

MEJORAS EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO BASE DEL PRONÓSTICO DE NIVELES DEL RÍO DE LA PLATA Y FRENTE MARÍTIMO: PRONUUY_RPFM

IMPROVEMENTS IN THE IMPLEMENTATION OF THE NUMERICAL MODEL BASE OF THE FORECAST FOR THE RIO DE LA PLATA AND MARITIME FRONT: PRONUUY_RPFM

Lucas Sellanes^a, Mónica Fossati^a, Diego Silva^b y Pablo Ezzati^b

^a*Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, lsellanes@fing.edu.uy, <https://www.fing.edu.uy/imfia/>*

^b*Instituto de Computación, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, <https://www.fing.edu.uy/es/inco/>*

Palabras clave: Pronóstico, Río de la Plata, Modelación hidrodinámica, Nivel de mar, TELEMAC2D.

Resumen. En Uruguay se cuenta con un sistema de pronóstico operativo de variables meteoceánicas disponible para el Río de la Plata y Frente Marítimo, denominado PronUy_RPFM. El primer producto desarrollado es el pronóstico de nivel de mar para los próximos tres días. El pronóstico se basa en el modelo numérico en elementos finitos TELEMAC2D forzado por pronósticos globales de condiciones oceánicas y meteorológicas y el caudal fluvial de los ríos Paraná y Uruguay. En este trabajo se presenta la implementación y el estudio de sensibilidad del nivel de marea con respecto a la variación del nivel medio en la condición de borde oceánica. Debido a la influencia del nivel medio en la frontera oceánica sobre la calidad del pronóstico, se definieron una serie de configuraciones con distintas condiciones de nivel medio en la frontera oceánica y se analizó la sensibilidad de los resultados obtenidos al simular el año 2022 en modalidad pronóstico. Como producto final se genera un ensamble del pronóstico de niveles para el área.

Keywords: Forecast, Río de la Plata, Hydrodynamic modeling, Sea level, TELEMAC2D.

Abstract. In Uruguay, there is an operational forecasting system for metoceanic variables available for the Río de la Plata and the Maritime Front, known as PronUy_RPFM. The first product developed is the forecast of sea level for the next three days. The forecast is based on the numerical finite element model TELEMAC2D, driven by global forecasts of oceanic and meteorological conditions, as well as the flow of the Paraná and Uruguay rivers. This work presents the implementation and sensitivity study of tidal levels concerning variations in the mean sea level at the oceanic boundary condition. Due to the influence of the mean sea level at the oceanic boundary on the forecast quality, several configurations with different mean sea level conditions at the oceanic boundary were defined, and the sensitivity of the results was analyzed when simulating the year 2022 in forecast mode. The final product consists of an ensemble forecast of sea levels for the area.

1. INTRODUCCIÓN

El Río de la Plata es uno de los estuarios de mayor superficie del planeta. Se encuentra ubicado sobre la costa atlántica de América del Sur, al sur de Uruguay y al este de Argentina (véase la Fig. 1) y recibe el aporte de la segunda cuenca más grande después de la amazónica, con un caudal de aporte promedio de aproximadamente $26.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Este estuario baña las costas de las dos capitales de estos países, tratándose de un cuerpo de agua de gran importancia socio-ambiental para ambos que comparten su jurisdicción, y conforma un cuerpo de agua de dinámica compleja donde la marea meteorológica toma gran relevancia (Santoro et al., 2013).



Figura 1: Ubicación y batimetría del Río de la Plata.

La importancia de este cuerpo de agua motiva el desarrollo de herramientas que permitan mejorar su gestión. En este sentido, en el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de Uruguay, desde hace varias décadas se trabaja con la implementación y validación de modelos numéricos tanto 2D como 3D (Fossati et al., 2014; Santoro et al., 2017) y campañas de monitoreo en el Río de la Plata y su costa uruguaya (Mosquera y Pedochi, 2019), con el objetivo de conocer el sistema y su dinámica estuarina.

La relevancia de contar con herramientas de pronóstico que permitan prever el comportamiento del estuario en el futuro cercano ha crecido con el desarrollo de pronósticos oceanográficos globales que proporcionan las condiciones del océano a nivel de gran escala, y permiten ser utilizadas como condiciones de contorno en el desarrollo de pronósticos regionales de mayor resolución. Dentro del IMFIA, se ha desarrollado un sistema de pronóstico operacional en tiempo real de diferentes condiciones meteoceánicas en las aguas territoriales del Río de la Plata y su Frente Marítimo denominado PronUy_RPFM (Fossati et al., 2022), que actualmente cuenta con su producto de pronóstico de niveles de mar (Ballesteros, 2021) de forma operativa. El objetivo de este trabajo es presentar las características principales de este sistema de pronóstico operativo denominado PronUy_RPFM y los procesos de mejora en la implementación de un sistema de pronóstico de calidad; en particular la implementación del ensamble de pronóstico de nivel generado según la condición de borde oceánica.

En la sección 2 se presenta la descripción del sistema que se encuentra en funcionamiento actualmente y los parámetros del prototipo inicial. En la sección 3 se describe la metodología y los resultados obtenidos en la mejora del pronóstico de niveles en base a la definición del en-

samble de nivel de mar y su evaluación. Por último, en la sección 4 se presentan las conclusiones finales del artículo.

2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA PRONUUY_RPFM

2.1. Estructura del sistema de pronóstico

El sistema de pronóstico desarrollado tiene 5 componentes: 1) acceso a datos externos, 2) base de datos, 3) modelo numérico, 4) evaluación del sistema, y 5) difusión de los resultados en tiempo real. Estas componentes se relacionan entre sí y son ejecutadas en manera secuencial día a día. En las primeras dos etapas de tareas se realiza la descarga y el procesado de los datos que necesita posteriormente el modelo para realizar las simulaciones (forzantes externos de modelos globales). La tercer componente del sistema refiere al modelo numérico hidrodinámico utilizado para el producto específico de pronóstico. Luego, la cuarta fase refiere a la evaluación realizada con los datos medidos in-situ por mareógrafos del dominio (descargados en la segunda etapa), permitiendo mejorar la calidad del pronóstico brindado. Por último, el pronóstico se difunde para todo usuario y en tiempo real desde el año 2021, tanto resultados como los datos registrados en los mareógrafos, en su página web (<https://www.fing.edu.uy/imfia/pronostico-marea/>).

2.2. Modelo numérico hidrodinámico

El modelo hidrodinámico utilizado para el pronóstico de niveles actual es la herramienta numérica de TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007) en su versión bidimensional TELEMAC2D. Anteriormente, el modelo ha sido utilizado dentro del instituto para modelar diferentes cuerpos de agua a superficie libre, entre ellos el Río de la Plata y costa uruguaya para resolver la hidrodinámica y la dinámica de sedimentos finos, tanto en su versión bidimensional integrada en la vertical (Santoro et al., 2017; Jackson et al., 2018) como en su versión tridimensional (Maciel et al., 2021).

2.3. Dominio y malla de cálculo

El dominio definido para el pronóstico comprende el Río de la Plata y su frente marítimo. La zona exterior del dominio queda definida entre la ciudad de Mar del Plata (Argentina) al suroeste y la ciudad de Rio Grande (Brasil) al noreste, aproximadamente a 200 km de la frontera uruguaya. La zona interior se extiende hasta la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay. Para el modelo se define una malla bidimensional en elementos finitos no-estructurada de resolución variable desde 3km en el borde oceánico hasta 100 m en la zona interior (ver la Fig. 2).

2.4. Condiciones de borde

Para forzar el modelo se utilizan tres principales forzantes, la variación del borde oceánico según las mareas pronosticadas por modelos globales, los vientos y presiones atmosféricas según los modelos de pronóstico globales en la superficie y el caudal fluvial de ingreso al dominio en los afluentes principales.

Como condición de borde en la frontera oceánica se utilizan los niveles de marea meteorológica del modelo de pronóstico global RTOFS-HYCOM de NOAA-NCEP, de 1/12° de resolución disponibles en tiempo real con frecuencia horaria (<https://polar.ncep.noaa.gov/global/>). Este sistema de pronóstico global proporciona datos actualizados a diario del estado del océano de 1 dato por hora y para las próximas 72 horas. Debido a que el modelo global no incorpora la marea astronómica, se acoplan los niveles de marea astronómica del atlas global FES2014.

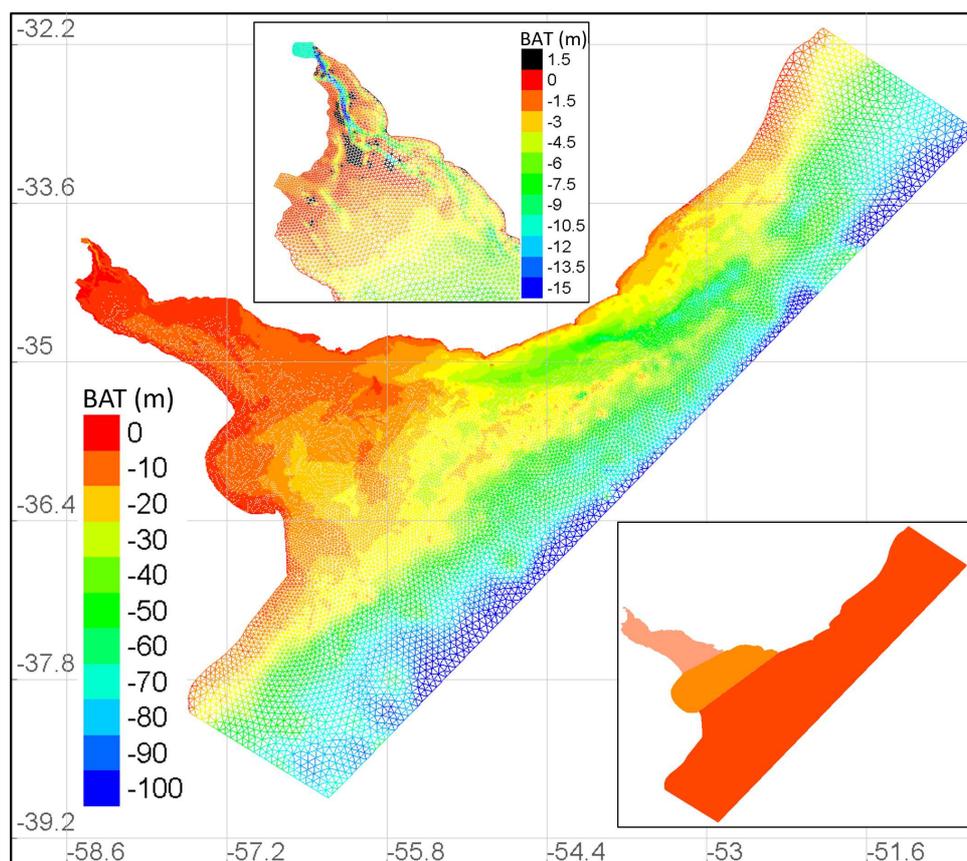


Figura 2: Malla de cálculo del modelo TELEMAC2D utilizada en el sistema de pronóstico. En el panel inferior derecho se marcan las zonas interior (rosa), intermedia (naranja) y rojo (exterior) en las cuales se define distinta rugosidad de fondo.

Estos niveles son interpolados en los nodos del borde oceánico del dominio y son utilizados como forzante del modelo a diario.

En el modelo hidrodinámico actualmente se utiliza como forzantes meteorológicos la velocidad del viento a 10 metros y la presión atmosférica en la superficie. Estas variables son impuestas utilizando como base de datos al pronóstico meteorológico global del NCEP (NOAA) que utiliza el HYCOM como forzante y se basa en el modelo numérico GFS de $1/4^\circ$ de resolución (<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>). Este modelo global tiene como producto la actualización del pronóstico cada 6 horas (cuatro veces al día) y con una resolución temporal de 1 dato por hora para las siguientes 120 horas. El sistema PronUy_RPFM tiene incorporada la descarga de estos forzantes una vez son publicados en su web y actualiza el pronóstico publicado en la web de difusión cuatro veces al día.

Por el aporte significativo de los ríos Uruguay y Paraná que desembocan en el Río de la Plata se realiza la actualización diaria del forzante fluvial. Para ello en el esquema de descargas diarias hay una componente de descargas de mediciones de caudal en los dos afluentes del sistema. Día a día en el modelo se utiliza la media de los caudales medidos en las 24 horas anteriores como el forzante fluvial de forma constante en las 72 horas de simulación.

2.5. Prototipo inicial

El prototipo inicial del modelo fue calibrado ajustando los parámetros del modelo de rugosidad según el número de Manning n y el coeficiente de arrastre de viento C_d (Fossati et al.,

2022; Balparda et al., 2022). El primero se evaluó considerando casos con valor uniforme en todo el dominio y casos con valor variable en el dominio según las tres zonas definidas en la Fig. 2. Para el coeficiente de arrastre del viento se evaluaron alternativas de C_d constante y variable (función de la velocidad de viento) utilizando un coeficiente de mayoración o minoración a partir de la formulación de Flather. Como resultado los parámetros del prototipo inicial son $n_{int} = n_{med} = 0,01$, $n_{ext} = 0,015$ y $C_d = 2 \times 10^{-06}$ constante en el dominio. No obstante, surge la necesidad de contar con varias configuraciones del pronóstico según la región en la que se quiera hacer énfasis.

2.6. Difusión de resultados

A diario el sistema PronUy_RPFM, realiza las descargas de los forzantes y ejecuta el modelo hidrodinámico para las 72 horas próximas resolviendo la variación de la superficie libre, la velocidad promedio en vertical y se incluye como trazador activo la salinidad. A su vez, descarga datos medidos en diferentes mareógrafos de la costa uruguaya y argentina y publica en la web de difusión, la variación de la superficie libre en conjunto con los datos registrados en los mareógrafos (ver la Fig. 3).



Figura 3: Ejemplo de publicación en tiempo real del pronóstico diario en la estación de Montevideo (Uruguay) donde se cuenta con datos medidos. Pronóstico del día 28 de agosto del 2023 en La Paloma.

3. GENERACIÓN DEL ENSAMBLE DE NIVEL DE MAR

3.1. Metodología

La dinámica de niveles de marea en el Río de la Plata se ve fuertemente influenciada por la onda de marea meteorológica que ingresa desde el sur por la plataforma argentina y sufre transformaciones durante su propagación en el estuario por la influencia de vientos fuertes, la presión atmosférica, la fricción de fondo y los cambios de sección. Por esto, la representación del nivel de mar en el borde oceánico es de suma importancia para la calidad del pronóstico de niveles.

Las predicciones de nivel del modelo global HYCOM y del atlas de marea astronómica FES2014 tienen como referencia el geode, por ello es necesario adicionarle un valor que lleve estas fluctuaciones de la marea al nivel de referencia del modelo, que se trata del Cero Wharton en este caso (nivel medio de las aguas del puerto de Montevideo). Desde su implementación, el

modelo del pronóstico utiliza la adición de 0,91 metros en la frontera oceánica asociado a que el Cero Wharton se encuentra 0,91 metros por encima del Cero Oficial del puerto de Montevideo.

No obstante, los niveles pronosticados en los mareógrafos disponibles en la zona muestran un error en el nivel medio importante (Fossati et al., 2022). Con el objetivo de disminuir el sesgo, se definieron 13 simulaciones modificando el nivel de referencia del borde oceánico del modelo desde 50 cm a 110 cm variando cada 5 cm. De esta forma se genera lo que se denomina en este trabajo un ensamble de nivel de mar en base a las simulaciones que se diferencian en el nivel de referencia del borde oceánico. Se simula el año 2022 para todos los ensambles y se evalúan comparando con los niveles medidos en las estaciones del dominio en las cuales se cuenta con niveles medidos.

La evaluación de cada simulación del ensamble se realiza mediante el cálculo de estadísticos que permiten evaluar el comportamiento medio de las series obtenidas frente a los datos medidos. Para cada estación se calcula el nivel medio y la varianza de la serie medida y la serie modelada, además de el sesgo (BIAS), el error cuadrático medio (RMSE) y la correlación (R) para los años simulados respecto a los datos medidos recopilados.

En la zona se cuenta con diferentes mareógrafos en la costa uruguaya y argentina de los cuales se extraen series de datos medidos de nivel. En la Tabla 1 se presentan las estaciones del Río de la Plata y frente marítimo que se utilizan para la evaluación y el porcentaje de tiempo del que se tienen datos para el año 2022.

Mareógrafos uruguayos	Datos medidos	Mareógrafos argentinos	Datos medidos
Montevideo	92 %	Atalaya	73 %
Isla de Flores	91 %	Buenos Aires	75 %
La Paloma*	93 %	La Plata	75 %
Punta del Este	66 %	Mar del Plata	72 %
Colonia	81 %	Torre Oyarvide	72 %
		Pilote Norden	73 %
		San Clemente	44 %
		Santa Teresita	72 %

Tabla 1: Porcentaje de datos medidos para los mareógrafos de las estaciones uruguayas y argentinas en el año 2022. *El porcentaje de datos de la estación de La Paloma es del año 2021.

Por otra parte, se calcula un error asociado a un subconjunto de simulaciones del ensamble, considerando tres bandas de error de nivel para el pronóstico: 10 cm, 20 cm y 30 cm. La evaluación del error para la banda se realiza teniendo en cuenta las 13 simulaciones en las cuales el nivel medio en el borde varía (entre 50 y 110 cm), y según el espesor de banda (10, 20 y 30 cm) surge entonces el número de bandas a evaluar (11, 9 y 7, respectivamente). Para cada banda de cada espesor se calcula un error asociado como el porcentaje de datos de nivel medidos que caen en cada banda del pronóstico, para el año 2022. Así, para cada estación de medición se obtiene un error asociado a una banda definida según un subconjunto de simulaciones del ensamble de niveles.

3.2. Resultados

A modo de ejemplo, en la Fig. 4 se presenta la serie temporal de nivel de mar medido y obtenido con las 13 simulaciones del modelo para siete días en el mes de junio de 2022 en las estaciones de Montevideo y Mar del Plata, con el objetivo de mostrar el comportamiento del modelo respecto a la condición de borde oceánica. Se observa que las variaciones de nivel en el borde oceánico, afectan significativamente la propagación de las ondas de marea en el Río de la

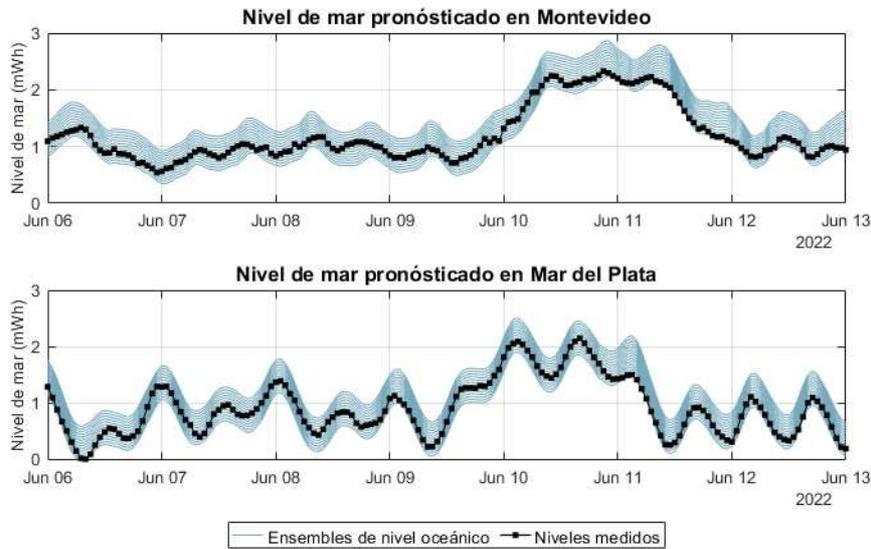


Figura 4: Resultados de los ensambles de nivel para las estaciones de Montevideo (Uruguay) y Mar del Plata (Argentina).

Plata. A su vez, las simulaciones representan el evento de nivel alto ocurrido entre el 10 y el 11 de mayo.

Los estadísticos de error BIAS, RMSE y R calculados en las estaciones de control para el año 2022 para las 13 simulaciones se presentan en la Fig. 5. En este gráfico se observa que el sesgo calculado para las diferentes estaciones a lo largo del dominio presenta un cambio aproximadamente lineal dominado por la variación de nivel en la condición de borde oceánica, implicando que esta variación genera un cambio en toda la región del Río de la Plata. Analizando los estadísticos BIAS y RMSE en conjunto se puede observar que estos obtienen su mejor

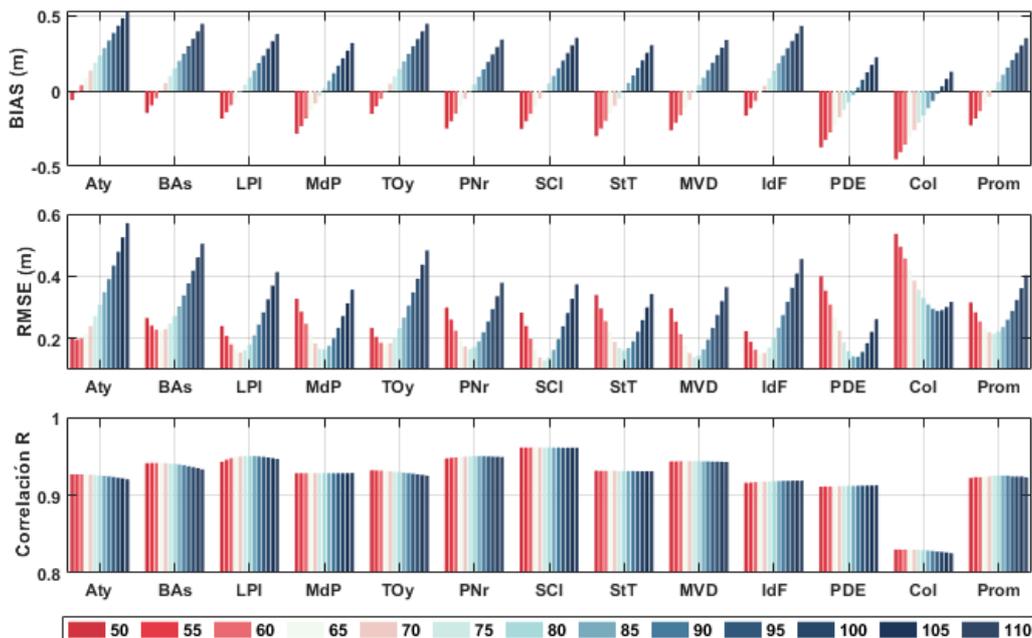


Figura 5: Estadísticos de comparación entre las series de niveles obtenidas con el modelo utilizando los ensambles de nivel oceánico y los niveles medidos en las estaciones para el año 2022: BIAS (panel superior), RMSE (panel intermedio) y R (panel inferior).

desempeño para cada estación con la misma configuración. Observando la correlación (R) de las simulaciones con los datos medidos se registra que la habilidad del modelo en reproducir el patrón de las mediciones es independiente de la condición de borde oceánica utilizada y en general es buena.

En la Tabla 2 presentan los resultados obtenidos al definir los diferentes subconjuntos de simulaciones del ensamble para la estación de Montevideo para el año 2022. Comparando los resultados de porcentaje de aciertos, se observa que las bandas de 20 y 10 cm presentan porcentajes de aciertos bajos. La banda de 30 cm presenta resultados más alentadores llegando a porcentajes de acierto del pronóstico por encima del 70 % del tiempo en algunas estaciones.

Estación: Montevideo					
Banda de 10 cm	Porcentaje de aciertos	Banda de 20 cm	Porcentaje de aciertos	Banda de 30 cm	Porcentaje de aciertos
050-060	8,40 %				
055-065	15,79 %	050-070	32,73 %		
060-070	24,33 %	055-075	44,92 %	050-080	62,51 %
065-075	29,13 %	060-080	54,11 %	055-085	71,57 %
070-080	29,80 %	065-085	55,78 %	060-090	74,17 %
075-085	26,65 %	070-090	49,84 %	065-095	69,97 %
080-090	20,06 %	075-095	40,83 %	070-100	59,92 %
085-095	14,19 %	080-100	30,14 %	075-105	47,28 %
090-100	10,09 %	085-105	20,63 %	080-110	33,85 %
095-105	6,45 %	090-110	13,79 %		
100-110	3,71 %				

Tabla 2: Porcentaje de aciertos de los niveles medidos en la estación de Montevideo para el año 2022 para los diferentes subconjuntos de simulaciones de los ensambles.

En la Tabla 3 se presenta el mejor porcentaje de acierto obtenido para cada estación utilizando la banda de 30 cm de espesor. En general, se obtienen buenos resultados en todo el dominio del Río de la Plata y Frente Marítimo, logrando porcentajes mayores al 70 % para la mayoría de las estaciones en la costa uruguaya. Es importante señalar, que los bajos porcentajes obtenidos en las estaciones del Río de la Plata interior (zona más alejada del borde oceánico), como lo son Buenos Aires y Colonia, ampliando la banda no se obtienen muy buenos desempeños (resultados no presentados). Esto indica que hay otros procesos en la zona que deben ajustarse para mejorar la calidad del pronóstico, distintos al nivel de referencia en el borde oceánico (como por ejemplo los vientos). De esta manera, queda definida para cada estación el conjunto de simulaciones que deben utilizarse para definir el ensamble en la misma.

Estación	Banda de mejor resultado	Porcentaje de aciertos	Estación	Banda de mejor resultado	Porcentaje de aciertos
BAs	050-080	47,5 %	MVD	060-090	74,2 %
LPI	055-085	65,2 %	IdF	050-080	69,2 %
MdP	060-090	63,7 %	Lpa*	070-100	77,0 %
TOy	050-080	63,9 %	PDE	075-105	70,7 %
PNr	060-090	66,6 %	Col	065-095	46,8 %
SCI	060-090	77,1 %			
StT	060-090	68,1 %			

Tabla 3: Porcentaje de aciertos de los niveles medidos en las estaciones estudiadas para el año 2022. A la izquierda se presentan las estaciones argentinas y a la derecha las estaciones uruguayas. *Para la estación de La Paloma se toman los datos y las simulaciones del año 2021 por falta de datos para comparar en el año 2022.

En la Fig. 6 se presentan los pronósticos de seis días de abril del 2022 para las estaciones de Montevideo, Punta del Este y Buenos Aires, con el fin de evaluar gráficamente como los subconjuntos de simulaciones de los ensambles seleccionados para cada estación mejoran la calidad del pronóstico. Para las estaciones de Montevideo y Punta del Este puede verse como la banda acompaña las variaciones del nivel de mar medido de forma correcta. En cuanto a Buenos Aires, se observa que la representación de la variación de los niveles de mar todavía debería mejorarse.

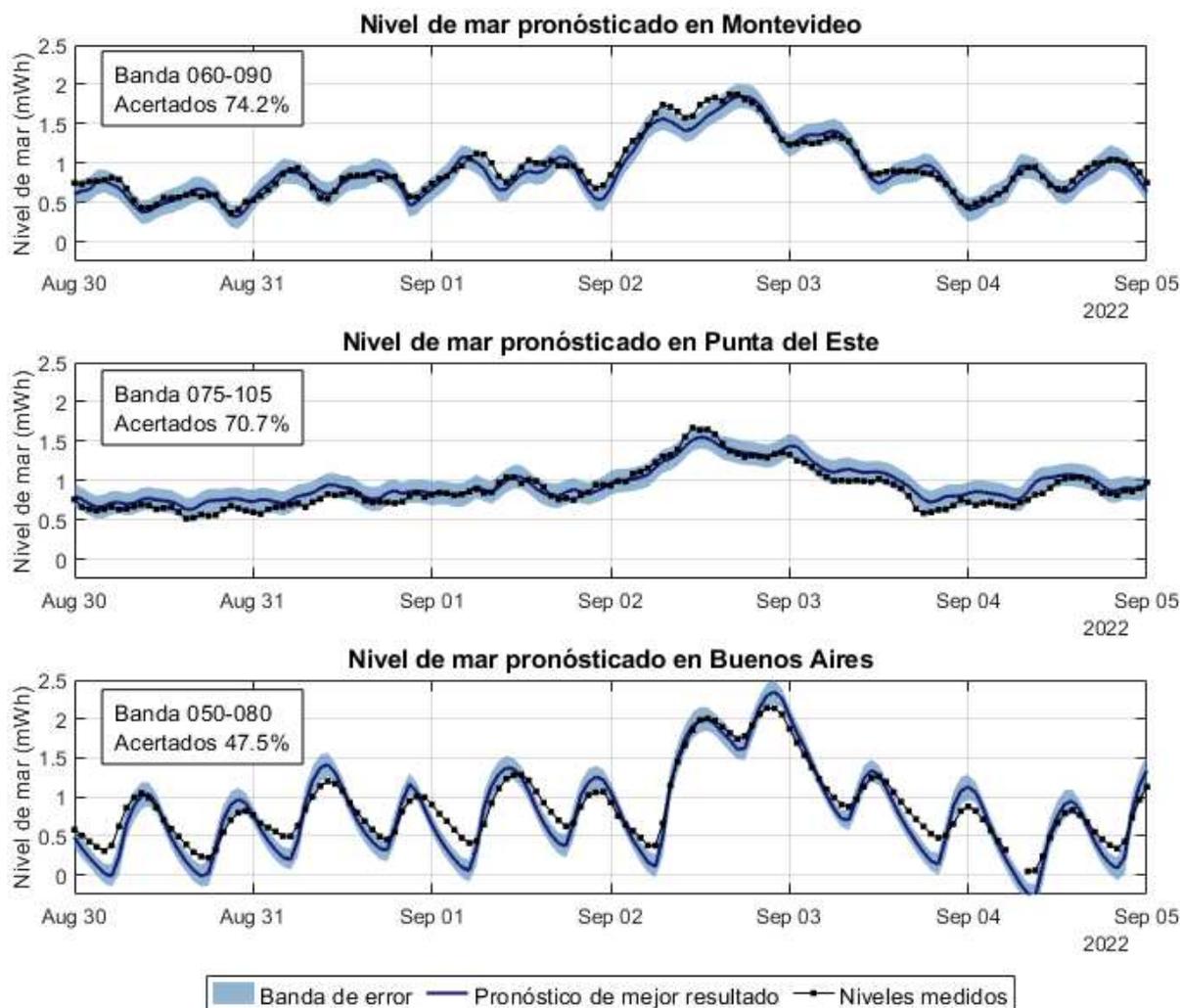


Figura 6: Pronóstico de nivel de mar en las estaciones de Montevideo (panel superior), Punta del Este (panel intermedio) y Buenos Aires (panel inferior), con su banda de ensambles de nivel oceánico.

4. CONCLUSIONES

La variación del nivel de referencia en el borde oceánico del modelo del sistema de pronóstico actual genera una variación de nivel significativa en todas las estaciones del dominio del Río de la Plata y Frente Marítimo.

De los análisis realizados se puede destacar que, posiblemente por el gran tamaño del dominio de cálculo, no resulta sencillo seleccionar una configuración de referencia del nivel de borde oceánico que represente de forma correcta el nivel de mar en todas las estaciones. Sin embargo,

la decisión de definir un ensamble de niveles a partir de la selección por estación de un conjunto de simulaciones que varían el forzante oceánico, parece acertada.

La elección de una banda de nivel de 30 cm, presenta la mayor confiabilidad en los niveles pronosticados en las diferentes estaciones. Por lo tanto, se definen según estaciones del dominio las simulaciones que se diferencian en la condición de borde oceánica que definen el ensamble de nivel pronosticado en cada estación. Próximamente esta variación en el pronóstico será implementado en el sistema de pronóstico operativo PronUy_RPFM.

REFERENCIAS

- Ballesteros M. Sistema de pronóstico de los niveles de marea en tiempo real en el río de la plata. *Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (Uruguay)*, 2021.
- Balparda D., Sellanes L., Silva D., Jackson M., Ezzatti P., y Fossati M. Evaluación y calibración del pronóstico de nivel del río de la plata y frente marítimo. *XXX Cong. Lat. de Hidráulica*, 2022.
- Fossati M., Balparda D., Sellanes L., Silva D., Jackson M., y Ezzatti P. Desarrollo del sistema de pronóstico del río de la plata y su frente marítimo: Pronuy_rpfm. *Ribagua*, 9(2):25–40, 2022. doi:10.1080/23863781.2023.2210262.
- Fossati M., Santoro P., Mosquera R., Martinez C., Ghiardo F., Ezzatti P., Pedocchi F., y Piedra-Cueva I. Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el río de la plata. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, 1:48–63, 2014.
- Hervouet J. *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*. Chichester UK: John Wiley Sons Ltd, 2007.
- Jackson M., Santoro P., y Solari S. Pronóstico retrospectivo (hindcast) de nivel de mar en la costa de uruguay. *XXVIII Cong. Lat. de Hidráulica*, 2018.
- Maciel F., Santoro P., y Pedocchi F. Spatio-temporal dynamics of the río de la plata turbidity front; combining remote sensing with in-situ measurements and theoretical modeling. *Continental Shelf Research*, 2021.
- Mosquera R. y Pedochi F. Salinity estimation from acoustic doppler velocimeter measurments. *Continental Shelf Research*, 180:59–62, 2019.
- Santoro P., Fossati M., y Piedra-Cueva I. Study of the meteorological tide in rhe río de la plata. *Continental Shelf Research*, 60:51–63, 2013.
- Santoro P., Fossati M., Tassi T., Huybrechts N., Pham Van Bang D., y Piedra-Cueva I. A coupled wave–current–sediment transport model for an estuarine system: Application to the río de la plata and montevideo bay. *Applied Mathematical Modelling*, 52:107–130, 2017.