



Pronóstico retrospectivo (hindcast) de nivel de mar en la costa de Uruguay

Michelle Jackson ^a, Pablo Santoro ^b, Sebastián Solari ^c, Mónica Fossati ^d

^a *Facultad de Ingeniería, IMFIA, Uruguay, mjackson@fing.edu.uy.*

^b *Facultad de Ingeniería, IMFIA, Uruguay, psantoro@fing.edu.uy.*

^c *Facultad de Ingeniería, IMFIA, Uruguay, ssolari@fing.edu.uy.*

^d *Facultad de Ingeniería, IMFIA, Uruguay, mfossati@fing.edu.uy.*

RESUMEN: El presente trabajo muestra la implementación de un modelo hidrodinámico en el Río de la Plata, para obtener series de nivel homogéneas, de alta resolución temporal y espacial y de larga duración. Como resultado se obtienen 31 años de nivel en un dominio que abarca al Río de la Plata desde su zona interior hasta el frente marítimo. El modelo se calibra y valida con mediciones en estaciones de nivel disponibles en zonas con diferentes dinámicas de forma de tener una evaluación certera del comportamiento del modelo en todos los puntos del dominio. El modelo se evalúa en términos medios y también se evalúa la representación de los picos de tormenta mediante gráficos cuantil-cuantil. Se obtiene un hindcast que no supera los 26 cm de rmse ni los 12 cm de sesgo en ninguna de las estaciones de validación, mientras que los picos de tormenta presentan diferencias de 30 cm en los peores casos.

PALABRAS CLAVE: Río de la Plata, hindcast de nivel, marea meteorológica, marea astronómica, modelo hidrodinámico.

1 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.

2 METODOLOGÍA

Se implementó un modelo hidrodinámico para el Río de la Plata, el cual fue calibrado y validado en base a información de niveles medidos en diversas estaciones de la costa Uruguaya. Se utiliza el modelo numérico TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007), el cual cuenta con módulos hidrodinámicos tanto bidimensional como tridimensional baroclínico (TELEMAC2D, TELEMAC3D). Para este caso se utilizó la versión 2D ya 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 (izquierda). 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. Los elementos triangulares alcanzan los 7 km de lado en la frontera oceánica hasta 1 km en la costa uruguaya.

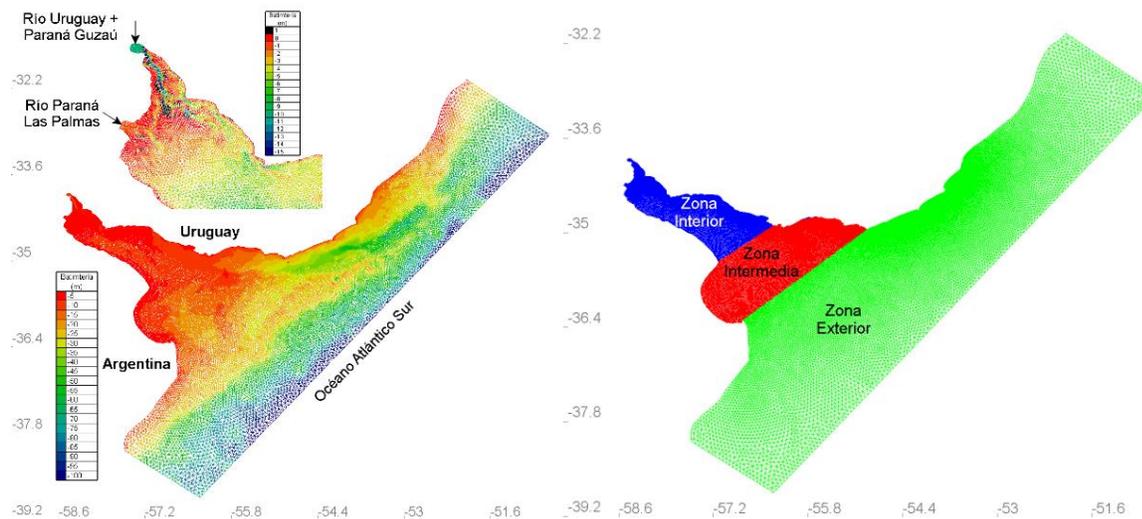


Figura 1-Malla de cálculo y batimetría (izquierda). Zonificación del dominio para el cálculo de la fricción de fondo (derecha).

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).

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 (CD). Para este último se evaluaron las alternativas de CD constante, caso en el cual se calibra directamente el valor del parámetro, y CD variable (función de la

velocidad de viento), caso en el cual se calibra un parámetro de escala que mayor (o menor) el valor de CD 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.

3 INFORMACION DE NIVELES DISPONIBLE

Se tienen datos de nivel medidos en varias estaciones del Río de la Plata provenientes de diferentes instituciones. En la figura 2 se muestra la ubicación geográfica de cada una de estas estaciones. La mayor parte de la información utilizada fue recopilada durante varios años por el IMFIA y suministrada por diversos organismos e instituciones tanto uruguayas como argentinas. En general las series presentan diversas frecuencias de muestreo, duración y cantidad de datos faltantes. Las frecuencias de medición van desde cinco minutales hasta diarias.

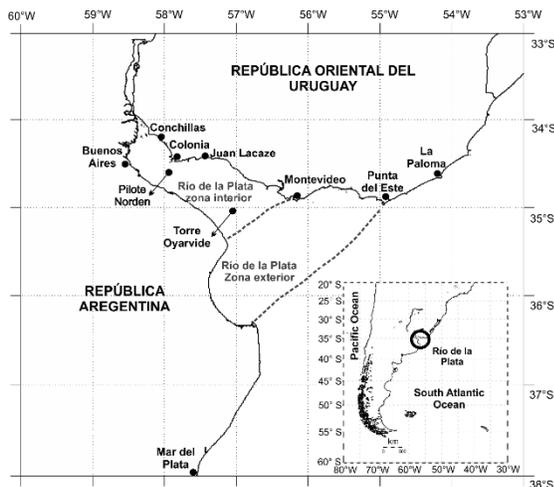


Figura 2-Estaciones de medición de niveles utilizadas en este trabajo.

4 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.

En el caso de la tercera configuración, se evaluaron distintas alternativas de zonificación, se presentan aquí los resultados correspondientes a una división del dominio en tres zonas (exterior, intermedia e interior) según se muestra en la figura 1 (derecha).

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

arrastré 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 3 se muestran los resultados del RMSE y el sesgo para las estaciones evaluadas con la configuración seleccionada en el período 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.

Table 3- 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

En la figura 4 se muestran los gráficos de dispersión, gráficos cuantil-cuantil de todas las medidas y gráficos cuantil-cuantil de los extremos, para la estación de La Paloma y los datos de calibración con la configuración finalmente seleccionada. Se encuentra una muy buena representación de los cuantiles totales, apenas rotado respecto a la recta de 45° . Respecto a los cuantiles de los valores extremos se observa que el modelo apenas sobrestima los valores a no ser por la cola superior donde llega a subestimarlos. En términos generales se observa unas muy buenas representaciones de las medidas incluidos los extremos.

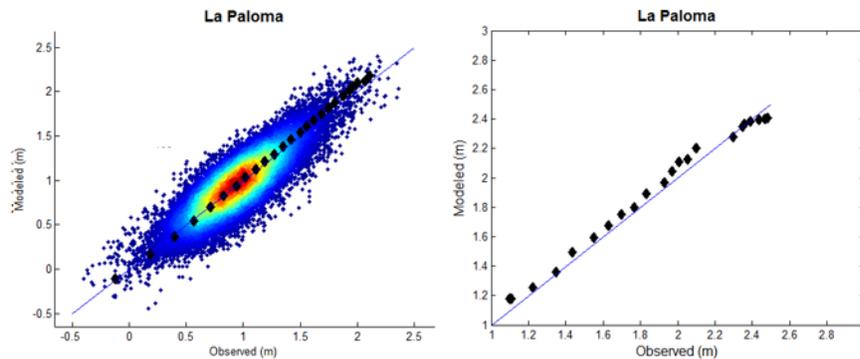


Figure 4- Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en la estación de La Paloma.

5 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 5 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 la tabla 4 se muestran los valores de bias y rmse para todas las estaciones de validación.

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. Por otra parte, en ninguna de las estaciones se superan los 26 cm de rmse y en Montevideo es donde se tiene el mayor bias, alcanzando los 12 cm.

Table 4- Valores de RMSE (m) y BIAS (m) con la configuración seleccionada para el período de validación

Estación	BIAS (m)	RMSE (m)
La Paloma	0.04	0.20
Montevideo	0.12	0.26
Colonia	0.04	0.26
Punta del Este	0.09	0.21
Juan Lacaze	0.08	0.26
Pilote Norden	0.03	0.26

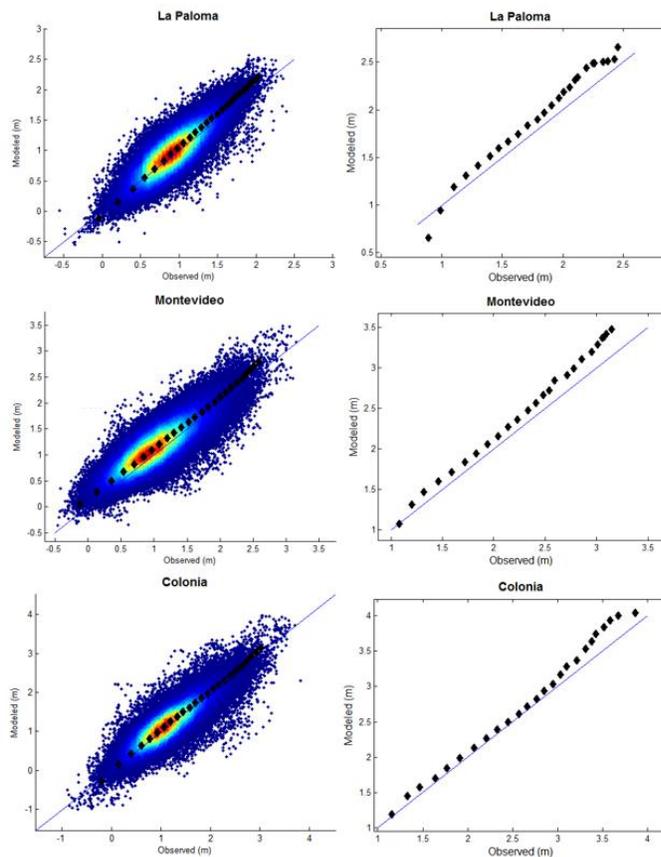


Figure 5- Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en estaciones de calibración.

6 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. Como posibles aplicaciones del hindcast obtenido se tienen

proyectos relacionados al cambio climático, su utilización como forzante en modelos de oleaje, análisis de niveles en toda la costa uruguaya, resolución de problemas de ingeniería costera en zonas con escasos datos de nivel de mar, entre otros.

7 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.