

# EVALUACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL PRONÓSTICO DE NIVEL DEL RÍO DE LA PLATA Y FRENTE MARÍTIMO

Daniel Balparda<sup>1</sup>, Lucas Sellanes<sup>1</sup>, Diego Silva<sup>2</sup>, Michelle Jackson<sup>1</sup>, Pablo Ezzatti<sup>2</sup>,  
Mónica Fossati<sup>1</sup>

(1) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA), Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay  
(2) Instituto de Computación (INCO), Facultad de Ingeniería Universidad de la República, Uruguay

[dbalparda@fing.edu.uy](mailto:dbalparda@fing.edu.uy), [lsellanes@fing.edu.uy](mailto:lsellanes@fing.edu.uy), [diegos@fing.edu.uy](mailto:diegos@fing.edu.uy), [mjackson@fing.edu.uy](mailto:mjackson@fing.edu.uy), [pezzati@fing.edu.uy](mailto:pezzati@fing.edu.uy), [mfossati@fing.edu.uy](mailto:mfossati@fing.edu.uy)

## Introducción

Siendo uno de los estuarios con mayor superficie del planeta, el Río de la Plata es un cuerpo de agua que recibe la descarga de la segunda cuenca más grande de Sudamérica, con un aporte de caudal de aproximadamente 25.000m<sup>3</sup>/s. Está ubicado sobre la costa atlántica de América del Sur, al este de la República Argentina y al sur de la República Oriental del Uruguay (Figura 1). Su importancia para ambos países, tanto social como económica y su compleja dinámica con gran influencia de marea meteorológica (Santoro et al, 2013) ha impulsado su estudio en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) a lo largo de los últimos años.

Desde el año 2006 hasta la actualidad, se encuentra en desarrollo un modelo de pronóstico de niveles de mar para las aguas territoriales del Río de la Plata y su Frente Marítimo. El objetivo principal de su desarrollo es contar con un sistema operacional que prediga corrientes y mareas en tiempo real. Dicho sistema tiene la posibilidad de vincularse con la actividad portuaria, sirviendo como apoyo para la navegación, la toma de decisiones de gestión y control del tráfico marítimo, eventuales derrames producidos por embarcaciones o vertidos de sustancias contaminantes, obras de ingeniería marítima e incluso búsqueda y rescate de personas y/o materiales en accidentes marítimos (Ballesteros, 2021).

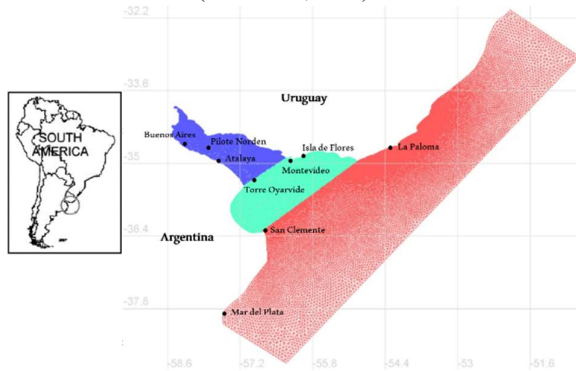


Figura 1.- Panel izquierdo: ubicación del Río de la Plata.

Panel derecho: ubicación de los mareógrafos existentes y clasificación zonal del dominio del modelo: zona interior (azul), zona media (verde) y zona exterior (rojo).

## Descripción del sistema actual

El primer prototipo del pronóstico toma como base la implementación (dominio, malla de cálculo y parámetros) del modelo numérico hidrodinámico TELEMAR-MASCARET en su versión bidimensional TELEMAR2D (Hervouet, 2007), realizada para el desarrollo de un hindcast de niveles de mar para el Río de la Plata y costa uruguaya (Jackson et al., 2018). Para el pronóstico se cambian las condiciones de borde en relación a las utilizadas en el hindcast. El modelo numérico utiliza como condición de borde en la frontera oceánica el pronóstico de mareas emitido en tiempo real por el modelo global RTOFS-HYOM de NOAA-NCEP que se adiciona a los niveles de marea astronómica del atlas FES2014 (Lyard et al,

2021). Como forzante meteorológico en todo el dominio se utiliza el pronóstico de vientos a 10 m y presión atmosférica del GFS de NOAA. Para el prototipo utilizado actualmente el aporte fluvial de los ríos afluentes (Río Uruguay, Paraná Guazú, Paraná Las Palmas) se considera constante con valores medios históricos que totalizan 25.000m<sup>3</sup>/s.

Para evaluar el pronóstico se cuenta con las mediciones horarias de nivel (disponibles en tiempo real) en diversas estaciones provistas por el Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina (SHN) y la Administración Nacional de Puertos de Uruguay (ANP). La ubicación de las estaciones donde se cuenta con datos se presenta en la Figura 1.

El pronóstico disponible en la actualidad se ejecuta diariamente y tiene un horizonte temporal de 3 días. La condición inicial de cada simulación corresponde al instante de 24 horas del pronóstico del día anterior. Tras su ejecución, los niveles obtenidos en el pronóstico se publican en la web <https://www.fing.edu.uy/imfia/pronostico-marea/>. El pronóstico es evaluado comparando los resultados con los datos de nivel medidos para analizar la calidad del mismo. Los resultados obtenidos también se publican en la web.

## Objetivo

El objetivo de este trabajo es definir un sistema de evaluación de la calidad del pronóstico generado y realizar un ajuste de los parámetros del modelo hidrodinámico del prototipo de pronóstico. Para esto, se realizan una serie de simulaciones modificando los parámetros del modelo que intervienen en la tensión de corte de fondo y tensión de corte del viento en la superficie libre. Se utilizan los datos de niveles medidos en mareógrafos para evaluar los resultados. La evaluación se realiza analizando el régimen medio y los eventos extremos de niveles máximos y mínimos.

## Calibración del modelo

Se toman como parámetros de calibración el número de Manning ( $n$ ) y el coeficiente de arrastre del viento ( $C_D$ ). Para  $n$  se considera uniforme en todo el dominio o variable según las zonas presentadas en la Figura 1. Para el caso del  $C_D$  se analizan las alternativas de  $C_D$  constante y el caso de  $C_D$  variable según la velocidad del viento, donde se considera un coeficiente de mayoración a partir de la formulación de Flather (Flather, 1976).

Tabla 1.- Configuraciones de evaluación

Config.	$n_{INT}$	$n_{MED}$	$n_{EXT}$	$C_D$
1	0,009	0,010	0,015	$C_{FLA}=1$
2	0,009	0,009	0,015	$C_{FLA}=1$
3	0,009	0,015	0,015	$C_{FLA}=1$
4	0,007	0,015	0,015	$C_{FLA}=1$
5	0,007	0,0125	0,015	$C_{FLA}=1$
6	0,007	0,0175	0,015	$C_{FLA}=1$
7	0,007	0,010	0,015	$C_{FLA}=1$
Config.	$n$ unif			$C_D$
8	0,010			$1,5 \times 10^{-6}$
9	0,0125			$1,5 \times 10^{-6}$
10	0,015			$1,5 \times 10^{-6}$
Config.	$n_{INT}$	$n_{MED}$	$n_{EXT}$	$C_D$
11	0,010			$2,0 \times 10^{-6}$
12	0,0125			$2,0 \times 10^{-6}$
13	0,015			$2,0 \times 10^{-6}$
14	0,010			$C_{FLA}=1$
15	0,015			$C_{FLA}=1$
16	0,010			$C_{FLA}=1,15$
17	0,015			$C_{FLA}=1,15$
Config.	$n_{INT}$	$n_{MED}$	$n_{EXT}$	$C_D$
18	0,010	0,010	0,015	$1,5 \times 10^{-6}$
19	0,010	0,010	0,015	$2,0 \times 10^{-6}$

Se definen 19 configuraciones (Tabla 1) según la combinación de los parámetros y se simula un período de tiempo de tres años (2018, 2019 y 2020). Los resultados del modelo se evalúan comparando con los niveles medidos en 9 estaciones.

## Resultados

En primer lugar, para evaluar los resultados obtenidos con las distintas configuraciones se realiza un análisis de régimen medio. Los estadísticos de estudio (Schiller et al, 2011) que se evalúan son: el sesgo (BIAS), el error cuadrático medio (RMSE) y el error centrado sin tomar en cuenta el sesgo (CRMSE). Además, se calcula la frecuencia en la que el error se mantiene dentro de un rango  $\pm X$  (frecuencia central) y la frecuencia con la que los errores son mayores o menores a un límite específico (frecuencias negativas y positivas de outlier) (Hess et al, 2003). Los estadísticos presentados se evalúan para todas las configuraciones y para cada estación de medición (Figura 1). Además, se realizan análisis de sensibilidad para determinar tendencias a partir de la variación de los parámetros en búsqueda de la configuración que mejor represente el estado medio en general.

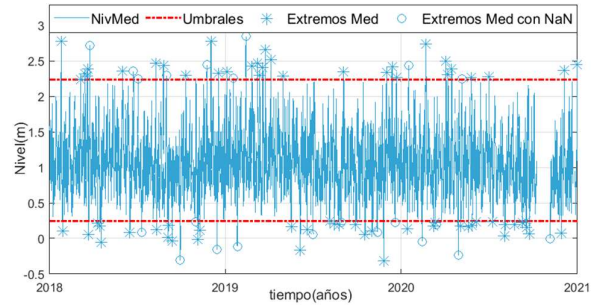
A modo de ejemplo en la Tabla 2 se presentan los valores obtenidos del sesgo en todas las estaciones de medición así como también el promedio del sesgo según cada zona (ver referencia de colores en la Figura 1), y el promedio global por configuración. Se marcan en distintas tonalidades de verde las configuraciones para la cuales se obtienen los mejores estadísticos.

**Tabla 2.-** Valores obtenidos del BIAS(m) para algunas configuraciones. Se presentan los resultados para cada estación, el promedio de las estaciones ubicadas según zona y el promedio global.

Est	Pr 2	Pr 3	Pr 8	Pr 9	Pr 11	Pr 16	Pr 18	Pr 19
MdP	-0,112	-0,111	-0,120	-0,116	-0,123	-0,121	-0,118	-0,120
LPa	-0,013	-0,021	-0,037	-0,035	-0,028	-0,022	-0,027	-0,020
SCI	0,018	0,021	-0,019	0,001	-0,021	-0,015	-0,003	-0,005
IdF	0,178	0,197	0,139	0,165	0,130	0,156	0,150	0,141
MVD	0,060	0,073	0,031	0,048	0,027	0,047	0,038	0,034
TOy	0,134	0,151	0,114	0,139	0,117	0,124	0,123	0,125
Aty	0,153	0,165	0,140	0,167	0,144	0,150	0,140	0,143
PN	-0,011	-0,003	-0,018	0,015	-0,010	-0,010	-0,011	-0,003
BsAs	0,103	0,110	0,103	0,142	0,116	0,110	0,108	0,120
Prom	0,048	0,051	0,059	0,050	0,057	0,053	0,049	0,048
Prom	0,124	0,140	0,095	0,117	0,092	0,109	0,104	0,100
Prom	0,089	0,093	0,087	0,108	0,090	0,090	0,086	0,089
Prom	0,087	0,095	0,080	0,092	0,080	0,084	0,080	0,079

En segundo lugar, se evalúan las distintas configuraciones analizando el régimen extremal, es decir, los eventos de niveles máximos y mínimos. Para esto, se identifican (como se presenta en la Figura 2) y se evalúan los eventos que quedan por fuera de un rango de niveles específico para cada estación, definido por un umbral superior y un umbral inferior. Estos umbrales se determinan considerando los percentiles 1% (inferior) y 99% (superior) de las series medidas de niveles en el periodo evaluado. Para evaluar la representación de niveles extremos en cada configuración se calcula: a) el porcentaje de eventos modelados que coinciden con los medidos respecto a los eventos que ocurren (denominado  $P_{Med}$  según la ecuación [1]), b) el porcentaje de eventos que se modelan pero que no ocurren en la realidad respecto a los eventos que ocurren (denominado  $P_{exc,Med}$  según la ecuación [2]). Además, para los eventos extremos que se logran pronosticar se calcula el promedio y desviación estándar de la diferencia de niveles extremos medido y modelado durante cada evento, así como el promedio y desviación estándar de la diferencia en la duración de los eventos medida y modelada.

$$P_{Med} = \frac{\#EvCoinciden}{\#EvMed} [1] \quad P_{exc,Med} = \frac{\#EvPron - \#EvCoinciden}{\#EvMed} [2]$$



**Figura 2.-** Identificación de extremos medidos en Montevideo para los años 2018, 2019 y 2020.

Los resultados muestran que a medida que  $n_{unif}$  disminuye, el modelo pronostica una mayor cantidad de eventos extremos para la totalidad de las estaciones. En el caso de  $C_D$ , a medida que este aumenta el modelo también pronostica una mayor cantidad de eventos extremos.

Como resultados de ambos análisis (medio y extremal) se identifica que la configuración 19 genera los mejores resultados en la mayoría de las estaciones.

## Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la metodología de evaluación del pronóstico operacional de niveles disponible en tiempo real desarrollada para el Río de la Plata y Frente Marítimo. La metodología definida (régimen medio y el extremal) se utilizó para evaluar los resultados obtenidos para 19 configuraciones del modelo numérico que varían en el número de Manning ( $n$ ) y el coeficiente de arrastre del viento ( $C_D$ ). Ponderando por su capacidad de representar el estado medio y de predecir eventos extremos sin tener excesivos porcentajes de excedencia, se determina de manera global que la configuración que mejor se adapta a estos criterios considera  $n=0,01$  para las zonas interior y media, un  $n=0,015$  para la zona exterior y un  $C_D=2,0 \times 10^{-6}$  fijo (conf. 19). Además, la metodología desarrollada permite identificar cuáles son las configuraciones que mejor representan los niveles para las distintas zonas del Río de la Plata. En el futuro se espera entonces incorporar en el pronóstico resultados de distintas configuraciones. Además, se planifica realizar un estudio de la influencia de los forzantes oceánicos y meteorológicos en las distintas zonas para determinar tendencias y configuraciones que mejor se adapten a cada situación.

## Referencias Bibliográficas

- Santoro P, Fossati M, Piedra-Cueva I. (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. Continental Shelf Research.
- Ballesteros, M. (2021). Sistema de pronóstico de los niveles de marea en tiempo real en el Río de la Plata. Fac. de Ing., UdelAR.
- Hervouet, J.M. (2007). Hydrodynamics of Free Surface Flows. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.
- Lyard, F. H., Allain, D. J., Cancet, M., Carrère, L., and Pico (2021). FES2014 global ocean tide atlas: design and performance, Ocean Sci., 17, 615–649
- Jackson, M., Santoro, P., Fossati, M. (2018). Pronóstico retrospectivo (hindcast) de nivel de mar en la costa de Uruguay. XXVIII Cong. Lat. de Hidráulica.
- Flather R.A. (1976). Results from surge prediction model of the North-West European continental shelf for 1973. Inst. of Oceanography.
- Schiller, A., Brassington, G. B. (2011). Operational oceanography in the 21st century. Springer Science & Business Media.