



XXVIII Jornada de
Jóvenes Investigadores
10, 11 y 12 de noviembre
Generación de conocimientos desde
el sur para el mundo post pandemia



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE



C.24. Ciencia, Tecnología, e innovación

Desarrollo de un modelo de pronóstico para el Río de la Plata

Autor: Cortese, Julián Evaristo; jcortese@fi.uba.ar

Profesor/a guía: Sabarots Gerbec, Martín; msabarots@fi.uba.ar

Universidad de Buenos Aires

Resumen

El Río de la Plata es un estuario cuyas aguas son compartidas por Argentina y Uruguay. Por él circula gran porcentaje de la actividad económica de sendos países, así como también hay grandes centros urbanos sobre sus costas.

El comportamiento agregado del estuario está regido principalmente por las mareas astronómica y meteorológica, aunque también se ve afectado por bajantes importantes del Río Paraná. En cualquier caso, en situaciones extraordinarias los niveles del río pueden subir significativamente, anegando regiones costeras, o bien descender, provocando dificultades a la navegación y toma de agua para consumo humano.

Debido a la importancia estratégica del estuario, surge el objetivo del presente trabajo: desarrollar un modelo numérico de pronóstico para el Río de la Plata. El mismo fue desarrollado empleando el *software Delft3D* y tiene una extensión superficial que abarca desde el Frente del Delta del Río Paraná hasta una curva que se extiende sobre el Mar Argentino que une la ciudad argentina de Mar del Plata con el departamento de Rocha sobre la costa uruguaya. Los forzantes consisten en pronósticos de viento y descargas fluviales sumados a la marea astronómica. Además del modelo en sí, en puntos donde se disponga de datos medidos en tiempo real, se lleva a cabo un post procesamiento de los resultados para mejorar la precisión.

Como resultado del trabajo se obtiene entonces un modelo numérico que genera automáticamente cada doce horas un pronóstico a dieciséis días de niveles del Río de la Plata en distintos puntos de interés (siendo factible elegir dónde obtener dichas series). Se espera con ello brindar una herramienta adicional para la toma de decisiones.

Palabras clave: Modelación, pronóstico, Río de la plata.

1. Introducción

Como se mencionó previamente en el Resumen, el Río de la Plata es un estuario cuyas costas son compartidas por la República Argentina y por la República Oriental del Uruguay. Sobre dichas costas se encuentran grandes centros urbanos (Figura 1), destacándose la ciudad de Montevideo sobre el lado uruguayo y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y La Plata sobre el argentino por lo que el comportamiento del Río puede tener grandes impactos sobre la calidad de vida de los habitantes de dichas urbes, ya sea por crecidas importantes que provoquen inundaciones o por bajantes extraordinarias que dificulten la toma de agua para consumo.



Figura 1: Extensión del Río de la Plata.

En especial sobre las costas argentinas, donde la amplitud de la marea es mayor debido al sentido de

propagación de las ondas (Santoro, 2011) hay regiones que presentan alto riesgo ante inundaciones provocadas por eventos de tormenta, destacándose las regiones de Tigre, Escobar, Berazategui y Quilmes (Lecertua, 2010).

Además de su importancia debido a las poblaciones que se asientan sobre sus costas, a través del Río de la Plata circula un importante porcentaje de la actividad económica argentina dado que el mismo es la transición entre el Río Paraná, principal vía navegable del país, con el Océano, por lo que el estuario también cobra relevancia desde una perspectiva económica.

Debido al peso estratégico que el Río de la Plata tiene para ambos países, en la actualidad su comportamiento agregado ha sido estudiado en distintos trabajos antecedentes y los principales fenómenos que lo rigen están individualizados y caracterizados.

En el presente trabajo se busca incorporar dicho conocimiento al desarrollo de un modelo de pronóstico de niveles de superficie libre de agua del Río de la Plata en distintos puntos relevantes del mismo.

2. Objetivos

Debido a la relevancia que el Río de la Plata tiene desde una perspectiva

socioeconómica, se plantea en el presente trabajo el desarrollo de un modelo numérico automatizado de pronóstico de niveles en el estuario que permita contar con información confiable y actualizada obtenida de la combinación de la aplicación del conocimiento que en la actualidad se tiene acerca del comportamiento agregado del estuario y de información de pronóstico de vientos y descargas fluviales del Delta del Río Paraná.

Se espera brindar así una herramienta adicional a los tomadores de decisiones con la que evaluar medidas y alternativas ante un rango amplio de situaciones eventualmente conflictivas.

3. Metodología e información disponible

3.1 Desarrollo del modelo numérico

El modelo numérico fue desarrollado empleando el programa *Delft3D* de *Deltares*, que permite resolver las ecuaciones de Navier Stokes para aguas poco profundas empleando el método de diferencias finitas.

En particular, se utilizó una malla curvilínea ortogonal bidimensional con tal de lograr una resolución espacial variable a lo largo del dominio de cálculo (Figura 2) con tal de economizar costo computacional sin sacrificar precisión. En

la región norte del dominio, lindando con el Frente del Delta del Río Paraná, la resolución ronda los 200 m, mientras que, al sur, a lo largo de la frontera abierta sobre el océano, la misma se encuentra alrededor de los 2 km.



Figura 2: Extensión superficial del dominio de cálculo.

Sobre la frontera abierta sur se impone como forzante únicamente la marea astronómica en puntos alejados entre sí aproximadamente 40 km. Para ello se consideraron 14 componentes armónicas de marea astronómica, seleccionándolas de manera tal que sumadas describan buena parte de la amplitud total de la región. Se tuvo especial cuidado en considerar las 8 componentes armónicas principales en el Río de la Plata, a saber: M_2 , O_1 , N_2 , K_1 , S_1 , S_2 , Q_1 y M_4 (Fernández, 2011). La

información empleada surge del modelo global de marea astronómica FES2014.

La ubicación de la frontera sur, y por ende la extensión superficial del dominio de cálculo sobre el océano adyacente, se definió considerando los siguientes tres factores: En primera instancia, la necesidad de disponer de información sobre las componentes armónicas que fuerzan dicho borde extraída del modelo global sin grandes interferencias producto de las costas y los efectos de las aguas poco profundas que caracterizan al Río de la Plata.

En segundo lugar, se buscó que el modelo abarque cierta región oceánica donde puedan desarrollarse en cierto grado ondas de tormenta al darse allí eventos meteorológicos de importancia. Este punto es relevante dado que las ondas de tormenta se propagan aguas arriba por el Río de la Plata como ondas de Kelvin (Santoro, 2011), lo que implica que pueden recorrer grandes distancias, por lo que puede darse el caso de que, debido a tormentas en regiones oceánicas lejanas respecto al Río de la Plata Superior lleguen a tal región ondas de amplitud importante sin que allí haya vientos que aparentemente las justifiquen, que en un modelo corto no lograrían reproducirse en la mayoría de los casos. Sumado a lo referido a la propagación de

ondas de Kelvin, recortar el modelo en la dimensión longitudinal del Río de la Plata implicaría subestimar el *fetch* que los vientos provenientes de la dirección sudeste tienen, por lo que se subestimaría también con seguridad el ascenso de nivel que dichos vientos provocan en el Río sobre las costas argentinas.

Por último, y contrarrestando en cierta medida a los dos factores antes mencionados que sugieren la conveniencia unívoca de una gran extensión del modelo sobre el océano, se encuentra la realidad de que, a un incremento de la extensión superficial del dominio de cálculo, asumiendo una resolución espacial constante, el costo computacional de cada simulación se incrementa sensiblemente.

Debido a este tercer elemento es que se propone para el modelo numérico operativo de pronóstico un único dominio de cálculo de resolución espacial variable en vez de los modelos anidados que suelen emplearse de acuerdo al estado del arte para representar la hidrodinámica en el estuario (ver por ejemplo Fosatti, 2013; Santoro, 2011; Fernández, 2011). En dichos modelos, el forzante astronómico se emplea en un modelo de baja resolución espacial, pero de gran extensión superficial en el que se fuerza al sistema tanto con fuerzas astronómicas

como con los fenómenos meteorológicos. Luego, el modelo local, de mejor resolución, toma del primero como condición de borde series de niveles; de esta manera se garantiza la transmisión al modelo local de prácticamente la totalidad de las ondas de tormenta a costa de un esfuerzo computacional importante. Empleando un único modelo de menor extensión se espera poder compensar la pérdida de información reproducida con un menor tiempo de simulación necesario para desarrollar pronósticos.

A lo largo de la frontera norte del dominio se definieron los bordes abiertos que representarán a los principales tributarios al Río de la Plata. Aquellos brazos del Río Paraná que fueron considerados son: el Luján, el San Antonio, el Canal del Este, el Paraná de las Palmas, el Paraná Mini, el Barquita, el Barca grande, el Sauce, el Paraná Guazú, el Paraná Bravo y el Gutiérrez. Todos los cursos recién mencionados serán forzados con series horarias de caudal obtenidas del modelo operativo de pronóstico del Delta del Río Paraná desarrollado por el Programa de Hidráulica Computacional del Instituto Nacional del Agua.

Dichas series tienen un horizonte de pronóstico de 4 días; en caso de que se busque pronosticar un mayor intervalo

de tiempo el estado del Río de la Plata se considerará para los días siguientes el promedio de las series iniciales. Este cambio en el forzante de la descarga fluvial no tiene gran incidencia en el comportamiento agregado del estuario dado que el régimen de descarga continental no es un factor de gran peso frente a las mareas presentes. Para el Río Uruguay se considera un caudal constante igual a $4.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sobre las fronteras cerradas del modelo (es decir, aquellas que representan un límite del estuario con la costa) se establece una condición de impermeabilidad que impide la presencia de velocidad normal a tierra. En lo referido a la velocidad tangencial en aquellos puntos, se permite su existencia ignorando los efectos de la fricción dada la escala del estuario respecto a sus bordes.

En lo que respecta a las condiciones de borde sobre el lecho y en la superficie libre de agua, los planteos son análogos en tanto para ambos casos se fija para dichas profundidades ($\sigma = -1$ y $\sigma = 0$, respectivamente de acuerdo al sistema de coordenadas vertical empleado en la discretización) el valor de los esfuerzos de corte presentes debido, en sendos casos, a la fricción producto del flujo contra el lecho y a la producida por la presencia de vientos sobre la superficie.

Para el primer valor se emplea el coeficiente de Manning, mientras que, para el segundo, se adopta como coeficiente de arrastre debido al viento una función definida por tres tramos lineales.

Para forzar la condición de borde sobre la superficie del agua se emplea el pronóstico con horizonte de hasta 16 días de los campos de viento en direcciones E-O y S-N emitido por el GEFS (*Global Ensemble Forecast System*) en una malla equiespaciada de resolución espacial igual a $0,25^\circ$. El paso temporal del pronóstico es de 3 horas para los primeros 10 días, mientras que, para los restantes, de 6 horas. Dicho modelo emite nuevos pronósticos cada 6 horas. En lo que respecta a la presión atmosférica, se considera uniforme y constante igual a 1013 hPa .

Tanto el pronóstico de vientos como el de las series de caudal en los tributarios al Río de la Plata son los *inputs* requeridos por el modelo de pronóstico. Para cada simulación que se ejecute del modelo de pronóstico del Río de la Plata se ejecuta una rutina de descarga de estos datos y se los lleva al formato requerido por el *software*. Una vez llevada a cabo la simulación los resultados son extraídos y enviados a la base de datos de Alerta Meteorológica del Instituto

Nacional del Agua. Cada simulación genera además un archivo de reinicio al intervalo de tiempo de emisión del pronóstico que servirá como condición inicial para la simulación siguiente. El esquema de funcionamiento recién descrito se esquematiza en la Figura 3.

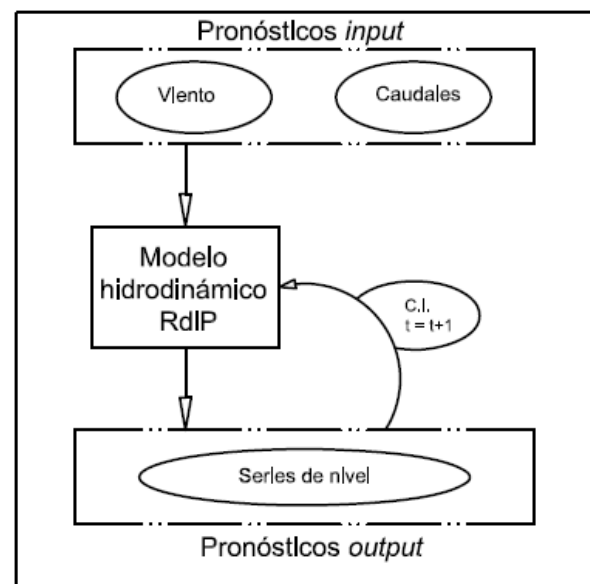


Figura 3: Esquema de funcionamiento del modelo de pronóstico.

Actualmente el modelo emite un nuevo pronóstico cada 24 horas con un horizonte de 10 días, pero la estructura informática que lo rodea tiene la flexibilidad suficiente para poder modificar dichos parámetros fácilmente.

3.2 Información disponible para la calibración

La información de la que se dispuso a la hora de calibrar el modelo hidrodinámica se compone, por un lado,

de mediciones nivel del agua en distintos puntos del estuario (Figuras 4). Las mediciones realizadas en Colonia y Pilote Norden corresponden a la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP), mientras que las restantes fueron relevadas por la Dirección Nacional de Puertos y Vías Navegables. A dichas series observadas se les efectuó análisis armónico para determinar la amplitud y la fase de las componentes armónicas principales de marea astronómica a partir de las cuales se obtuvieron series predichas de marea astronómica.

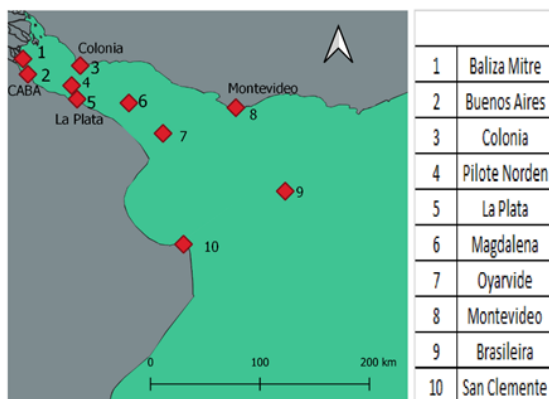


Figura 4: Puntos donde se dispone de datos de nivel.

Además, en los puntos indicados en la Figura 5 se han medido velocidades mediante el empleo de equipos ADCP a lo largo del segund semestre del 2009 así como también se tienen registros de velocidad del agua en Palermo. Con dicha información se construirán rosas de corriente para corroborar que el modelo represente correctamente los flujos de

agua no sólo en dirección sino también en magnitud.

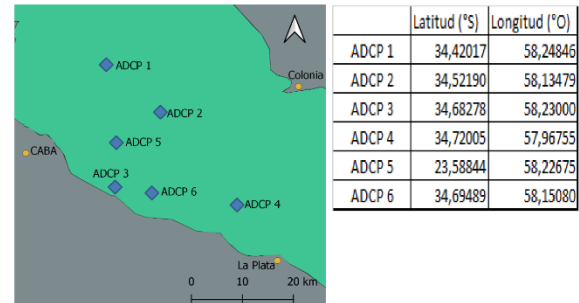


Figura 5: Puntos donde se han medido velocidades de corriente.

Por último, se tienen predicciones de pleamares y bajamares en distintos puertos del Río de la Plata, entre ellos Buenos Aires y Colonia del Sacramento, publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval.

3.3 Calibración

La calibración del modelo se llevó a cabo en dos partes: En primera instancia se determinó el coeficiente de Manning que mejor permitiera describir a la marea astronómica en la región. En esta primera etapa no se aplicó ningún forzante atmosférico. En la Tabla 1 se observan los indicadores estadísticos que resultan de comparar la serie predicha a partir de las componentes armónicas simuladas con las observadas en distintos puntos del Río de la Plata para un coeficiente de Manning igual a 0,017 (valor finalmente adoptado).

	SPEDS [%]	Correlación [-]	RMSE [M]	Nash [%]
Bs. As.	95,8	0,98	0,063	89,10
Colonia	96,8	0,98	0,049	82,91
Montevideo	86,6	0,95	0,042	89,73
San Clemente	97,9	0,99	0,053	97,24

Tabla 1: Indicadores estadísticos resultados de la calibración astronómica.

Por su parte, al comparar las pleamares y bajamares predichas por el Servicio de Hidrografía Naval con las predichas por el modelo, se obtuvo que la raíz del error cuadrático medio de la predicción del nivel de la pleamar en Buenos Aires relativo a la amplitud media es del 9,9 %, mientras que el mismo error al considerar las bajamares adopta un valor igual a 17,4%. Si se calcula el mismo error, pero analizando la hora para que el evento se produce, las pleamares en ese mismo puerto tienen un error de 22 minutos, mientras que las bajamares, de 40 minutos. En la Figura 6 se presenta el acuerdo entre ambas ondas predichas para una semana del año 2009.

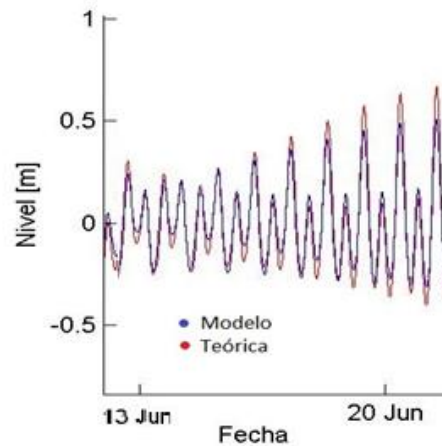


Figura 6: Acuerdo entre series predichas por el modelo y según observaciones.

En la segunda etapa de calibración, ya considerando no sólo los fenómenos astronómicos sino también los meteorológicos, se ensayaron distintas parametrizaciones del coeficiente de arrastre del viento en función del módulo de la velocidad del viento y se analizaron los mismos indicadores estadísticos que para la calibración astronómica. Para definir los puntos en los que resulta más conveniente *partir* a la función se trazaron las curvas de permanencia de velocidad del viento en distintos puntos del Río de la Plata. Con tal de poder modificar la función en rangos donde efectivamente se desarrolla la intensidad del viento en el estuario, se determinó que la función cambiará su pendiente a los 8 m/s y comenzará a ser constante a partir de los 25 m/s.

los vientos obtenidos del modelo global *Reanalysis II* desarrollado por el *NCEP* dado que, si bien no son aquellos que van a ser empleados en el pronóstico, lo que se busca es caracterizar la capacidad de acierto que el modelo tiene en lo referido a condiciones hidrodinámicas del Río de la Plata.

La Figura 7 muestra la comparación de las series de nivel simulada con la observada para fines del mes de enero del año 2018 en los puntos de Palermo y Brasileira. Se observa que, si bien en ciertos momentos ambas curvas se separan entre si significativamente, los extremos locales de nivel son bien representados por el modelo, por lo que se entiende que es apto para reproducir eventos de crecida y bajada en el Río de la Plata. Respecto a los indicadores estadísticos, en Brasileira por ejemplo Nash adopta un valor de 72,5%, la correlación 0,856, la raíz del error cuadrático medio, 32,7 *cm* y el SPEDS 88%.

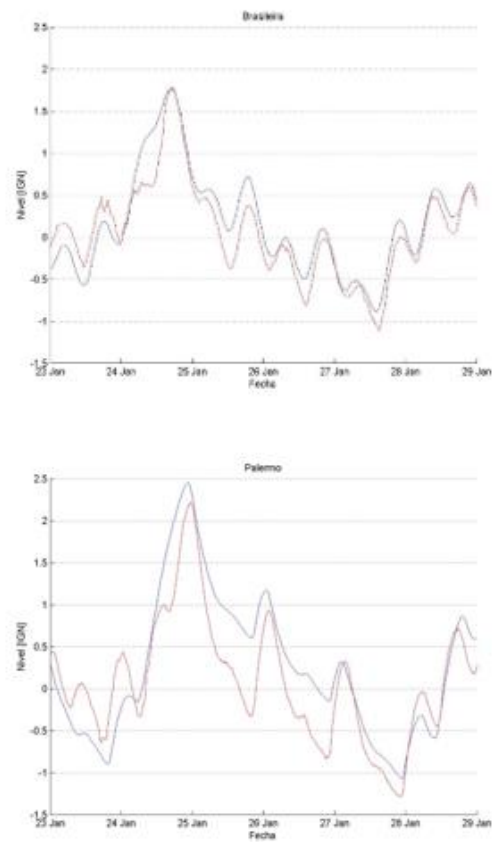


Figura 7: Series observadas y simuladas en Brasileira (arriba) y Palermo (abajo).

En lo que respecta a los campos de velocidad, la Figura 8 muestra las rosas de corriente simulada y observada en Palermo. Se observa que no sólo la dirección de la corriente está bien representada por el modelo sino también la intensidad de la misma.

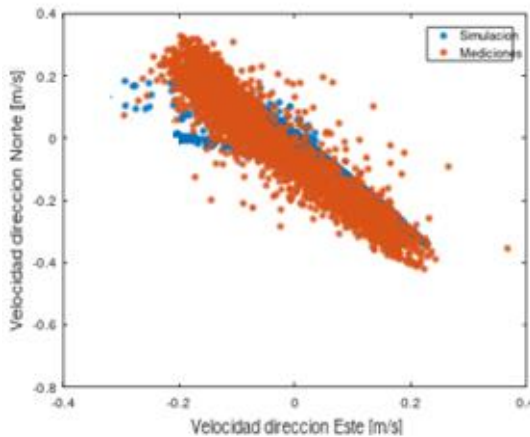


Figura 8: Rosas de velocidad simulada y medida en Palermo.

3. Resultados y discusión

A continuación, se comentan los primeros resultados que han sido obtenidos con el modelo simulando pronosticar niveles en el Puerto de Buenos Aires para la segunda quincena de julio del año 2021.

Para el análisis de los pronósticos obtenidos se propone el armado de series pronosticadas a diferentes horizontes temporales actualizadas luego de cada nueva emisión. De esta manera, se tendrán series de pronóstico a 1 día, 2 días, etc. La Figura 9 muestra las series pronosticadas en Buenos Aires para distintos horizontes temporales comparadas con los niveles del Río para dicho intervalo de tiempo. Por un lado, se observa una tendencia a subestimar la amplitud de la marea parte de ambas series pronosticadas, aunque la fase está correctamente representada en ambos

casos. Además, cabe resaltar la poca variación relativa entre ambos pronósticos, lo que implica que los pronósticos *input* empleados no varían sensiblemente entre ambos horizontes temporales.

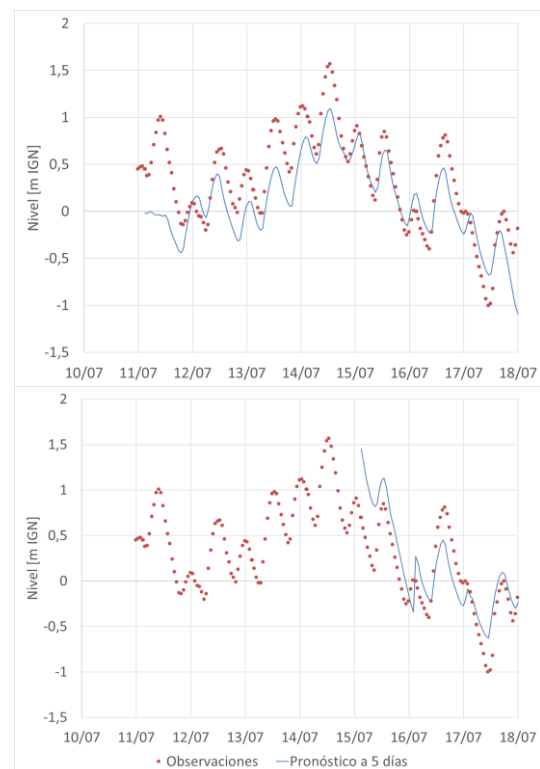


Figura 9: Pronósticos a 1 (arriba) y 5 (abajo) días para Buenos Aires para una semana de Julio de 2021.

En lo que respecta al error cometido por el modelo de pronóstico, la Figura 10 muestra la diferencia entre los niveles pronosticados y los observados en Buenos Aires para series pronosticadas con horizontes de entre 1 y 5 días. Se distingue una clara tendencia del modelo a subestimar los niveles del Río de la Plata con errores que mayoritariamente

oscilan entre los 20 y 50 *cm*, aunque se observan errores puntuales que rondan el metro. Por su parte, la sobreestimación del nivel del agua alcanza valores sensiblemente menores que rondan los 25 *cm*, con extremos de 50*cm*.

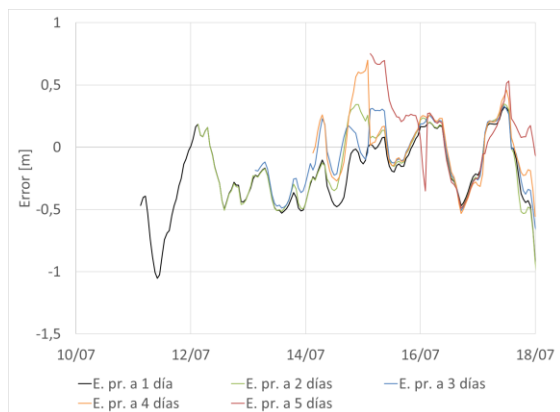


Figura 10: Errores obtenidos en con distintos horizontes de pronóstico.

De los errores calculados, cabe destacar que al incrementar el horizonte temporal de pronóstico la magnitud del error se mantiene sin grandes variaciones, lo que implicaría que incluso tomando horizontes relativamente extensos el pronóstico obtenido es en cierta medida confiable.

El hecho de que haya una clara tendencia en el error cometido por el pronóstico lleva a suponer que debería recalibrarse la parametrización de los coeficientes de arrastre empleando el modelo global de información de pronóstico. Además, no se descarta la incorporación al esquema de

funcionamiento del modelo un módulo de post procesamiento que corrija las series simuladas a partir de los errores habidos en simulaciones previas.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se han mostrado los primeros pasos del desarrollo de un modelo de pronóstico de niveles del Río de la Plata a partir de un modelo de relativo bajo costo computacional que permite hasta ahora reproducir con cierta certeza las condiciones hidrodinámicas del Río de la Plata de manera retroactiva.

En lo que a pronóstico respecta, se desarrolló la interoperabilidad necesaria entre distintas fuentes de información y equipos informáticos y se comenzó a operar el modelo automático de pronóstico. A partir de estos primeros resultados, resta comenzar a mejorar la precisión.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la calidad del pronóstico generado por el modelo seguirá siendo afinada para poder obtener datos cada vez más confiables que permitan hacer uso de ellos.

Adicionalmente a acondicionar el modelo numérico del Río de la Plata al nuevo modelo global de vientos pronosticados, no debería descartarse la

incorporación de herramientas matemáticas de post procesamiento que permitan acondicionar las series pronosticadas por el sistema en desarrollo según lo que resultare de la comparación de lo pronosticado con lo observado en un intervalo de tiempo empleado como validación.

5. Bibliografía

- [1] Fernández, M. (2011). *Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del océano Atlántico* (tesis de maestría). Universidad de la República, Uruguay.
- [2] Fosatti, M. (2013). *Dinámica global de sedimentos finos en el Río de la Plata* (tesis doctoral). Universidad de la República, Uruguay.
- [3] Lecertua, E. (2010). *Análisis de riesgo de duración de inundaciones en las áreas costeras del Río de la Plata considerando Cambio Climático* (tesis de grado). Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- [4] Santoro, P. (2011). *Estudio de la marea meteorológica en el Río de la Plata* (tesis de maestría). Universidad de la República, Uruguay.