

Web platform for the calculation of astronomical tide predictions: Implementation for the Buenos Aires maritime coast and its continental shelf

Fernando A. Oreiro, Ing. Geodesta-Geofísico¹ , Mónica M.E. Fiore, Lic. en Oceanografía²
^{1,2}Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Argentina, foreiro@fi.uba.ar, mfiore@gmail.com
^{1,2}Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa, Argentina

The astronomical tide is a phenomenon that influences complex physical and dynamic processes in the ocean, and practical problems such as port access for ships and the determination of nautical chart datums. Nonspecialized users who require accurate tide predictions for the Argentine coast have only the 51 locations published by the Naval Hydrographic Service in its Tide Tables. This paper describes the operation of the web platform that allows obtaining accurate astronomical tide predictions for any location by entering only the date and the geographic coordinates of interest. The ease of access to the predictions is achieved through the optimization of the calculation for web queries, and the modeling of this phenomenon through empirical or hydrodynamic models. As an example, the region comprising the Buenos Aires maritime coast and its adjacent continental shelf is developed, where the amplitudes and epochs necessary for the calculation of the predictions are obtained from the result of the implementation of the ADCIRC hydrodynamic model for the area, in-situ observations and satellite altimetry.

Keywords—astronomical tide predictions, web platform, Buenos Aires maritime coast

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Plataforma web para el cálculo de predicciones de marea astronómica: Implementación para el litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental

Fernando A. Oreiro, Ing. Geodesta-Geofísico¹, Mónica M.E. Fiore, Lic. en Oceanografía²
^{1,2}Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Argentina, foreiro@fi.uba.ar, mfiore@gmail.com
^{1,2}Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa, Argentina

La marea astronómica es un fenómeno que tiene influencia en complejos procesos físicos y dinámicos del océano, y en problemas prácticos como el acceso a puerto de las embarcaciones y la determinación de los ceros de las cartas náuticas. Los usuarios no especializados que requieren predicciones precisas de marea para la costa argentina sólo disponen de las 51 ubicaciones que publica el Servicio de Hidrografía Naval en sus Tablas de Marea. En este trabajo se describe el funcionamiento de la plataforma web que permite obtener predicciones precisas de marea astronómica para cualquier ubicación, ingresando únicamente la fecha y la coordenada geográfica de interés. La facilidad de acceso a las predicciones se logra a partir de la optimización del cálculo para consultas web, y de la modelización de este fenómeno a través de modelos empíricos o hidrodinámicos. Se desarrolla como ejemplo la región que comprende el litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental adyacente, en donde las amplitudes y fases necesarias para el cálculo de las predicciones se obtienen del resultado de la implementación del modelo hidrodinámico ADCIRC para la zona, de observaciones in-situ y de altimetría satelital.

Keywords—predicciones de marea astronómica, plataforma web, litoral marítimo bonaerense.

I. INTRODUCCIÓN

La marea astronómica modifica la altura de la superficie del océano en forma periódica, debido a que se genera casi completamente por los movimientos relativos de la Luna y el Sol, respecto de la Tierra [1], [2], [3]. Tiene influencia en complejos procesos físicos y dinámicos que ocurren en el océano [4], [5], [6], [7], en la producción pesquera [8] y en el nivel de inundación cuando se combina con ondas de tormenta [9]. Desde el punto de vista de la navegación, es fundamental en la determinación de los ceros de las cartas náuticas [10], y en el acceso a puerto de las embarcaciones [11]. Las predicciones precisas de marea astronómica son necesarias para estudios científicos y para aplicaciones prácticas en el medioambiente marino, como la planificación de construcciones costeras, la determinación de zonas inundables, el modelado de la dispersión de contaminantes y la estimación de energía mareomotriz.

Los usuarios no especializados que requieren predicciones precisas de marea para la costa argentina sólo disponen de las

51 ubicaciones que publica el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) en sus Tablas de Marea [12]. La Fig. 1 muestra la ubicación de los puertos patrón que se publican en las Tablas de Marea, en donde se pueden identificar extensas regiones sin predicciones disponibles. Los usuarios que requieren información en estas regiones, deben obtenerla aplicando algún método de interpolación que no suele devolver resultados precisos.

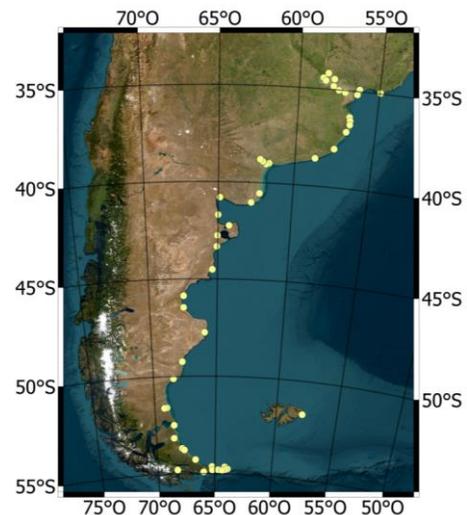


Fig. 1 Ubicación de los puertos patrón que se publican en las Tablas de Marea.

Existen otros métodos para obtener predicciones de marea astronómica que requieren que el usuario realice sus propios cálculos utilizando las amplitudes y fases de las ondas componentes, que pueden obtenerse de modelos globales o regionales de marea. En los últimos años se desarrollaron modelos globales de los que se pueden obtener constantes armónicas para calcular predicciones de marea astronómica, como el “Goddard Ocean Tide model” (GOT) [13], el OSU TPXO Tide Model (TPXO9) [14], el Finite Element Solution (FES2014b) producido por Noveltis, Legos y CLS, y distribuido por Aviso+ con apoyo de Cnes (<https://www.aviso.altimetry.fr/>) y el Empirical Ocean Tide model (EOT) [15]. Muchos de estos modelos se actualizan periódicamente para mejorar su performance, sin embargo, en las cercanías de las costas continúan siendo menos precisos que en el resto del océano debido a diferentes motivos, como su resolución, la incertidumbre en la batimetría y la línea de costa,

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

la calidad y cantidad de datos de marea asimilados o a una inadecuada elección de las componentes de marea a incluir que son características de cada zona [16], [17], [18], [19], [20]. Existen también modelos de marea para algunas regiones de Argentina, como los desarrollados por [21], [22], [23], [24], [25]. El usuario que desee obtener predicciones de marea astronómica utilizando alguno de estos modelos, así como implementar su propio modelo hidrodinámico, debe tener conocimientos específicos en el tema junto con un hardware dedicado. Esto reduce considerablemente la cantidad de usuarios que pueden acceder a predicciones precisas entre las ubicaciones que publica el SHN.

En este trabajo se describe el funcionamiento de la plataforma web que permite obtener predicciones precisas de marea astronómica para cualquier ubicación, ingresando únicamente la fecha y la coordenada geográfica de interés. La facilidad de acceso a las predicciones se logra a partir de la optimización del cálculo para consultas web, y de la modelización de la marea a través de modelos empíricos o hidrodinámicos desarrollados por la Sección Mareas del SHN. Se utiliza como ejemplo a la región que comprende el litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental adyacente, en donde las amplitudes y fases necesarias para el cálculo de las predicciones se obtienen del resultado de la implementación de un modelo hidrodinámico para la zona, de observaciones in situ y de altimetría satelital.

II. ZONA DE ESTUDIO

El litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental adyacente se encuentran al este de la costa sudamericana, aproximadamente entre los 36°S y 41°S (Fig. 2). Esta región es el área de mayor actividad pesquera de la Argentina [26], y debido a su ubicación geográfica, sobre sus costas se ubican las localidades balnearias más visitadas del país [27]. Además, en la zona se ubican las Bases Navales Mar del Plata y Puerto Belgrano de la Armada Argentina, y funcionan importantes puertos como el de Mar del Plata, Quequén, y los localizados en el estuario de Bahía Blanca, que movilizan millones de toneladas de carga anualmente a través de embarcaciones de gran porte [28]. Por diferentes motivos, todos los factores indicados requieren de predicciones precisas de marea astronómica. En esta región, las Tablas de Mareas [12] cuentan con solo 13 ubicaciones sobre la costa atlántica bonaerense, para las cuales se informan horarios y alturas de pleamares y bajamares (Fig. 2). En algunos casos la distancia entre predicciones supera los 200km, y la amplitud media de marea se duplica, como ocurre entre Puerto Quequén (1.80m) y Monte Hermoso (3.60m).



Fig. 2 Límite de la zona de estudio (amarillo) con la ubicación de los puertos patrón que se publican en las Tablas de Marea

III. REPRESENTACIÓN DE LA MAREA ASTRONÓMICA

La marea astronómica puede representarse como una sumatoria de ondas de períodos conocidos, siguiendo a (1):

$$h(t) = Z_0 + \sum_{i=1}^n H_i \cdot f_i \cdot \cos[V_i \cdot t + (V_0 + u)_i - G_i] \quad (1)$$

donde $h(t)$ es la altura del agua en el tiempo t ; Z_0 es el nivel medio del agua respecto del plano de reducción de sondajes seleccionado; el subíndice i corresponde a cada onda que se utiliza; H_i , f_i , V_i y G_i son la amplitud, factor nodal, velocidad y fase de la onda i , respectivamente; $(V_0 + u)_i$ es el argumento de equilibrio de la onda cuando $t=0$; n es la cantidad de ondas utilizadas.

El argumento de equilibrio y el factor nodal dependen de la posición relativa de la Luna y el Sol respecto de la Tierra, lo que hace que su valor varíe en el tiempo, pero sea el mismo para cualquier ubicación en el mundo para un instante determinado. Para optimizar el cálculo de la predicción de marea que se realiza en la plataforma web, se utilizan tablas calculadas previamente del argumento de equilibrio y del factor nodal para cada inicio de mes, similares a las publicadas por [2]. Luego, el argumento de equilibrio se actualiza al instante de cálculo a través de la velocidad de cada onda. Esta metodología reduce el tiempo de cómputo de las predicciones ya que evita tener que calcular para cada tiempo de interés, los argumentos de equilibrio y los factores nodales de todas las ondas. Por otra parte, al utilizar tablas mensuales, y no anuales, se asegura que el error en la predicción que se genera por utilizar la velocidad en vez de realizar el cálculo directo, se ubique por debajo del centímetro. Para obtener la variación de la altura del agua se necesita conocer, además, las amplitudes y fases de las ondas seleccionadas para todo el dominio, que se consideran constantes en el tiempo. En la plataforma web estas constantes se almacenan representando celdas de tamaño regular que cubre todo el dominio, con los valores para cada

onda. El tamaño de cada celda, que define la resolución espacial del modelo, se determina a partir de las características de la variación de la altura del agua en el dominio, buscando que la diferencia de la marea entre celdas contiguas para un mismo instante sea pequeña o incluso despreciable. Para la implementación en el litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental se utilizan celdas regulares de 500 m de lado, definidas proyectando el dominio en la proyección Transversa Mercator. Se obtienen las coordenadas de los centros de cada celda, y se genera una base de datos en la que se almacena, para cada centro, las amplitudes y fases de cada onda que se utiliza. Con estos valores se calculan las predicciones para cualquier ubicación que se encuentre dentro de cada celda, cubriendo completamente el dominio. El almacenamiento de las amplitudes y fases en bases de datos agiliza notablemente la recuperación de la información y el cálculo de la predicción.

Las amplitudes y fases que se asignan a cada celda regular del dominio se obtienen a través del modelado hidrodinámico de la marea. Para ello, en primer lugar, se definen las características geográficas de la zona de estudio a través de la batimetría, la línea de costa y el borde abierto. Con esta información se genera una grilla irregular sobre la que se resuelven las ecuaciones del modelo seleccionado. El borde abierto, ubicado en el océano, se fuerza con constantes armónicas de marea obtenidas de modelos globales. La calibración del modelo hidrodinámico se realiza utilizando constantes armónicas obtenidas de observaciones in-situ y de altimetría satelital, que se comparan con las constantes que se obtienen a través de análisis armónico del resultado de cada corrida para las mismas ubicaciones. Luego de completar la calibración, se calculan las amplitudes y fases de las ondas seleccionadas para todos los nodos de la grilla irregular. Finalmente, se calculan las constantes armónicas de la grilla regular, que se utiliza en el modelo de predicción, aplicando el método de interpolación Kriging, utilizando los datos de la grilla irregular.

IV. IMPLEMENTACIÓN PARA EL LITORAL MARÍTIMO BONAERENSE Y SU PLATAFORMA CONTINENTAL

A. Datos

La Sección Mareas del SHN desarrolla modelos de marea astronómica de alta resolución para diferentes regiones de Argentina, calculando las amplitudes y fases de las ondas más importantes a partir de diferentes fuentes de información. En el caso del modelo del litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental, se utilizaron amplitudes y fases de Monte Hermoso (MH), San Blas (SB) y Río Negro (RN), (Fig. 3), y observaciones in-situ de 9 estaciones cuya ubicación geográfica, período, intervalo de muestreo, cantidad de observaciones y origen se muestra en la Fig. 3 y en la Tabla I. Para las ubicaciones con observaciones in-situ se obtienen las amplitudes y fases siguiendo a [17].

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES IN-SITU UTILIZADAS

Ubicación	Período	Muestreo (min)	Cant. de obs.	Origen
(1) San Clemente	01/03/1987 31/07/2020	60	145134	SHN
(2) Santa Teresita	01/11/2003 14/11/2017	60	85564	SHN
(3) Mar de Ajó	01/12/1974 30/11/1984	60	79525	SHN
(4) Pinamar	01/08/1974 31/03/1984	60	76544	SHN
(5) Mar del Plata	02/01/1956 31/10/2021	60	557120	SHN
(6) Quequén	01/05/2008 10/11/2021	30	222822	Puerto Quequén
(7) Torre	17/11/2005 30/09/2021	30	251206	Pto. Bahía Blanca
(8) Puerto Belgrano	17/11/2005 30/09/2021	30	252668	Pto. Bahía Blanca
(9) Ing. White	17/11/2005 30/09/2021	30	257137	Pto. Bahía Blanca

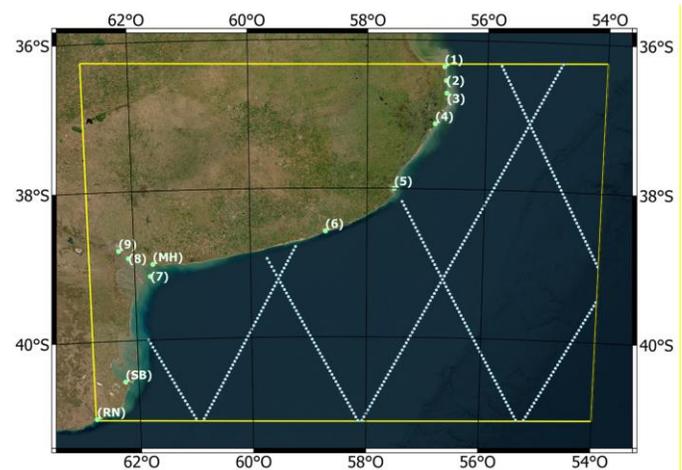


Fig. 3 Ubicación geográfica de las estaciones costeras (TABLA I) y de los centros de los círculos utilizados para agrupar las observaciones de altimetría satelital de las misiones TP, J1, J2 y J3 para obtener constantes armónicas.

Se utilizan además Anomalías del Nivel del Mar (ANM) de Nivel-2+ (L2P) producidas y distribuidas por Aviso+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>), de las misiones TOPEX/Poseidon (TP), Jason 1, 2 y 3 (J1, J2 y J3), a las que se les reincorpora la corrección por marea, para el período 1992-2021. Las ANM se reagrupan en áreas no superpuestas delimitadas por círculos, de aproximadamente 3km de radio, centrados en el eje de las trazas principales. El radio se elige para evitar incluir en un mismo círculo 2 mediciones consecutivas de los altímetros, considerando el muestreo de 1Hz. Aplicando esta metodología se obtienen 369 círculos sobre las trazas principales que cubren el área de estudio (Fig. 3). A partir de los datos que encierra cada círculo se generan series de altura del agua que se utilizan para calcular las amplitudes y fases de las 123 ondas definidas en [29], a través de análisis armónico siguiendo nuevamente a [17]. Las constantes armónicas obtenidas de las estaciones in-situ y de

altimetría satelital se utilizan para calibrar y validar la implementación del modelo hidrodinámico ADvance CIRCulation model (ADCIRC) [30] en el área de estudio.

El modelo ADCIRC utiliza una solución continua de la Generalized Wave Continuity Equation (GWCE), y se ha descrito en detalle su formulación y parametrización en numerosas publicaciones [30], [31], [32], [33]. El modelo utiliza el método de elementos finitos, para discretizar espacialmente el dominio, y el método de las diferencias finitas para resolver las ecuaciones de aguas poco profundas. La formulación a través de elementos finitos modeliza el dominio utilizando una grilla de triángulos irregulares de tamaño variable, permitiendo incrementar la cantidad de nodos en zonas complejas como la costa sudoeste del área de estudio. Para calcular la marea astronómica, las corridas se realizan utilizando la implementación bidimensional integrada en profundidad.

El modelo hidrodinámico necesita la descripción de las características geográficas del dominio, que incluyen a la línea de costa, el borde abierto y la batimetría. Para obtener la línea de costa se utilizan imágenes satelitales ópticas de las misiones Landsat 8 y Sentinel 2, aplicando la metodología desarrollada por [34]. Con esta metodología se identifica la región intermareal en todo el dominio, definida como la superficie que se cubre en pleamar y se descubre en bajamar, y se utiliza la curva de bajamar para definir a la línea de costa, teniendo en cuenta que solo se incluye a los canales que tengan un ancho mayor a 500 m. La Fig. 4 muestra un ejemplo del procesamiento realizado para el sector sudoeste del dominio, donde se encuentra la mayor complejidad para determinar la línea de costa.

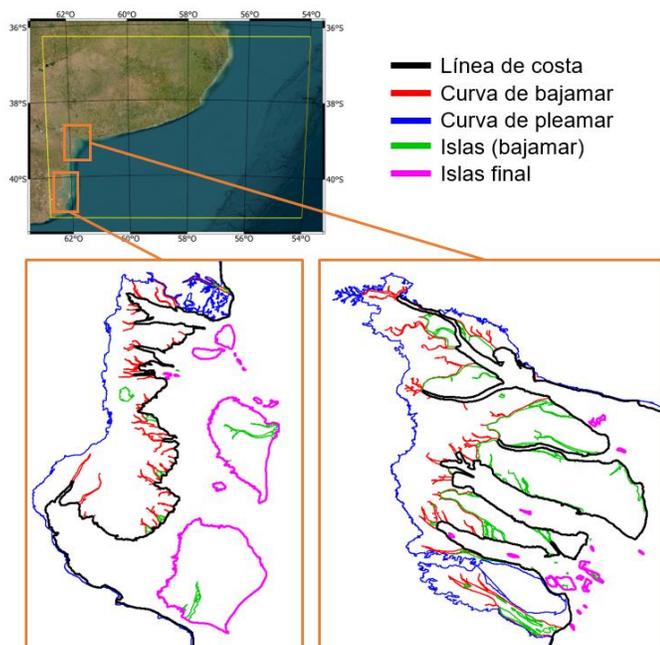


Fig. 4. Curvas de pleamar (azul) y bajamar (rojo y verde) identificadas en la región sudoeste del dominio, y determinación de la línea de costa final para el modelo hidrodinámico (negro y rosa).

La batimetría se obtiene a partir de las profundidades de 14 cartas náuticas electrónicas y 23 cartas náuticas papel argentinas que cubren el dominio, cuya distribución espacial se muestra en la Fig. 5. Estas profundidades se refieren al nivel medio del mar utilizando los datos del cuadro de marea de cada carta. La densidad de profundidades disponibles en las cartas náuticas no es homogénea en el área de estudio, y regiones con características batimétricas relevantes, como el talud continental, presentan escasas profundidades, por lo que se utiliza, además, el modelo batimétrico global General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) de 15 segundos de arco (doi:10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f - <https://download.gebco.net/>), para complementar las profundidades disponibles (Fig. 5).

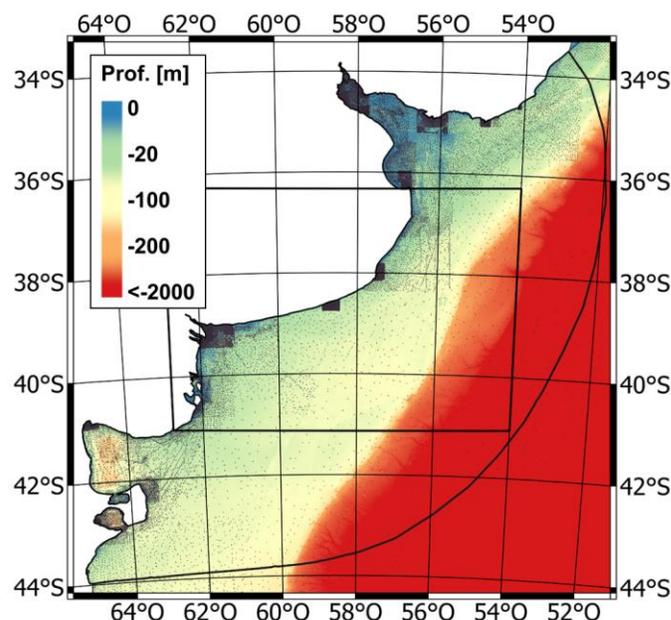


Fig. 5. Distribución de profundidades de las cartas náuticas (puntos) y batimetría del modelo GEBCO (color).

El modelo hidrodinámico ADCIRC requiere que las profundidades de los nodos de la grilla estén referidas al geode, por lo que se aplica una corrección adicional utilizando el modelo de nivel medio del mar MSS_CNES_CLS15, que fue producido por CLS y distribuido por Aviso+ (<https://www.aviso.altimetry.fr/>) y el modelo de geode EGM2008 [35], siguiendo a [36]. El borde abierto se determina buscando que la variación de la amplitud y la fase de la onda M2, a lo largo de su desarrollo, sea mínima. Para ello se utiliza la información disponible del modelo FES2014b. Las amplitudes y fases que se utilizan para forzar el borde abierto del modelo hidrodinámico se seleccionan evaluando los resultados que se obtienen utilizando las constantes del modelo FES2014b y del modelo TPX09 en los puntos de calibración.

B. Metodología

Para asignar las profundidades a los nodos de la grilla irregular se genera un modelo batimétrico que surge de la combinación de la información de las cartas náuticas y del modelo GEBCO. El modelo GEBCO puede presentar errores relacionados al datum y a la fuente de donde se obtuvieron las profundidades (modelos gravimétricos o relevamientos de buques), y los antecedentes de las cartas náuticas muestran que algunas regiones fueron relevadas hace más de 30 años. Teniendo en cuenta esto, para obtener el modelo batimétrico combinado se tuvieron que modificar los valores de las profundidades de alguna de las fuentes en el sector sudoeste del dominio. El ajuste aplicado fue de hasta el 15% del valor, para profundidades mayores a 20 m, y de hasta 3 m, para profundidades menores a 20 m. La asignación final de las profundidades a los nodos se realiza calculando un promedio de los valores del modelo batimétrico combinado que se ubican dentro del área de influencia de cada uno. Luego, las profundidades se refieren al geoide utilizando el modelo del nivel medio del mar y el modelo de geoide descriptos previamente.

La selección de las ondas que se utilizan para forzar el borde abierto está limitada por las ondas disponibles de los modelos FES2014b y TPXO9. Para seleccionar aquellas ondas que se consideran más importantes para el área de estudio se analiza a nivel regional su importancia calculando para cada celda del modelo FES2014b que cubre el dominio, el porcentaje que representa la amplitud de cada onda sobre la suma de la amplitud de todas las ondas. Se utiliza este modelo para el análisis por presentar la mayor cantidad de ondas (34). Luego se realiza un promedio de estos porcentajes sobre todas las celdas, y se seleccionan aquellas ondas que presentan un porcentaje promedio superior al 2%. Se realiza el mismo análisis sobre las estaciones in-situ, ya que representan a la región en donde algunas ondas pueden incrementar considerablemente su amplitud, y en donde los modelos presentan menor precisión. De los dos análisis se obtiene que las ondas que se van a utilizar para el modelo son la M2, K1, O1, N2, S2, SA, M4, L2, LA2, P1, Q1, NU2, K2 y MU2. De las ondas seleccionadas, la SA se descarta porque en el modelo global FES2014b presenta amplitudes menores a 5 mm para toda el área de estudio, lo que no coincide con la información de altimetría cercana al borde abierto, y luego de realizar las primeras corridas, tampoco coincide con la amplitud en las ubicaciones de calibración. La onda M4 tampoco se utiliza para forzar al modelo hidrodinámico, pero si se considera para el modelo final, ya que se espera que se genere a partir de la propagación de la onda M2 dentro del dominio.

La grilla sobre la que se calculan las alturas del agua se obtiene utilizando el software OceanMesh2D [37] a partir de la línea de costa, la batimetría y el borde abierto (Fig. 6), en donde el dominio del modelo hidrodinámico contiene al dominio del modelo final. El software se configura de forma que la distancia mínima entre nodos ocurra sobre la costa (200

m), y la máxima ocurra sobre el borde abierto (8000 m), con un suavizado del 10% en la densificación de la grilla. Además, se consideraron en la grilla las islas que presentan una superficie superior a 85.000 m². La grilla obtenida cuenta con 154400 nodos (Fig. 6)

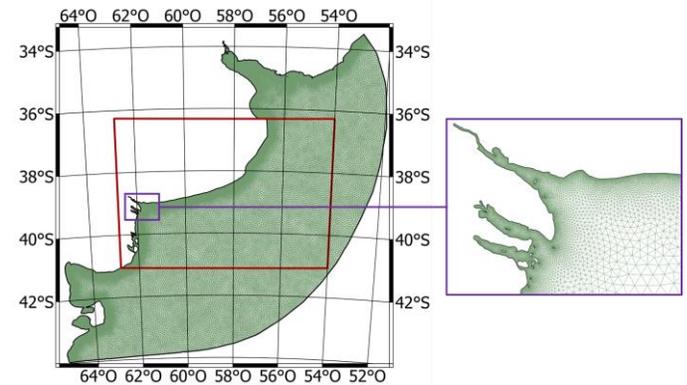


Fig. 6. Grilla irregular de triángulos de tamaño variable que utiliza el modelo hidrodinámico. Se destaca la zona de estudio (rojo) y a la derecha un detalle de la grilla en el estuario de Bahía Blanca.

Para realizar la calibración del modelo hidrodinámico se definieron las características de las corridas y luego se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo. Las corridas se realizaron utilizando la versión barotrópica, incluyendo a los términos advectivos, con un parámetro de Coriolis variable en el espacio, una parametrización cuadrática de la fricción de fondo, y un inicio “en frío” con un incremento paulatino en el forzamiento (rampa inicial) de 2 días. Las corridas se realizaron con un paso de tiempo de 5 segundos, para una extensión total de 400 días, de forma de evitar la contaminación de las componentes que se extraen de las series de altura del agua a través del análisis armónico, y de dar suficiente tiempo inicial, considerando el arranque “en frío”. Habiendo definido estas características, los parámetros sobre los que se realizaron las pruebas de sensibilidad fueron el coeficiente de fricción de fondo (FF) y la viscosidad Eddy horizontal. Los resultados de las corridas de sensibilidad mostraron que el modelo es fuertemente sensible al coeficiente de fricción de fondo, principalmente a partir de profundidades menores a 200 m, y que para valores de viscosidad Eddy horizontal de entre 1 m²/s y 20 m²/s no se identifican variaciones apreciables en los resultados. La calibración del modelo hidrodinámico se enfocó en la determinación del coeficiente de fricción de fondo para todo el dominio, utilizando una viscosidad Eddy horizontal constante de 10 m²/s.

El método de calibración del FF para las corridas implementadas se realiza comparando las constantes armónicas obtenidas de las estaciones in-situ y de altimetría satelital, con las constantes que se obtienen para las mismas coordenadas, utilizando los nodos más cercanos del modelo. Para ello, es necesario obtener las series de altura del agua de los nodos del modelo, luego obtener las amplitudes y fases a través de

análisis armónico, y finalmente interpolar en las coordenadas de los puntos de comparación la amplitud y fase de cada onda. Para poder realizar la validación del modelo final, se utiliza la mitad de los puntos disponibles de altimetría satelital para la calibración y posterior verificación del modelo hidrodinámico. Todas las estaciones in-situ se utilizan para la calibración y la verificación, debido a su escasa cantidad y a que su ubicación es determinante para definir el comportamiento del modelo sobre la costa. Las primeras simulaciones se realizan utilizando valores de FF constantes para todo el dominio, sin embargo, las diferencias obtenidas en las ubicaciones de control, principalmente en las estaciones in-situ, no permiten obtener predicciones precisas de marea. Por este motivo, se continuó con la calibración del modelo, definiendo al FF de forma variable en el dominio. Para ello, se modificaron los valores de este parámetro en cada nodo del dominio, considerando que las variaciones debían comprender una región y no ser puntuales o aisladas, que debía existir una continuidad entre valores cercanos, y que las modificaciones realizadas no debían presentar configuraciones geográficas complejas. Luego de completar cada corrida del modelo hidrodinámico con FF variable se calculan predicciones de altura del agua de 5 años de duración para todas las ubicaciones de calibración. Estas predicciones se obtienen utilizando amplitudes y fases que surgen de interpolar las constantes armónicas de los nodos de la grilla irregular, en estas ubicaciones. Las predicciones calculadas se comparan con las predicciones que se obtienen utilizando las amplitudes y fases de las observaciones in-situ y de altimetría satelital, y para cada ubicación de control se calcula el desvío estándar de la diferencia entre predicciones. La corrida que cumpla con que todos los desvíos estándar de las diferencias entre las predicciones sean menores a 0.10 m, es la corrida que se utiliza para el modelo final.

Para la obtención de la corrida que se utiliza en la aplicación web se utilizaron varias configuraciones de la distribución espacial del FF, principalmente en el sector sudoeste, y dentro del estuario de Bahía Blanca. Las ondas diurnas y semidiurnas presentaron mejoras en las diferencias de las constantes armónicas en las ubicaciones de control, pero la onda M4 no mostró cambios en la zona del estuario de Bahía Blanca. Si bien las diferencias de la onda M4 encontradas no superan los 0.07 m en amplitud, debido a la importancia que tiene esta onda en el estuario (0.22m en Ing. White, 0.16m en Puerto Belgrano), se utilizó la información de amplitud y fase de estas estaciones para ajustar las diferencias. La corrección se realizó interpolando las diferencias con el método de Shepard modificado, que fue factible de aplicar ya que la distribución espacial de los datos disponibles en esta región cubre el área desde la parte exterior, con la estación Torre, hasta el interior, a través de las estaciones de Puerto Belgrano e Ing. White. Cabe destacar que esta fue la única zona y la única onda en la que se realizó este tipo de ajuste.

Las amplitudes y fases de las ondas de la corrida que cumple con el criterio indicado anteriormente están ubicadas

geográficamente en los nodos de la grilla irregular que cubre el dominio. Para poder aplicar la metodología de cálculo de las predicciones de altura del agua que se utiliza en la aplicación web, es necesario almacenar esta información en celdas regulares. Luego de proyectar el dominio en la proyección Transversa Mercator y de cubrirlo completamente con celdas regulares de 500 m, se clasifican las celdas en “agua” o “tierra”. La clasificación de una celda como “agua” se realiza considerando que al menos la mitad de su superficie está cubierta por agua, utilizando la línea de costa del modelo hidrodinámico. Luego, para la coordenada central de cada celda clasificada como “agua” dentro del dominio, se calculan las amplitudes y fases de las ondas seleccionadas a través de interpolación por el método de kriging utilizando, como mínimo, los 20 nodos más cercanos de la grilla irregular de la corrida seleccionada. Se verifica la grilla regular comparando las amplitudes y fases en los puntos de calibración con los de la grilla irregular. La validación final se realiza utilizando la misma metodología aplicada para la selección de las corridas, pero a partir de las ubicaciones de altimetría satelital que no fueron utilizadas para la calibración ni para la verificación.

Los datos necesarios para la aplicación web se completan asignando al centro de cada celda regular el valor de nivel medio, que surge del Plano de Reducción de Sondajes (PRS) que corresponde según su ubicación. Si bien los PRS no tienen definidos sus límites oficialmente, la determinación se realiza utilizando la información disponible de estaciones que figuran en Cartas Náuticas y en las Tablas de Marea.

C. Resultados

La distribución espacial del FF de la corrida del modelo hidrodinámico seleccionada para calcular las predicciones en la aplicación web se muestra en la Fig. 7, y en la Fig. 8 se muestran los resultados de los desvíos estándar de las diferencias entre predicciones para esta corrida.

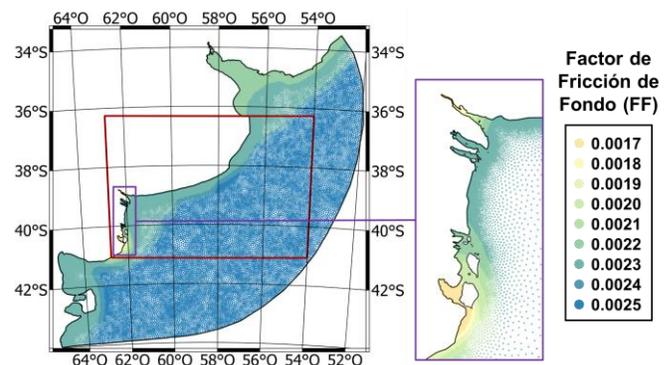


Fig. 7. Distribución espacial del Factor de Fricción de Fondo (FF) de la corrida seleccionada para la aplicación web.

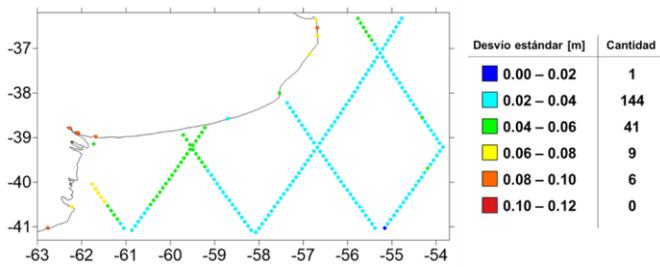


Fig. 8. Resultados de los desvíos estándar de las diferencias entre predicciones para la corrida seleccionada para la aplicación web.

El FF de la corrida seleccionada toma valores entre 0.0017 y 0.0025, ubicándose los valores más bajos en la región sudoeste del dominio, en el estuario de Bahía Blanca y en Bahía San Blas. Esta distribución del FF coincide con la encontrada por [38], quienes analizan el coeficiente de fricción de fondo en 2 estuarios, encontrando que en ambos casos el coeficiente toma valores inusualmente pequeños. Los valores de los desvíos estándar de la Fig. 8 pueden separarse según la cercanía que tienen a la costa y su profundidad. Las estaciones in-situ y las ubicaciones altimétricas cercanas a la costa, presentan amplitudes mayores, por lo que pequeñas diferencias en la fase generan desvíos estándar mayores. Por cuestiones de espacio, la Fig. 9 muestra las amplitudes y fases de la onda M2 para todos los nodos de la corrida del modelo hidrodinámico seleccionado para la zona de estudio.

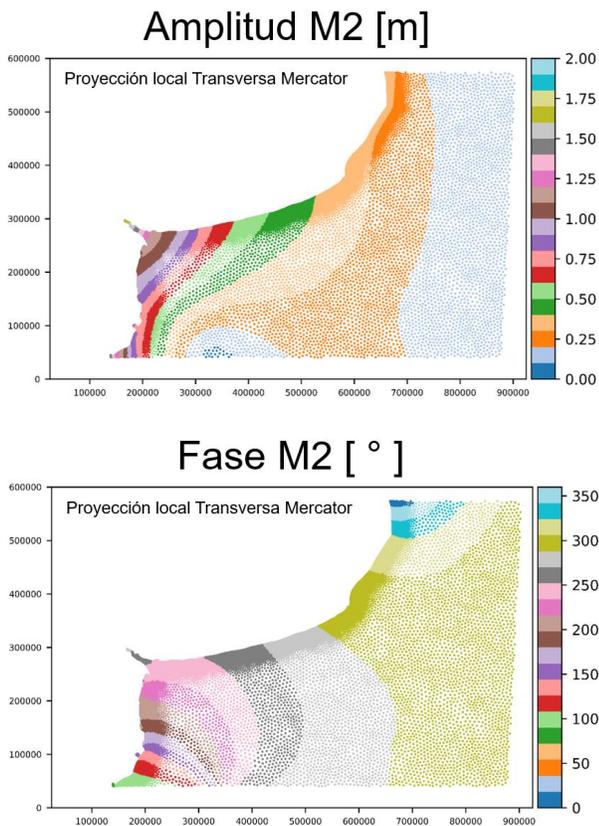


Fig. 9. Distribución espacial de las amplitudes y fases de la onda M2 en la zona de estudio.

La distribución geográfica de las amplitudes y las fases es similar entre las ondas diurnas y semidiurnas, pero la posición de los puntos anfidrómicos varía dentro del dominio, haciendo que los mínimos de cada onda se ubiquen en diferentes posiciones, y la dirección de avance varíe levemente, siendo la dirección predominante en todas las ondas de Sur a Norte. La onda con la amplitud predominante en todo el dominio es la M2, excepto en cercanías del punto anfidrómico. Los valores máximos de esta onda (1.67 m) se obtienen en el interior del estuario de Bahía Blanca, seguidos por la onda K1 (0.27 m) en la misma región.

Para utilizar los resultados obtenidos en la aplicación web, el dominio se divide en 1.690.600 celdas regulares de 500 m, de las cuales 63.493 corresponden a celdas que quedan fuera del límite geográfico, 592.566 celdas que corresponden a “tierra” o “islas” y 1.034.541 celdas que corresponden a superficies cubiertas por agua, que es en donde se calculan las predicciones. Luego de calcular la interpolación de las amplitudes y fases de cada onda para la coordenada del centro geográfico de cada celda “agua”, se verifican los resultados de la grilla regular comparando las amplitudes y fases en los puntos de calibración de la grilla irregular y de la grilla regular. Las diferencias encontradas son menores a 0.002 m en amplitud y a 0.5° en fase. La validación de la grilla regular se realiza calculando nuevamente el desvío estándar entre las predicciones, pero esta vez utilizando las constantes armónicas de los puntos de altimetría que no fueron utilizados para la calibración y las constantes que se obtienen de la grilla regular para las mismas coordenadas. La Fig. 10 muestra los resultados obtenidos, en donde se destaca que ninguno de los puntos de validación presenta desvíos estándar mayores a 0.10 m. En esta figura se identifican valores similares a los encontrados en los puntos de altimetría que se utilizaron para la calibración (Fig. 8), lo que permite validar el modelo en la región offshore del dominio.

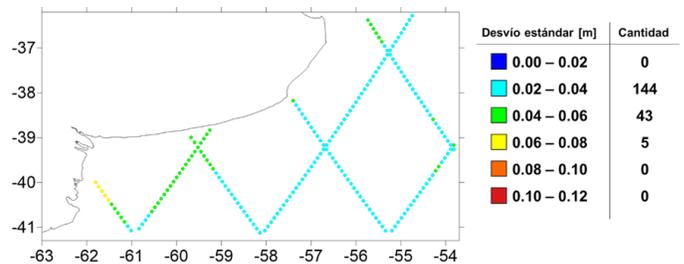


Fig. 10. Resultados de los desvíos estándar de las diferencias entre predicciones utilizando las amplitudes y fases de la grilla regular y los puntos de validación de altimetría satelital.

V. PLATAFORMA WEB PARA EL CÁLCULO DE PREDICCIONES DE MAREA

La disponibilidad de amplitudes y fases de las ondas más importantes para una determinada región no asegura el acceso a predicciones de marea astronómica de forma sencilla. Para ello, se debe aplicar (1) utilizando las constantes armónicas correspondientes a la ubicación seleccionada, y el factor nodal y el argumento de equilibrio para el tiempo elegido. El usuario final, que solo necesita conocer la variación de la altura del agua para una ubicación y momento determinados, no suele necesitar conocer los cálculos que se realizan para obtener las predicciones. Teniendo esto en cuenta, se desarrolla la plataforma web para el cálculo de predicciones de marea astronómica a la que se puede acceder a través de la página web del Servicio de Hidrografía Naval: <http://www.hidro.gob.ar/prediccion-marea/>. El objetivo de esta plataforma es permitirle al usuario acceder a predicciones donde no se dispone de este tipo de información, evitando que tenga que realizar cálculos complejos o interpolaciones aproximadas para conocer la altura del agua. La Fig. 11 muestra la página inicial para consultar las predicciones para el litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental, luego de aceptar las condiciones de uso.

En el costado izquierdo de la pantalla de inicio, se debe seleccionar en la parte superior la opción “Costa Atlántica Bonaerense”, y luego ingresar las coordenadas geográficas en forma manual, o bien seleccionando sobre el mapa de la derecha la ubicación de interés. Se ingresa la fecha para el cálculo de la predicción, la cantidad de días, y en caso de necesitarse, se puede incluir una corrección constante a todas las alturas predichas. Luego se presiona el botón “Calcular” y se accede a la página de resultados que se muestra en la Fig. 12. En esta figura se muestra la fecha y la zona elegida para las predicciones calculadas, la latitud y la longitud elegidas, y el nivel medio utilizado en las predicciones. Del lado derecho se muestran los valores máximos y mínimos que se obtienen de la predicción calculada, y debajo de esta información se muestra un gráfico con la curva de altura del agua calculada con los datos cada 15 minutos que se encuentran al final de la página.



Fig. 11. Página inicial de la aplicación web para consultar las predicciones de altura del agua debido a la marrea astronómica.



Fig. 12. Página de resultados de la aplicación web.

En la parte superior derecha de la página de resultados se muestran dos botones; uno de ellos permite descargar toda la información que se muestra en la página y el otro permite volver a la página de inicio para realizar otra consulta.

El conocimiento de la variación de la altura del agua debido a la marea astronómica para cualquier ubicación tiene impactos positivos sobre múltiples usuarios y actividades. En la pesca, por ejemplo, conocer esta variación permite seleccionar los períodos adecuados para realizar la captura. Las embarcaciones pueden utilizar los instantes de pleamar y bajamar para determinar su derrota aprovechando las corrientes de mareas y, en algunos casos, la altura del agua puede ser relevante para el acercamiento a la costa. Las actividades náuticas se podrán planificar utilizando la información de la ubicación en donde se van a desarrollar, y no la de la predicción más cercana. Por otra parte, si el modelo de marea se combina con la variación de la altura del agua debido a efectos meteorológicos, por ejemplo, utilizando el pronóstico que provee el Servicio de Hidrografía Naval, es posible estimar el nivel del agua que se espera para cada ubicación sobre la costa. Esta información resulta de gran interés ya que permitiría anticipar eventos extremos que pueden generar importantes daños.

VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El modelo de alta resolución de marea astronómica obtenido para el litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental adyacente, y su consulta a través de la plataforma web del Servicio de Hidrografía Naval, permiten a cualquier usuario acceder a predicciones precisas de marea astronómica en cualquier ubicación del dominio, ingresando solamente las coordenadas geográficas y la fecha de interés. La facilidad de acceso a este tipo de información es inédita para la región, y constituye un punto de partida para extender su aplicación a otras regiones.

La implementación del modelo hidrodinámico ADCIRC en la zona de estudio y su calibración a través de constantes armónicas obtenidas de estaciones in-situ y de altimetría satelital, permitieron conocer la distribución geográfica de 13

de las ondas más importantes para la región. Los modelos globales disponibles, así como los modelos regionales implementados en la región, no pueden consultarse de forma sencilla, y en algunos casos su resolución no es suficiente para describir adecuadamente a la marea astronómica en la zona de estudio.

La onda M4 presentó dificultades para su modelado en el estuario de Bahía Blanca, que fueron resueltas a través de otras metodologías de cálculo. Se realizaron pruebas preliminares para determinar el origen de las diferencias halladas, encontrando que la batimetría tiene un rol muy importante en la propagación de esta onda. Si bien se informaron cambios en la posición de algunos bancos en las cercanías del canal de acceso al estuario, la falta de disponibilidad de información batimétrica actualizada en el dominio dificulta el modelado de este tipo de ondas, principalmente en las regiones someras.

Las predicciones que se obtienen a través de la aplicación web presentan un tiempo de respuesta casi instantáneo debido al almacenamiento que se realiza de las amplitudes y fases de las ondas sobre una grilla regular, y a la utilización de tablas precalculadas de argumentos de equilibrio y factores nodales. Este método de cálculo puede aplicarse a cualquier modelo de marea que disponga de constantes armónicas almacenadas en grillas regulares.

La disponibilidad de un modelo de alta resolución para el litoral marítimo bonaerense y su plataforma continental es un aporte significativo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 y 14 de las Naciones Unidas (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>). Este modelo, además, podrá utilizarse como fuente de información de altura del agua, considerando las nuevas especificaciones de Información sobre el nivel del agua para la navegación de superficie de la Organización Hidrográfica Internacional para cartas náuticas electrónicas. Finalmente, su fácil acceso y uso garantiza que pueda ser consultado por cualquier persona que requiera este tipo de información.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al proyecto PIDDEF 10/20 del Ministerio de Defensa (República Argentina).

REFERENCIAS

- [1] D. Pugh, *Tides, Surges and Mean Sea-Level: a handbook for engineers and scientists*, Wiley, Chichester, 1987.
- [2] P. Schureman, *Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides*, US Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey, 1994.
- [3] D. Pugh, *Changing Sea Levels, Effects of Tides, Weather and Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [4] I. Haigh, et al., The tides they are a-Changin': A comprehensive review of past and future nonastronomical changes in tides, their driving mechanisms, and future implications. *Reviews of Geophysics*, vol. 58, no. 1, e2018RG000636, 2020.
- [5] C. Wunsch, and R. Ferrari, Vertical mixing, energy, and the general circulation of the oceans. *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 36, no 1, pp. 281-314, 2004.
- [6] L. Laurent, and C. Garrett, The role of internal tides in mixing the deep ocean. *Journal of Physical Oceanography*, vol. 32, no. 10, pp. 2882-2899, 2002.
- [7] D. Prandle, Saline intrusion in partially mixed estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 59, no. 3, pp. 385-397, 2004.
- [8] D. Bezerra, D. Nascimento, E. Ferreira, P. Rocha, and J. Mourão, Influence of tides and winds on fishing techniques and strategies in the Mamanguape River Estuary, Paraíba State, NE Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 84, pp. 775-788, 2012.
- [9] D. Pugh, and P. Woodworth, *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press, 2014.
- [10] IOH (International Hydrographic Organization), *Regulations of the IHO for International (INT) Charts and Chart Specifications of the IHO*, 2021.
- [11] G. Thiers, and G. Janssens, A port simulation model as a permanent decision instrument. *Simulation*, vol. 71, no 2, pp. 117-125, 1998.
- [12] SHN (Servicio de Hidrografía Naval), *Tablas de Marea*, Pub. H-610. Argentina. Servicio de Hidrografía Naval, Ministerio de Defensa, 2023.
- [13] R. Ray, *A global ocean tide model from TOPEX/POSEIDON altimetry: GOT99*. 2. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 1999.
- [14] G. Egbert, and S. Erofeeva, Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, vol. 19, no. 2, pp. 183-204, 2002.
- [15] M. Hart-Davis, G. Piccioni, D. Dettmering, C. Schwatke, M. Passaro, and F. Seitz, EOT20: a global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. *Earth System Science Data*, vol. 13, no. 8, pp. 3869-3884, 2021.
- [16] M. Saraceno, E. D'Onofrio, M. Fiore, and W. Grismeyer, Tide model comparison over the Southwestern Atlantic Shelf. *Continental Shelf Research*, vol. 30, no. 17, pp. 1865-1875, 2010.
- [17] F. Oreiro, E. D'Onofrio, W. Grismeyer, M. Fiore, and M. Saraceno, Comparison of tide model outputs for the northern region of the Antarctic Peninsula using satellite altimeters and tide gauge data. *Polar Science*, vol. 8, no. 1, pp. 10-23, 2014.
- [18] D. Stammer, et al., Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models. *Reviews of Geophysics*, vol. 52, no. 3, pp. 243-282, 2014.
- [19] F. Seifi, X. Deng, and O. Baltazar Andersen, Assessment of the accuracy of recent empirical and assimilated tidal models for the Great Barrier Reef, Australia, using satellite and coastal data. *Remote Sensing*, vol. 11, no. 10, pp. 1211, 2019.
- [20] M. de Azkue, E. D'Onofrio, and A. Jacobs. Estudio de la precisión de modelos de marea mediante la varianza de los residuos de alturas satelitales en la plataforma patagónica. *Anales del Instituto de la Patagonia*, vol. 50, pp 12-31, <https://doi.org/10.22352/AIP202250004>, 2022.
- [21] E. Palma, R. Matano, and A. Piola, A numerical study of the Southwestern Atlantic Shelf circulation: Barotropic response to tidal and wind forcing. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Res. 109, C08014, <http://dx.doi.org/10.1029/2004JC002315>, 2004.
- [22] C. Simionato, W. Dragani, M. Nuñez, and M. Engel, A set of 3-D nested models for tidal propagation from the argentinean continental shelf to the Río de la Plata estuary—part I. M2. *Journal of Coastal Research*, vol. 20, no. 3, pp. 893-912, 2004.
- [23] D. Moreira, C. Simionato, and W. Dragani, Modeling ocean tides and their energetics in the North Patagonia Gulfs of Argentina. *Journal of Coastal Research*, vol. 27, no. 1, pp. 87-102, 2011
- [24] M. Tonini, E. Palma, and A. Piola, A numerical study of gyres, thermal fronts and seasonal circulation in austral semi-enclosed gulfs. *Cont. Shelf Res.*, vol. 65, pp. 97-110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.06.011>, 2013.
- [25] M. Tonini, and E. Palma, Tidal dynamics on the North Patagonian Argentinean Gulfs, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, vol. 189, pp. 115-130. (ISSN:0271-7714), 2017.
- [26] *Actividad pesquera de la República Argentina*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca.

- https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/pesca_maritima/desembarques/ (accessed 05 11, 2023).
- [27] Turismo en la República Argentina. Agencia de noticias TELAM. <https://www.telam.com.ar/notas/202202/582391-temporada-verano-turismo-partido-costa.html> (accessed 05 11, 2023).
- [28] Movilización de cargas, informe de gesitón. Puerto Bahía Blanca. <https://puertobahiaiblanca.com/gestion2021/GESTION%20INTEGRAL%202021.pdf> (accessed 05 11, 2023).
- [29] E. D'Onofrio, F. Oreiro, and M. Fiore, Simplified Empirical Astronomical Tide Model - An Application for the Río de la Plata Estuary. *Computers & Geosciences*, vol. 44, pp 196 – 202, doi:10.1016/j.cageo.2011.09.019, 2012.
- [30] R.Luetlich, J. Westerink, and N. Scheffner, ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1, Theory and methodology of ADCIRC-2DD1 and ADCIRC-3DL, 1992.
- [31] C. Dawson, J. Westerink, J. Feyen, and D. Pothina, Continuous, discontinuous and coupled discontinuous-continuous Galerkin finite element methods for the shallow water equations, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 52, pp. 63–88, 2006.
- [32] J. Westerink, et al., A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to Southern Louisiana. *Monthly Weather Review*, vol. 136, no. 3, pp. 833– 864. <https://doi.org/10.1175/2007MWR1946.1>
- [33] W. Pringle, D. Wirasaet, K. Roberts, and J. Westerink, Global storm tide modeling with ADCIRC v55: unstructured mesh design and performance, *Geosci. Model Dev.*, vol. 14, pp. 1125–1145, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1125-2021>, 2021.
- [34] R. Merlo, F. Oreiro, M. Fiore, R. Medina, and W., Dragani. Análisis de la evolución del sector intermareal en diferentes áreas de la costa bonaerense a partir de imágenes satelitales ópticas desde 1985 hasta la actualidad. XI Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar y el XIX Coloquio de Oceanografía., Comodoro Rivadavia, Argentina, 28 de Marzo al 1 de Abril, 2022
- [35] N. Pavlis, S. Holmes, S. Kenyon, and J. Factor. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, B04406, 2012.
- [36] F. Oreiro, E. D'Onofrio, and M. Fiore. Vinculación de las referencias altimétricas de las cartas náuticas con el elipsoide WGS84 para el Río de la Plata, *Geoacta*, vol. 40(2), 109-120, 2015.
- [37] K. Roberts, and W. Pringle, Datasets for OceanMesh2D V1.0, <https://doi.org/10.5281/zenodo.2605388>, 2019.
- [38] B. King, and E. Wolanski. Bottom friction reduction in turbid estuaries. *Mixing in Estuaries and Coastal Seas*, vol. 50, 325-337, 1996.