

ACTUALIZACIÓN DE UN SISTEMA DE PRONÓSTICO HIDRODINÁMICO EN EL DELTA DEL PARANÁ

Santiago Guizzardi, Juan Bianchi, Martín Sabarots Gerbec

Argentina, +54-1148885404, santiagoaguizzardi@gmail.com

Introducción

El Delta del Paraná, con una superficie aproximada de 17.500 km², constituye la desembocadura del río Paraná en el Río de la Plata (Figura 1). Esta región se caracteriza por una red fluvial altamente compleja, influenciada tanto por los caudales provenientes de las cuencas del Paraná y del Uruguay como por las mareas astronómicas y meteorológicas del estuario (Re, 2003).

Su particular geomorfología hace que las crecidas y bajantes puedan deberse no solo a aportes fluviales, sino también a diversas combinaciones meteorológicas, como los vientos persistentes del sudeste, que modifican el régimen del estuario. Estas condiciones afectan directamente a las comunidades locales, los ecosistemas y las actividades productivas y logísticas, en especial aquellas vinculadas a la Hidrovía Paraná-Paraguay, por donde circula cerca del 80 % de las exportaciones del país. En los años 2020 y 2021 se registraron bajantes históricas, con impactos significativos sobre tomas de agua y condiciones de navegabilidad.

En este contexto, se desarrolló un sistema de pronóstico hidrodinámico que integra modelos unidimensionales y bidimensionales para simular la interacción entre los caudales fluviales y las mareas del Río de la Plata. Desde 2021, el sistema opera con actualizaciones cada seis horas y un horizonte de pronóstico de cuatro días. Esta herramienta forma parte del proyecto DELTA PARANÁ: Estudio Hidrodinámico Integrado del Delta del Paraná con Múltiples Propósitos (<https://www.ina.gov.ar/delta>).

El presente trabajo actualiza la evaluación del sistema presentada originalmente en Forecast System Implementation in the Paraná Delta (Guizzardi, 2022). Se realiza un análisis retrospectivo (hindcast) extendido en cuatro estaciones dentro del dominio modelado, lo que permite valorar el desempeño del sistema frente a nuevas condiciones hidrológicas (Figura 1). En total, se ejecutaron más de 3.900 corridas del modelo entre el 26 de noviembre de 2021 y el 12 de marzo de 2025, con una frecuencia de actualización de cada 6 horas, reproduciendo el esquema operativo real del sistema de pronóstico.

Descripción del modelo

El sistema de pronóstico se estructura en dos componentes principales:

Modelo unidimensional (HIDRO-DELTA): representa la red fluvial del Delta del Paraná y fue desarrollado por el Instituto Nacional del Agua (INA) (Sabarots, 2014; Re, 2015). Implementado en HEC-RAS, utiliza una discretización temporal de 30 minutos y espacial de 5 km. El modelo contempla 13 condiciones de borde, que incluyen series de caudal observadas aguas arriba y niveles hidrométricos interpolados a lo largo del frente del Delta, entre San Fernando (Argentina) y Nueva Palmira (Uruguay) (Figura 1), utilizando los últimos datos horarios disponibles.

Modelo bidimensional (SMARA): desarrollado por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) (Etala, 2009), simula la

propagación de mareas y sudestadas en el estuario del Río de la Plata. Está en operación desde octubre de 2020 y aporta condiciones de borde dinámicas al modelo del Delta.

Sistema integrado

El sistema de pronóstico hidrodinámico opera de forma automatizada y se alimenta de datos en tiempo real provistos por el Programa de Sistemas de Información y Alerta Hidrológico en Cuenca del Plata (SIyAH) del INA. Estos datos incluyen niveles hidrométricos a lo largo del Paraná y del Río de la Plata, y pronósticos de viento.

El flujo de trabajo, desarrollado en lenguaje de programación de código abierto, contempla: descarga y transformación de datos, ejecución de los modelos del estuario (SMARA), uso de sus salidas como condiciones de borde aguas abajo en el modelo unidimensional del Delta (HIDRO-DELTA), y almacenamiento de resultados para su visualización o integración con otros modelos.

Las alturas de marea astronómica son provistas por el SHN en once puntos del frente del delta. A estas se les aplica una corrección por efectos meteorológicos utilizando SMARA, actualizada cada 6 horas. La combinación de ambos componentes permite obtener niveles hidrométricos.

Antes de ser utilizadas como entrada del modelo unidimensional, las series generadas por el modelo bidimensional del estuario se ajustan mediante una regresión lineal múltiple, utilizando datos observados en San Fernando y Nueva Palmira. Esta corrección se actualiza en cada ejecución, empleando los últimos 60 días de datos observados junto con los pronósticos generados durante ese período.

El modelo HIDRO-DELTA realiza simulaciones desde 60 días previos hasta 4 días posteriores a la fecha de ejecución. Las corridas se actualizan cada 6 horas y presentan un tiempo de cómputo promedio inferior a 2 minutos. Los resultados se publican mediante una API web, lo que garantiza un acceso interoperable y automatizado a los pronósticos.



Figura 1.- Dominio de modelación: Delta del río Paraná.

Resultados

La evaluación se realizó en cuatro estaciones hidrodinámicas distribuidas a lo largo del dominio de modelación: Rosario, Villa Constitución, Brazo Largo y Atucha (Figura 1), comparando niveles observados y simulados a distintos horizontes de pronóstico (6, 12, 24, 48, 72 y 96 h). Se calcularon indicadores estándar de desempeño: error absoluto medio (MAE), raíz del error cuadrático medio (RMSE), sesgo porcentual (PBIAS) y eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE).

Los resultados se presentan en la Tabla 1. Los mismos evidencian una buena capacidad del sistema para reproducir los niveles hidrométricos observados en diferentes sectores del Delta del Paraná. Los valores de NSE se mantienen altos (>0,85) incluso a 96 horas, lo que indica una capacidad predictiva consistente y confiable en todos los sitios analizados.

Se observan diferencias espaciales: mientras que en Rosario y Villa Constitución el ajuste es muy alto, en estaciones como Brazo Largo y Atucha se detecta una leve subestimación (PBIAS negativo) y una mayor dispersión para horizontes superiores a 72 h. Estas discrepancias se explican, probablemente, por la influencia de variables meteorológicas como el viento, cuya predicción resulta más incierta y que tiene un mayor impacto en esta zona del Delta que en sectores aguas arriba. Las incertezas en estos forzantes terminan propagándose a los modelos hidrodinámicos, afectando la precisión de los pronósticos.

Tabla 1.- Indicadores de calidad de ajuste.

Estación	Horizonte [horas]	MAE [m]	RMSE [m]	PBIAS [-]	NSE [-]
Rosario	6	0.07	0.10	-0.02	0.99
	12	0.07	0.10	-0.04	0.99
	24	0.08	0.10	-0.08	0.99
	48	0.09	0.12	-0.05	0.99
	72	0.11	0.15	-0.03	0.98
	96	0.13	0.17	-0.04	0.98
Villa Constitución	6	0.10	0.14	0.29	0.98
	12	0.10	0.14	0.15	0.98
	24	0.11	0.14	0.09	0.98
	48	0.12	0.15	0.08	0.98
	72	0.13	0.17	0.08	0.97
	96	0.15	0.19	0.16	0.96
Brazo Largo	6	0.10	0.13	-0.36	0.93
	12	0.10	0.13	-0.49	0.92
	24	0.11	0.14	-0.22	0.91
	48	0.12	0.16	-0.50	0.89
	72	0.14	0.19	-0.49	0.85
	96	0.17	0.22	-0.02	0.79
Atucha	6	0.10	0.14	-0.82	0.93
	12	0.10	0.14	-0.99	0.92
	24	0.11	0.15	-0.41	0.92
	48	0.13	0.17	-0.75	0.89
	72	0.14	0.19	-0.74	0.86
	96	0.17	0.22	-0.21	0.81

La Figura 2 muestra las distribuciones del error entre niveles observados y simulados mediante diagramas de densidad para distintos horizontes de pronóstico en la estación Atucha. Se observa que, para horizontes de 6 a 24 horas, la distribución del error es más estrecha y centrada en torno al valor cero, lo que indica buena precisión y ausencia de sesgos sistemáticos. A medida que el horizonte se extiende (48, 72 y 96 h), la dispersión aumenta progresivamente, lo cual es esperable debido a la acumulación de incertidumbre en las condiciones meteorológicas forzantes.

Aunque la dispersión aumenta para horizontes más largos, los errores se mantienen dentro de un rango razonable ($\pm 0,25$ m en la mayoría de los casos), sin presencia de valores extremos ni asimetrías marcadas. La forma simétrica de los diagramas sugiere que no hay un sesgo sistemático fuerte en el modelo, aunque se detecta una ligera tendencia a la subestimación para horizontes superiores a 72 h.

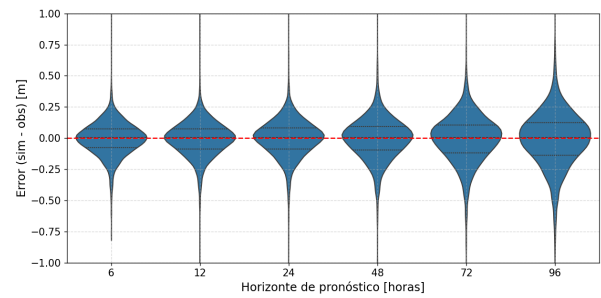


Figura 2.- Distribución del error entre niveles simulados y observados para distintos horizontes de pronóstico en la estación Atucha.

En la figura 3, a modo de ejemplo, se muestran los pronósticos hidrométricos generados por el sistema HIDRO-DELTA para la estación Atucha, para la semana comprendida entre el 03 y el 10 de mayo de 2024. Cada línea de color representa un pronóstico emitido en una fecha y hora determinada, mientras que los puntos negros corresponden a los niveles observados.

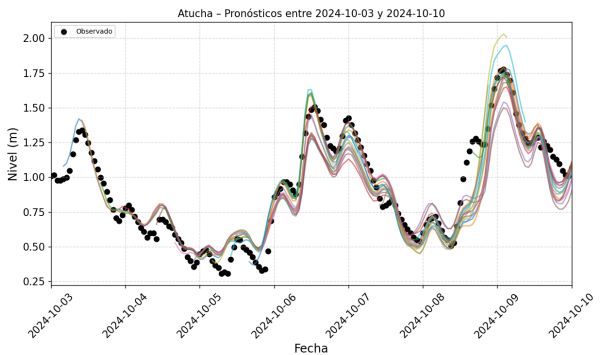


Figura 3.- Pronósticos generados por el sistema HIDRO-DELTA y niveles observados en la estación Atucha para la semana del 3 al 10 de mayo de 2024.

Conclusiones

El trabajo presenta una actualización del desempeño del sistema de pronóstico hidrodinámico HIDRO-DELTA, en operación desde 2021 para el Delta del Paraná. La evaluación sobre un período extendido y en nuevas condiciones hidrológicas confirma su buen comportamiento en términos de precisión, sesgo y eficiencia predictiva, con valores de NSE superiores a 0,85 en la mayoría de los sitios analizados y horizontes de hasta 96 horas. El sistema constituye una herramienta valiosa para la gestión del recurso hídrico, la navegación y la toma de decisiones ante eventos extremos. Su arquitectura modular, la posibilidad de incorporar nuevas fuentes de datos y la automatización de sus corridas lo posicionan como un esquema adaptable a otras regiones con problemáticas similares.

Referencias bibliográficas

- Ré, M., & Menéndez, A. N. (2003). Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo. *Informe INA-LHA*, 03-2.
- Étala, P. (2009). Dynamic issues in the SE South America storm surge modeling. *Natural hazards*, 51(1), 79-95.
- Guizzard, S., Bianchi, J., Cortese, J. E., Urriburu Quirno, M., & Sabarots Gerbec, M. (2022, June). Forecast System Implementation in the Paraná Delta. *In LAHR world congress*.
- Re, M., Sabarots Gerbec, M., & Storto, L. (2015). Estadística de niveles en el Delta del río Paraná mediante modelación hidrodinámica. *In VII Simposio Regional sobre Hidráulica de RIOS*.
- Sabarots Gerbec, M. (2014). Estudio de la dinámica superficial de la red de canales del Delta Medio del río Paraná. *II Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*, Ezeiza, Argentina.