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia, y no supera tanto los 26 cm de RMSE como los 12 cm de BIAS en ninguna de las estaciones. La representación de los niveles extremos por parte del modelo se muestra satisfactoria, sobrestimando los eventos por aproximadamente 30 cm. Por otra parte al comparar el régimen medio obtenido a partir del hindcast con el obtenido de los datos medidos se encuentran ciertas diferencias que motivan, como nueva línea de trabajo, el análisis del origen de las mismas.



**Figura 2-** Gráficos de dispersión y gráficos cuantil-cuantil de los extremos para el período de validación



**Figura 3-** Ciclo medio anual de los datos medidos y modelados, más y menos sus respectivas desviaciones estándar

## Referencias Bibliográficas

- Flather R.A.** (1976). Results from surge prediction model of the North-West European continental shelf for April, November and December 1973. Institute of Oceanography, UK. Report n° 24.
- Fossati M, and Piedra Cueva I.** (2013). A 3D hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone. *Applied Mathematical Modelling* 37, 1310-1332.
- Hervouet, J.M.** (2007). *Hydrodynamics of Free Surface Flows*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Martínez, Silva, Dufrechou, Santoro, Fossati, Ezzati & Piedra-Cueva** (2015). Towards a 3D Hydrodynamic numerical modeling system for long term simulations of the Río de la Plata dynamic. *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, The Hague, the Netherlands.
- Piedra Cueva I, and Fossati M.** (2007). Residual currents and corridor flow in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling* 31 (2007), 564-577.
- Saha, S. and co-authors** (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 91:8, 1015-1057.
- Santoro P, Fossati M, and Piedra-Cueva I.** (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*, 60, 51-63.