



**Trabajo Final Integrador para el curso de capacitación en
oceanografía e hidrografía.**

**La importancia de contar con una red mareográfica robusta para
comprender los procesos hidrodinámicos y costeros en el Río de
la Plata y su Frente Marítimo**

Autor: ANCG Juan Manuel Bracco.

Tutor: Lic. Flavia Di Biase.

Año 2025

Índice de figuras y tablas.....	3
Glosario y abreviaturas.....	4
Resumen	7
Introducción.....	7
Justificación	8
Metodología y plan de trabajo.....	9
1. Importancia de la medición del nivel del mar en los procesos hidrodinámicos costeros.....	11
2. Componentes del nivel del mar en el Río de la Plata y su Frente Marítimo	14
2.1. Nivel medio del mar (NMM)	16
2.2. Marea astronómica	18
2.3. Mareas meteorológicas: sudestadas y ondas de tormenta (ODT) .	20
2.4. Oscilaciones de larga periodicidad (seiches, OLP).....	23
2.5. Tsunamis (incluyendo tsunamis meteorológicos)	24
3. Aplicaciones de los datos mareográficos en el Río de la Plata y su Frente Marítimo	26
3.1. Gestión ambiental y dinámica sedimentaria.....	27
3.2. Seguridad de la navegación.....	28
3.3. Planificación portuaria y obras costeras	29
4. Redes mareográficas y contribuciones institucionales	30
4.1. Servicio de Hidrografía Naval (SHN) – Argentina	31
4.2. Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) – Uruguay.....	32

4.3. Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP)	33
4.4. Otras organizaciones y colaboraciones	35
5. Tipos de instrumentos de medición del nivel del mar	36
5.1. Mareógrafos clásicos de flotador y registro gráfico	36
5.2. Sensores mareográficos de alta resolución (radar, presión, acústicos).....	37
5.3. Boyas oceanográficas y otros sensores in situ	40
5.4. Redes automáticas de monitoreo y transmisión de datos en tiempo real.....	41
5.5. Observación satelital del nivel del mar.....	42
6. Modernización de los estudios mareográficos: Inteligencia artificial y modelos de pronóstico	44
Conclusiones	46
Bibliografía	48

Índice de figuras y tablas

Figura 1. Vista general del Río de la Plata y Frente Marítimo, con los límites establecidos.	14
Figura 2. Esquema conceptual de la descomposición de una observación instantánea del nivel del mar en sus componentes: nivel medio, marea astronómica, ondas de tormenta, seiches y tsunamis.	15
Figura 3. Tendencia relativa del nivel medio del mar en Buenos Aires y Mar del Plata durante el siglo XX.	16
Figura 4. Mareograma del Puerto de Buenos Aires (enero de 1985).	19
Figura 5. Marea observada y marea astronómica en el Puerto de Buenos Aires durante la sudestada de noviembre de 1989; amplitud de la onda de tormenta positiva.	21
Figura 6. Crecida asociada a la onda de tormenta positiva del 12 de noviembre de 1989 en la Vuelta de Rocha.....	21
Figura 7. Gran bajante del Río de la Plata provocada por una onda de tormenta negativa el 29 de mayo de 1984 en la Vuelta de Rocha.	22
Figura 8. Registros mareográficos del tsunami del Océano Índico del 26 de diciembre de 2004 en Mar del Plata, Santa Teresita y Puerto Belgrano. .	25
Figura 9. Imagen de los distintos mareógrafos distribuidos por todo el RDP.....	30
Figura 10. Sistema de información de la CARP para el Canal Martín García: estaciones de Carmelo, Conchillas, Colonia y Pilote Norden.	34
Figura 11. Estación mareográfica de Pilote Norden (Canal Martín García).	34
Figura 12. Esquema de montaje de un mareógrafo de radar sobre un muelle, indicando altura sobre bajamar, distancia de seguridad y ancho del haz.....	38
Figura 13. Sistema de medición del nivel del mar mediante transductor de presión sumergido y registrador en tierra.	39

Figura 14. Esquema de sensor acústico instalado sobre pozo de calma con tubo protector y tubo interno de medición.....	39
Figura 15. Equipamiento autónomo de registro y transmisión (gabinete de instrumentación, panel solar y baterías) perteneciente al mareógrafo del SOHMA instalado en el puerto de Colonia (Uruguay).	41
Figura 16. Cronograma de misiones de altimetría radar desde los años setenta hasta la actualidad, destacando misiones históricas, operativas y futuras.	42
Figura 17. Medición del nivel del mar con satélites altimétricos y problema de aliasing temporal en órbitas repetitivas.	43
Tabla 1. Lista de estaciones mareográficas en el RDP con sus coordenadas geográficas y la institución de la cual dependen.....	31
Tabla 2. Algunos de los mareógrafos del RDP y sus sensores instalados.	40

Glosario y abreviaturas

RDP (Río de la Plata): Estuario compartido por Argentina y Uruguay.

NMM (Nivel Medio del Mar): Promedio del nivel del mar calculado sobre un periodo suficientemente largo (por ejemplo, 19 años), utilizado como referencia vertical básica en hidrografía y oceanografía física.

ODT (Onda de tormenta): Componente no astronómica del nivel del mar generada por el forzamiento meteorológico (viento y presión atmosférica).
Corresponde a la diferencia entre el nivel observado y la marea astronómica predicha.

OLP (Oscilaciones de larga periodicidad): Fluctuaciones del nivel del mar de periodo mayor que las mareas astronómicas, asociadas a seiches, meteotsunamis y otros modos de oscilación de baja frecuencia.

SHN (Servicio de Hidrografía Naval): Autoridad hidrográfica nacional de la República Argentina, responsable de la red mareográfica argentina, la publicación de tablas de marea, la elaboración de cartas náuticas y otros productos relacionados directamente con la seguridad náutica.

SOHMA (Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada): Organismo de la Armada Nacional del Uruguay encargado de las predicciones de marea, el mantenimiento de estaciones mareográficas uruguayas y la elaboración de productos hidrográficos y meteorológicos.

CARP (Comisión Administradora del Río de la Plata): Entidad binacional argentina-uruguaya, creada por el Tratado del Río de la Plata de 1973, que administra el uso, la navegación y el control del Río de la Plata común, incluyendo el Canal Martín García.

GLOSS (Global Sea Level Observing System): Programa internacional coordinado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI-UNESCO) que establece y mantiene una red global de estaciones mareográficas de referencia para el monitoreo del nivel del mar a largo plazo.

LAT (Lowest Astronomical Tide): Cota de la marea astronómica más baja que puede esperarse en condiciones meteorológicas promedio, utilizada como plano de referencia en muchas cartas náuticas.

Datum: Superficie o plano de referencia a partir del cual se miden alturas o profundidades. En mareografía se usan datums hidrográficos (ceros de carta) y datums geodésicos (sistemas de referencia vertical).

GNSS-R (GNSS Reflectometría): Técnica que utiliza las señales de sistemas de navegación satelital (como GPS) reflejadas en la superficie del mar para estimar la altura del nivel del mar.

IA (Inteligencia artificial): Conjunto de métodos y algoritmos (por ejemplo, aprendizaje automático y redes neuronales) aplicados al análisis de datos para la detección de patrones y la realización de predicciones.

LIMB (Límite Inferior de la Media de las Bajamares): Plano de referencia obtenido a partir del promedio de las bajamares en un período de análisis definido, utilizado como datum hidrográfico en algunos puertos.

Resumen

Este Trabajo Final Integrador estudia la relevancia de una red mareográfica eficiente en el Río de la Plata y su Frente Marítimo para medir y comprender los procesos costeros. En esta zona, la medición constante del nivel del mar permite identificar las causas de sus variaciones: marea astronómica, meteorológica, seiches, tsunamis, ondas de tormenta, etc. El objetivo es observar la red actual, inventariar estaciones, describir fenómenos registrados y valorar sus aplicaciones en gestión ambiental, navegación, planificación portuaria y el uso de modelos numéricos e inteligencia artificial. Se revisan conceptos físicos, eventos históricos extremos y contribuciones institucionales, utilizando bibliografía técnica y documentos oficiales. Se sintetizan los instrumentos disponibles y las capacidades de monitoreo automático y transmisión en tiempo real, además de las herramientas de inteligencia artificial aplicadas al análisis y pronóstico. Los resultados demuestran que la red mareográfica es crucial para detectar eventos extremos, elaborar pronósticos y definir niveles para infraestructuras costeras, así como seguir tendencias vinculadas al cambio climático, entre otros. Se concluye que su modernización e integración tecnológica son fundamentales para la resiliencia costera y la seguridad en la región.

Introducción

El nivel del mar es una variable fundamental para la oceanografía física, la hidrografía y la ingeniería costera. En zonas estuariales y portuarias, su monitoreo continuo permite comprender procesos como la propagación de mareas, la acción combinada de vientos y ondas de tormenta, la intrusión salina y la dinámica sedimentaria. El Río de la Plata, considerado uno de los estuarios más extensos del mundo, constituye un ámbito de particular interés por su relevancia socioeconómica y ambiental: alberga importantes

áreas metropolitanas (Buenos Aires, Montevideo), puertos de alto tráfico y ecosistemas costeros sensibles.

En el Río de la Plata, el nivel del mar resulta de la superposición de múltiples forzantes: la marea astronómica que ingresa desde el Atlántico, las variaciones de presión atmosférica y viento asociadas a sistemas meteorológicos regionales (en particular las sudestadas y los vientos del sector norte), y los aportes fluviales de los ríos Paraná y Uruguay, que modulan el nivel de base del estuario. Esta combinación genera un régimen micro-mareal en el cual la marea astronómica tiene amplitud moderada, pero las mareas meteorológicas pueden producir crecidas y bajantes extraordinarias que superan ampliamente a la componente astronómica.

La medición, análisis e interpretación de las variaciones del nivel del mar, proporciona la información necesaria para caracterizar este régimen complejo. Una red mareográfica robusta, integrada por estaciones costeras, equipos de transmisión en tiempo real y métodos de análisis avanzados, permite generar series de datos de alta calidad a partir de las cuales se construyen productos operativos (tablas de marea, pronósticos, alertas) y se desarrollan estudios científicos sobre la variabilidad y tendencias del nivel del mar. A la vez, la combinación de estas observaciones con técnicas de observación satelital (altimetría) y herramientas de inteligencia artificial abre nuevas posibilidades para mejorar la comprensión y la capacidad predictiva del sistema.

Justificación

El Río de la Plata ha sufrido históricamente eventos extremos de nivel del mar asociados a sudestadas y bajantes pronunciadas, con impactos significativos sobre zonas costeras y portuarias. Inundaciones recurrentes en áreas ribereñas, daños a infraestructura, interrupciones de la

navegación y modificaciones en los ecosistemas costeros evidencian la necesidad de contar con una observación sistemática y confiable del nivel del mar. Además, en un contexto de cambio climático, las tendencias de aumento del nivel medio del mar y posibles cambios en el régimen de tormentas y vientos tornan imprescindible disponer de series de largos períodos para evaluar la evolución del sistema y planificar medidas de adaptación.

Desde el punto de vista científico, la red mareográfica del Río de la Plata permite estudiar la interacción entre forzantes oceánicos, atmosféricos y fluviales en un gran estuario de latitudes medias, proporcionando un laboratorio natural para la oceanografía costera. Desde el punto de vista operativo, los datos mareográficos son clave para la generación de productos del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA), así como para los sistemas de monitoreo que opera la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP).

En este contexto, el trabajo se justifica por la necesidad de integrar y sistematizar el conocimiento existente sobre la red mareográfica del Río de la Plata y su Frente Marítimo, describiendo sus componentes físicas, sus aplicaciones y el rol de las instituciones involucradas, y explorando las oportunidades que brindan las nuevas tecnologías (observación satelital, redes automáticas e inteligencia artificial) para modernizar y fortalecer dicha red.

Metodología y plan de trabajo

La metodología seguida en este Trabajo Final Integrador es de tipo descriptivo y analítico, basada en la revisión de literatura científica y técnica, documentos institucionales y material de referencia en oceanografía física e hidrografía. Se han consultado manuales

internacionales sobre medición e interpretación del nivel del mar (por ejemplo, los manuales de la COI-UNESCO), textos clásicos sobre mareas y mareas meteorológicas (Pugh, 1987), y publicaciones específicas sobre el Río de la Plata y su dinámica (Fossati, 2013; Piecuch, 2023).

En primer lugar, se realiza una presentación conceptual de la mareografía y su importancia para la oceanografía costera, con énfasis en el caso del Río de la Plata. A continuación, se introduce la descomposición del nivel del mar en sus distintas componentes físicas (nivel medio, marea astronómica, ondas de tormenta, oscilaciones de larga periodicidad, tsunamis), incluyendo la ecuación básica de representación y la definición de cada término. En este marco se utilizan ejemplos históricos de eventos extremos registrados en el estuario, que se documentan mediante marcadores de posición para figuras y referencias bibliográficas.

En segundo término, se analizan las principales aplicaciones de los datos mareográficos en el Río de la Plata: estudios de dinámica sedimentaria y gestión ambiental, seguridad de la navegación, planificación portuaria y diseño de obras costeras. Esto se complementa con la descripción de la red mareográfica regional y el rol de las instituciones responsables (SHN, SOHMA, CARP y otras organizaciones y colaboraciones), destacando el aporte de cada una al mantenimiento, modernización y explotación de la red.

Finalmente, se presenta una revisión de los tipos de instrumentos de medición del nivel del mar utilizados en la región, desde los mareógrafos clásicos de flotador y pozo de calma hasta los sensores modernos de radar y presión, las boyas y las técnicas satelitales. Se describen también las redes automáticas de monitoreo y transmisión de datos en tiempo real, así como la contribución de la altimetría satelital y la inteligencia artificial a la modernización del sistema de observación y pronóstico del nivel del

mar. A lo largo de todo el trabajo, se mantiene la estructura solicitada y se insertan marcadores de posición para las figuras y ecuaciones indicadas en el enunciado.

1. Importancia de la medición del nivel del mar en los procesos hidrodinámicos costeros

La medición del nivel del mar constituye uno de los pilares de la oceanografía costera y la hidrografía. Los mareógrafos permiten registrar de manera continua y precisa la altura de la superficie del agua con respecto a un plano de referencia, proporcionando series temporales a partir de las cuales se estudian las mareas astronómicas, las mareas meteorológicas, las oscilaciones de larga periodicidad y las tendencias de largo plazo del nivel medio del mar. Estas observaciones son esenciales tanto para el desarrollo de modelos teóricos y numéricos como para la generación de productos operativos destinados a navegantes, planificadores y gestores costeros (Pugh, 1987; IOC, 1985).

A escala global, las largas series mareográficas costeras han permitido detectar el aumento del nivel medio del mar asociado al calentamiento global, así como patrones regionales vinculados a la circulación oceánica, la redistribución de masas de agua y la variabilidad climática de baja frecuencia (por ejemplo, oscilaciones asociadas a El Niño-Oscilación del Sur). En zonas estuariales y portuarias, las mediciones de la marea son además fundamentales para establecer datums hidrográficos (ceros de carta), determinar rangos de operación seguros para la navegación y dimensionar obras costeras y portuarias frente a eventos extremos (COI-UNESCO, 2012).

Además, las series mareográficas de largo periodo constituyen un insumo indispensable para obtener constantes armónicas confiables mediante

análisis armónico. Cuanto mayor es la extensión temporal y la continuidad de los registros, más precisa resulta la determinación de las amplitudes y fases de los constituyentes astronómicos, lo que redundará en predicciones de marea más exactas y en una separación más robusta entre la componente astronómica y la componente meteorológica en el Río de la Plata. Este aspecto refuerza la importancia estratégica de mantener redes mareográficas estables, calibradas y con continuidad histórica.

En el caso del Río de la Plata, la importancia de medir el nivel del mar se potencia por la confluencia de tres tipos de forzantes: aportes fluviales de los ríos Paraná y Uruguay, forzantes oceánicos desde el Atlántico (marea astronómica y condiciones de mar abierto) y forzantes meteorológicos regionales (vientos intensos asociados a ciclones extratropicales, variaciones de presión atmosférica). El resultado es un régimen micro-mareal en el cual la amplitud de la marea astronómica es relativamente reducida (del orden de un metro), pero las mareas meteorológicas (ondas de tormenta) pueden generar crecidas o bajantes de varios decímetros o incluso metros por encima o por debajo de la marea astronómica.

Las redes mareográficas en el Río de la Plata permiten documentar este comportamiento complejo. Por ejemplo, los registros históricos de Buenos Aires, Montevideo y otros puertos han demostrado que las sudestadas pueden elevar el nivel del río por encima de los 3,5–4,0 m en relación con el cero local, ocasionando inundaciones significativas en zonas ribereñas. Del mismo modo, vientos persistentes del sector norte pueden provocar bajantes pronunciadas que afectan el calado disponible en canales de navegación y el funcionamiento de tomas de agua superficiales. Sin observaciones de altura de marea confiables, sería imposible cuantificar con precisión estos episodios extremos ni evaluar su frecuencia y severidad.

Además de los eventos meteorológicos, las series mareográficas de larga duración permiten estudiar el nivel medio del mar y sus tendencias. En el Río de la Plata, análisis recientes muestran tendencias seculares de aumento del nivel medio en el orden de unos pocos milímetros por año, resultado de la combinación de forzantes globales (aumento eustático del nivel del mar) y regionales (variaciones de caudal fluvial y procesos isostáticos y de subsidencia) (Piecuch, 2023). Estas tendencias son relevantes para la planificación a largo plazo, ya que implican un incremento gradual en la frecuencia de superación de ciertos umbrales de nivel asociados a inundaciones.

La medición del nivel del mar contribuye también a la calibración y validación de modelos numéricos hidrodinámicos aplicados al Río de la Plata y su Frente Marítimo. Estos modelos requieren condiciones de borde y referencias de nivel basadas en observaciones, y su capacidad predictiva depende de la calidad y extensión de los datos utilizados. Por ejemplo, modelos de circulación y transporte sedimentario han mostrado que la resuspensión de sedimentos finos en el estuario está fuertemente controlada por las corrientes asociadas a mareas y vientos (Fossati, 2013), información que solo puede verificarse mediante registros confiables de nivel y corrientes.

En síntesis, la medición del nivel del mar en el Río de la Plata es crucial para:

- (i) caracterizar el régimen de mareas astronómicas y meteorológicas
- (ii) definir datum hidrográficos y referencias verticales.
- (iii) estudiar la dinámica sedimentaria y la intrusión salina.
- (iv) evaluar tendencias de largo plazo del nivel medio.

- (v) alimentar y validar modelos de pronóstico utilizados en la gestión ambiental, la navegación y la planificación portuaria y costera.

Una red mareográfica moderna, integrada y bien mantenida se vuelve, por tanto, una pieza clave en la comprensión y gestión de este sistema estuarial.

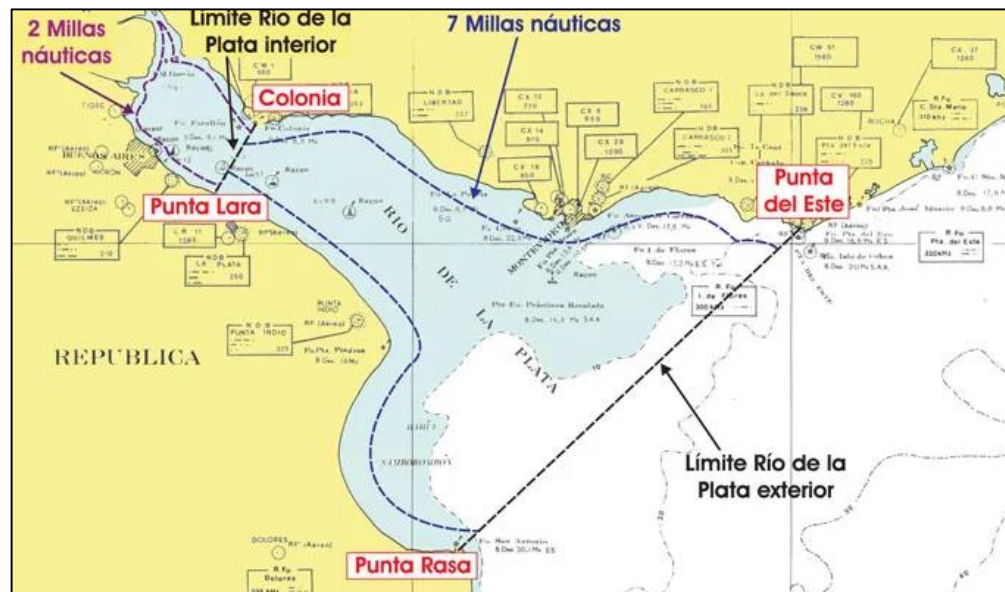


Figura 1. Vista general del Río de la Plata y Frente Marítimo, con los límites establecidos.

Fuente: Balparda et al. (2022)

2. Componentes del nivel del mar en el Río de la Plata y su Frente Marítimo

El nivel del mar en un punto determinado del Río de la Plata puede interpretarse como la suma de varias componentes físicas asociadas a diferentes procesos. Desde un punto de vista conceptual, es útil descomponer el nivel observado en una parte media (nivel medio del mar) y varias oscilaciones superpuestas de origen astronómico, meteorológico y

de dinámica interna. Esta descomposición es coherente con la práctica habitual en mareografía y con los lineamientos de los manuales internacionales sobre medición e interpretación del nivel del mar (IOC, 1985; COI-UNESCO, 2012).

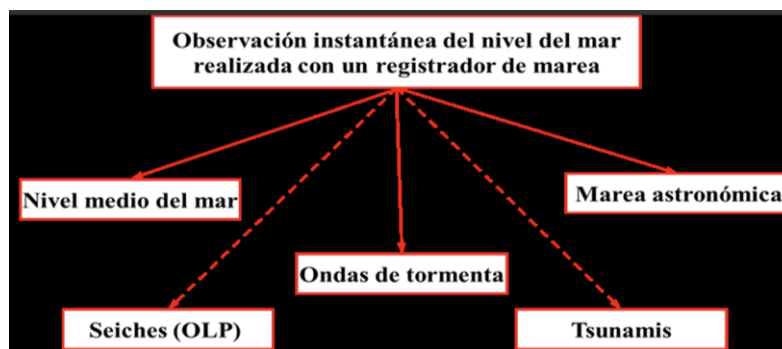


Figura 2. Esquema conceptual de la descomposición de una observación instantánea del nivel del mar en sus componentes: nivel medio, marea astronómica, ondas de tormenta, seiches y tsunamis.

Fuente: material de cátedra del Lic. W. Grismeyer.

En la práctica, no siempre es posible separar todas estas componentes con precisión, pero el esquema anterior permite organizar la interpretación de los registros mareográficos. En el Río de la Plata, las componentes más relevantes desde el punto de vista operativo son la marea astronómica y la onda de tormenta, mientras que las oscilaciones de larga periodicidad y los tsunamis suelen tener amplitud más reducida o carácter más esporádico. El nivel medio NMM, por su parte, constituye la referencia sobre la cual se superponen todas las demás oscilaciones y es la magnitud de interés para estudios de cambio climático y variabilidad de largo plazo.

En las secciones siguientes se describen por separado el nivel medio del mar, la marea astronómica, las mareas meteorológicas (sudestadas y ondas de tormenta), las oscilaciones de larga periodicidad y los tsunamis, con foco en su manifestación en el Río de la Plata.

2.1. Nivel medio del mar (NMM)

El nivel medio del mar (NMM) se define como el promedio del nivel del mar en un periodo suficientemente largo, en general de 19 años (ciclo metónico) para promediar los efectos de las principales componentes de marea astronómica. En la práctica, el NMM se estima a partir de las series mareográficas disponibles, corrigiendo por posibles cambios en el datum local (por ejemplo, movimiento de la estructura donde se encuentra el sensor) mediante nivelaciones geodésicas y observaciones GNSS.

En el Río de la Plata y la costa bonaerense, estaciones como Buenos Aires y Mar del Plata disponen de registros mareográficos seculares que permiten estimar tendencias a largo plazo del nivel medio. Los análisis disponibles señalan tendencias relativas de ascenso del orden de 1–3 mm/año a lo largo del siglo XX y principios del XXI (Piecuch, 2023). Estas tendencias son el resultado combinado de factores globales (aumento del nivel eustático por expansión térmica de los océanos y derretimiento de glaciares) y factores regionales (variaciones en el caudal de los ríos Paraná y Uruguay, cambios en la circulación oceánica regional, movimientos verticales de la corteza).

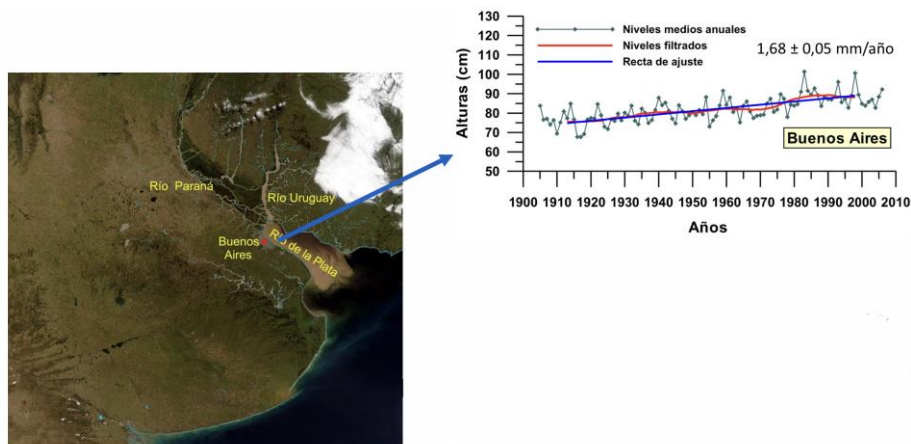


Figura 3. Tendencia relativa del nivel medio del mar en Buenos Aires y Mar del Plata durante el siglo XX.

Fuente: material de cátedra del Lic. W. Grismeyer

En particular, estudios recientes han sugerido que una fracción significativa de la variabilidad del nivel medio en Buenos Aires está asociada a cambios en el flujo fluvial combinado del Paraná y del Uruguay, reflejando la respuesta del estuario a forzantes hidroclimáticos continentales (Piecuch, 2023). Esto implica que, además del aumento global del nivel del mar, la evolución futura del NMM en el Río de la Plata dependerá de la evolución de los caudales río arriba y de la posible regulación antrópica de los mismos.

Desde el punto de vista operativo, el NMM se utiliza como referencia para la definición de planos de sondaje y ceros mareográficos. Es decir, las profundidades que figuran en cartas náuticas y los valores de nivel publicados en tablas de marea se expresan con respecto a un plano que está relacionado con el NMM mediante una cota conocida. En algunos puertos se utiliza el valor de la marea astronómica más baja (LAT), mientras que en otros se emplea un plano como el Límite Inferior de la Media de las Bajamares (LIMB). En todos los casos, la consistencia entre estos planos y el NMM requiere un análisis cuidadoso de las series mareográficas.

El seguimiento del NMM a lo largo del tiempo es fundamental para evaluar el impacto potencial del cambio climático en la región y para definir criterios de diseño y adaptación de infraestructuras costeras. Incluso aumentos aparentemente pequeños (por ejemplo, algunos decímetros en varias décadas) pueden traducirse en un incremento significativo de la probabilidad de inundación de ciertas áreas ribereñas durante eventos extremos de marea meteorológica.

En este contexto, a partir del 1° de enero de 2026 la República Argentina adoptará en el Río de la Plata un único Plano de Reducción de Sondajes (PRS) de valor 0,91 m, que reemplazará los distintos planos actualmente

vigentes en las cartas de la región. Esta unificación implicará el ajuste coherente de los orígenes de medición de las estaciones de marea, de las Tablas de Mareas del estuario, del pronóstico mareológico y de los avisos y alertas de crecidas y bajantes al nuevo plano de referencia. La existencia de un PRS único facilitará la comparación de series entre puertos, simplificará la integración de datos mareográficos con levantamientos batimétricos y modelos numéricos, y reducirá posibles ambigüedades en la interpretación de sondajes y alturas de marea por parte de los usuarios náuticos.

2.2. Marea astronómica

La marea astronómica es la componente periódica y predecible del nivel de la mar generada por la interacción gravitatoria de la Luna y el Sol con la masa de agua de los océanos, combinada con la rotación de la Tierra. Su análisis se realiza mediante métodos armónicos, descomponiendo el registro mareográfico en un conjunto de constituyentes (M2, S2, K1, O1, entre otros) con periodos y fases conocidos (Pugh, 1987). A partir de las constantes armónicas obtenidas para cada puerto, es posible predecir la marea astronómica con alta precisión para años futuros.

En el Río de la Plata, la marea astronómica presenta un régimen predominantemente semidiurno, con dos pleamares y dos bajamares diarias de altura similar, aunque con desigualdades diurnas notables en algunos sectores. La amplitud de la marea astronómica se incrementa desde el interior del estuario hacia la boca oceánica: en puertos como Buenos Aires y Montevideo el rango medio es del orden de 0,8–1,0 m, mientras que en la costa atlántica (por ejemplo, Mar del Plata) puede alcanzar valores algo mayores. La propagación de la onda de marea dentro del estuario está afectada por la geometría, la batimetría y la fricción de fondo, lo que introduce distorsiones y fases diferenciales entre distintos puntos (IOC, 1985).

Los conceptos básicos asociados a la marea astronómica incluyen: pleamar (máximo nivel alcanzado en un ciclo), bajamar (nivel mínimo), rango de marea (diferencia entre pleamar y bajamar sucesiva) y período (tiempo entre dos pleamares consecutivos). La terminología local utilizada en el Río de la Plata sigue estos conceptos, y las tablas de marea publicadas por SHN y SOHMA proporcionan horarios y alturas de pleamares y bajamares para puertos principales y secundarios, referidos a los datums hidrográficos oficiales.

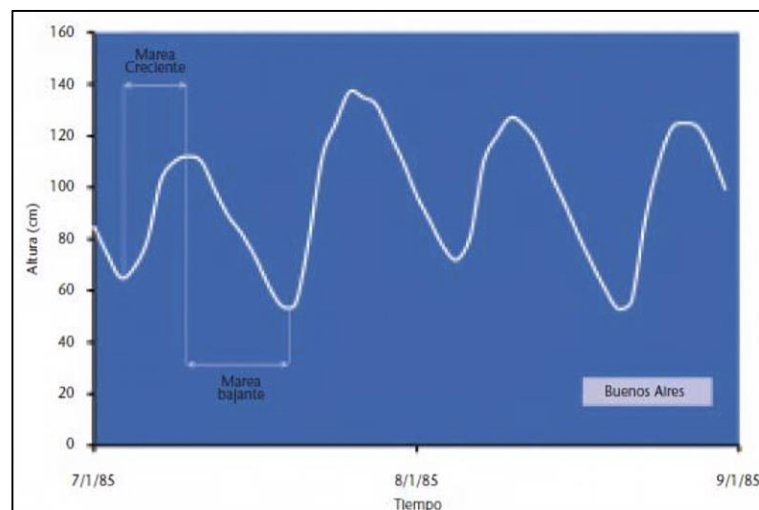


Figura 4. Mareograma del Puerto de Buenos Aires (enero de 1985).

Fuente: Fiore et al. (2008), citado en material de cátedra de Lic. W. Grismeyer.

En la práctica, en el Río de la Plata la marea astronómica rara vez se presenta aislada; su efecto se superpone con la onda de tormenta generada por el viento y la presión. Sin embargo, disponer de un modelo armónico confiable de la marea astronómica permite separar, por sustracción, la contribución meteorológica (residual) en los registros, facilitando el estudio de las sudestadas y otros eventos extremos. Esta separación es una de las aplicaciones centrales de la mareografía en el estuario.

2.3. Mareas meteorológicas: sudestadas y ondas de tormenta (ODT)

Las mareas meteorológicas, también conocidas como ondas de tormenta (ODT), representan la contribución del forzamiento atmosférico (viento y presión) al nivel del mar. En el Río de la Plata, el fenómeno regional más característico es la sudestada: episodios en los cuales vientos persistentes del cuadrante sudeste generan una acumulación de agua en el interior del estuario, elevando el nivel muy por encima de lo predicho por la marea astronómica. Inversamente, vientos del sector norte y noroeste pueden producir bajantes extraordinarias al “vaciar” el estuario hacia el océano.

Desde el punto de vista físico, el viento actúa sobre la superficie del agua transmitiendo esfuerzo cortante, lo que impulsa el transporte de masa en dirección del viento. En una cuenca semiconfinada como el Río de la Plata, este transporte se traduce en un aumento del nivel en la zona de barlovento (interior del estuario) y una disminución en la zona de sotavento (boca). Por su parte, la presión atmosférica influye a través del efecto inverso de barómetro: descensos de presión tienden a elevar el nivel del mar y aumentos de presión tienden a reducirlo (aproximadamente 1 hPa de caída de presión implica un aumento del nivel de alrededor de 1 cm, en ausencia de otros efectos). La combinación de estos factores determina la magnitud y extensión espacial de la onda de tormenta (Pugh, 1987).

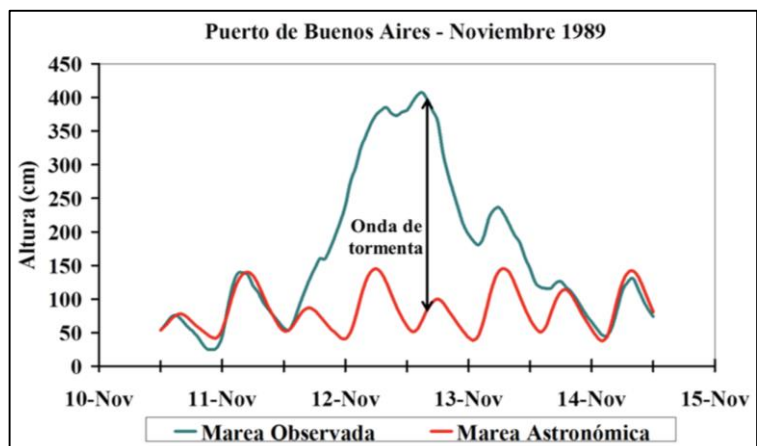


Figura 5. Marea observada y marea astronómica en el Puerto de Buenos Aires durante la sudestada de noviembre de 1989; amplitud de la onda de tormenta positiva.

Fuente: material de cátedra de Lic. W. Grismeyer.



Figura 6. Crecida asociada a la onda de tormenta positiva del 12 de noviembre de 1989 en la Vuelta de Rocha.

Fuente: Gentileza Sr. Gustavo Cirilli, reproducido en material de cátedra de Lic. W. Grismeyer.



Figura 7. Gran bajante del Río de la Plata provocada por una onda de tormenta negativa el 29 de mayo de 1984 en la Vuelta de Rocha.

Fuente: Gentileza Sr. Gustavo Cirilli, reproducido en material de cátedra de Lic. W. Grismeyer.

En el Río de la Plata se han registrado sudestadas con sobre-elevaciones del nivel de más de 2 m por encima de la marea astronómica, generando inundaciones importantes en áreas bajas de la ribera. La crecida asociada a la sudestada del 12 de noviembre de 1989 en la Vuelta de Rocha y otros sectores de la ciudad de Buenos Aires es un ejemplo emblemático, ampliamente documentado en registros mareográficos y fotografías históricas. Del mismo modo, la gran bajante del 29 de mayo de 1984 dejó al descubierto sectores de costa y afectó la navegación y la operación de tomas de agua. Estos eventos extremos subrayan la importancia de disponer de mediciones continuas y modelos de pronóstico adecuados.

En la práctica, la onda de tormenta se obtiene como diferencia entre el nivel observado y la marea astronómica predicha. El SHN y el SOHMA utilizan esta aproximación en la calibración de sus modelos de pronóstico mareológico, que combinan la marea astronómica con la respuesta meteorológica estimada a partir de modelos numéricos del viento y la

presión. Este enfoque permite emitir correcciones a las tablas de marea en forma de pronósticos de altura total del agua, que se difunden a los usuarios para apoyar la toma de decisiones en navegación y gestión de emergencias.

El análisis estadístico de las ondas de tormenta registradas en el Río de la Plata constituye una herramienta valiosa para el diseño de defensas costeras y obras de protección contra inundaciones. Al estudiar la frecuencia y magnitud de eventos extremos, se pueden definir niveles de diseño con periodos de retorno específicos (por ejemplo, 50 o 100 años) y establecer umbrales de alerta operativa. En este sentido, la red mareográfica binacional, integrada por estaciones en ambos márgenes del estuario, es indispensable para caracterizar la variabilidad espacial de las sudestadas y bajantes y mejorar los sistemas de alerta temprana.

2.4. Oscilaciones de larga periodicidad (seiches, OLP)

Las oscilaciones de larga periodicidad (OLP) incluyen fenómenos como los seiches, que son oscilaciones estacionarias del nivel del agua en cuencas parcialmente confinadas, y otras oscilaciones de baja frecuencia inducidas por forzantes remotos o resonancias internas. En el contexto del Río de la Plata, la geometría amplia y relativamente somera del estuario permite la existencia de modos de oscilación propios cuya excitación puede producir variaciones de nivel con periodos de varias horas o más.

Los seiches se producen cuando una perturbación inicial (por ejemplo, un cambio brusco en el viento o la presión, o el paso de una onda de choque atmosférica) excita un modo de oscilación con frecuencia natural determinada por la longitud y la profundidad de la cuenca. En puertos y bahías relativamente confinadas, estos modos pueden manifestarse con amplitudes apreciables y afectar la operatividad portuaria, generando oscilaciones de nivel que perduran después de finalizado el forzamiento.

En la costa bonaerense se han documentado seiches y oscilaciones de este tipo, así como en puertos como Mar del Plata y Quequén.

En el Río de la Plata abierto, la amplitud de las OLP suele ser menor que la de las mareas meteorológicas de gran escala, y está parcialmente enmascarada por ellas. Sin embargo, análisis espectrales detallados de largas series mareográficas han identificado señales de baja frecuencia que pueden asociarse a modos internos del estuario y a oscilaciones forzadas por sistemas atmosféricos. El estudio de estas componentes contribuye a una comprensión más completa de la respuesta dinámica del estuario frente a forzantes de diferente escala temporal.

2.5. Tsunamis (incluyendo tsunamis meteorológicos)

Los tsunamis de origen sísmico son poco frecuentes en la costa atlántica de Sudamérica, debido a la distancia de las principales zonas de subducción. No obstante, las ondas generadas por grandes terremotos en otras cuencas oceánicas pueden propagarse y ser detectadas por mareógrafos distantes, aunque con amplitud reducida. En varios mareógrafos de la costa argentina se han registrado señales asociadas al tsunami del Océano Índico del 26 de diciembre de 2004, con oscilaciones de varios centímetros superpuestas al régimen local de mareas (Dragani et al., 2006).

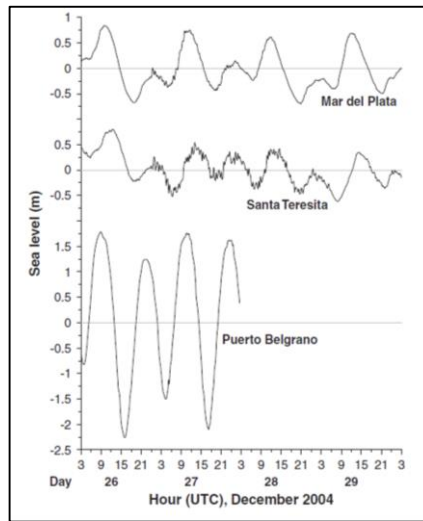


Figura 8. Registros mareográficos del tsunami del Océano Índico del 26 de diciembre de 2004 en Mar del Plata, Santa Teresita y Puerto Belgrano.

Fuente: Dragani et al. (2006), reproducido en material de cátedra del Lic. W. Grismeyer.

Además de los tsunamis de origen sísmico, existen los tsunamis meteorológicos o meteotsunamis, originados por cambios bruscos de presión atmosférica o por el paso de sistemas convectivos organizados que transfieren energía a la columna de agua. Estos fenómenos se han documentado en diversas regiones del mundo y en particular en la costa atlántica de la Argentina, donde se han observado oscilaciones rápidas y de cierta amplitud en puertos como Mar del Plata y Quequén.

En el Río de la Plata, la probabilidad de que un tsunami de origen remoto tenga consecuencias significativas es baja, dado el fuerte amortiguamiento que ejerce la plataforma continental y la configuración del estuario. Sin embargo, la red mareográfica actual está en condiciones de registrar estas señales, y su análisis puede aportar a estudios globales sobre la propagación de tsunamis. Asimismo, la detección de oscilaciones rápidas y no explicables por mareas astronómicas o meteorológicas locales podría contribuir a la identificación de meteotsunamis u otros fenómenos de alta

frecuencia, especialmente si se cuenta con sensores de alta resolución temporal.

En resumen, aunque los tsunamis (sísmicos y meteorológicos) no constituyen el principal factor de riesgo en el Río de la Plata, la existencia de una red mareográfica sensitiva y moderna permite registrar sus efectos y contribuir a sistemas de alerta temprana regionales y globales, complementando la información proveniente de redes de boyas oceánicas especializadas (como los sistemas DART de NOAA).

3. Aplicaciones de los datos mareográficos en el Río de la Plata y su Frente Marítimo

Los datos mareográficos del Río de la Plata y su Frente Marítimo tienen múltiples aplicaciones científicas y operativas. En términos generales, se utilizan para:

- (i) el estudio de procesos hidrodinámicos y sedimentarios;
- (ii) la gestión ambiental de zonas costeras;
- (iii) la seguridad de la navegación y la operación portuaria; y
- (iv) la planificación y diseño de obras costeras y portuarias. En esta sección se destacan algunas de estas aplicaciones, con énfasis en la gestión ambiental, la navegación y la planificación de infraestructura.

Entre estas aplicaciones, una de las más clásicas y extendidas de las series mareográficas en el Río de la Plata y su Frente Marítimo es la obtención de constantes armónicas para el cálculo de las tablas de marea. A partir de registros de largo plazo en los puertos patrones, el SHN y el SOHMA ajustan modelos armónicos que permiten derivar, por extrapolación, las predicciones astronómicas para puertos secundarios y para posiciones intermedias del estuario. Estas constantes constituyen,

por tanto, el insumo fundamental de las tablas de marea impresas y digitales que utilizan los navegantes, y sirven además como referencia para separar la componente astronómica de la componente meteorológica en los análisis de sudestadas, bajantes extraordinarias y otros eventos extremos de nivel del mar.

3.1. Gestión ambiental y dinámica sedimentaria

El Río de la Plata es un estuario de alta carga de sedimentos finos, cuyo origen principal son los aportes fluviales del Paraná y el Uruguay. La distribución y movilidad de estos sedimentos están fuertemente condicionadas por las corrientes inducidas por la combinación de marea, viento y gradientes de densidad. Los registros mareográficos, al proporcionar información sobre el nivel y las corrientes asociadas, son una fuente de datos fundamental para calibrar modelos de transporte sedimentario y para interpretar observaciones de turbidez y concentración de sedimentos en suspensión (Fossati, 2013).

En estudios de dinámica sedimentaria, los datos de nivel se emplean para determinar fases de marea en las cuales se incrementa la resuspensión (por ejemplo, durante corrientes máximas de marea) y para analizar la respuesta del estuario a eventos extremos (sudestadas) que provocan intensos episodios de resuspensión y transporte de sedimentos hacia distintas zonas. La distribución de sedimentos finos influye, a su vez, en la morfología de bancos y canales, en la calidad del agua (por su relación con la turbidez) y en la dinámica ecológica de hábitats costeros (por ejemplo, la colonización de planicies de marea por vegetación halófitas).

Desde la perspectiva de la gestión ambiental, los niveles del mar registrados por la red mareográfica sirven para delimitar zonas de inundación recurrente, identificar áreas de riesgo y evaluar la vulnerabilidad de ecosistemas costeros a la subida del nivel medio del

mar. Esta información es clave para la planificación del uso del suelo en zonas bajas, la protección de humedales costeros y la implementación de medidas de adaptación al cambio climático.

3.2. Seguridad de la navegación

La seguridad de la navegación en el Río de la Plata depende críticamente del conocimiento del nivel del agua en los canales de acceso y en los puertos. Los buques que navegan en el estuario y utilizan los principales canales (como el Canal Punta Indio y el Canal Martín García) requieren información actualizada sobre la altura de la marea y las crecidas o bajantes asociadas a eventos meteorológicos para asegurar un margen de seguridad adecuado entre el calado del buque y el fondo (under-keel clearance).

Los servicios hidrográficos (SHN y SOHMA) publican tablas de marea y pronósticos mareológicos que permiten a los prácticos y capitanes planificar las maniobras de entrada y salida de puertos en función de las alturas de agua esperadas. La red mareográfica, complementada con modelos numéricos de pronóstico, posibilita emitir avisos de sudestadas y bajantes que afectan el calado disponible. En situaciones de crecida extrema, los datos en tiempo real apoyan decisiones como el cierre temporal de puertos o la reprogramación de operaciones portuarias.

Además, las medidas de nivel en tiempo real permiten a los servicios de tráfico marítimo monitorear la evolución de eventos inesperados, como cambios de viento o presión que puedan alterar rápidamente el nivel. En combinación con sistemas de posicionamiento y control de tráfico, esta información contribuye a reducir el riesgo de varaduras, colisiones y otros incidentes en zonas de navegación restringida. En suma, la red mareográfica es un componente esencial de los sistemas de apoyo a la navegación en el Río de la Plata.

3.3. Planificación portuaria y obras costeras

La planificación y el diseño de infraestructuras portuarias y costeras se basan en el conocimiento detallado del régimen de niveles del mar y de eventos extremos. Los registros de marea se utilizan para definir niveles de diseño (por ejemplo, niveles de crecida con determinados periodos de retorno) y para estimar el rango de niveles que las estructuras deberán soportar. En proyectos de ampliación portuaria, construcción de muelles, espigones y defensas costeras, se requiere conocer el nivel máximo esperado durante sudestadas severas, así como las bajantes extremas que puedan afectar la operatividad.

En el Río de la Plata, los análisis de las series mareográficas históricas han servido de base para dimensionar defensas costeras en áreas urbanas y para determinar cotas de terraplenes y explanadas portuarias. Por ejemplo, la elevación de determinadas obras en el frente costero de Buenos Aires se ha definido considerando las crecidas máximas registradas en sudestadas históricas, más márgenes adicionales asociados a posibles aumentos futuros del nivel medio del mar. Del mismo modo, la definición de planos de sondaje en canales dragados tiene en cuenta las bajantes extremas registradas, de modo de asegurar que el calado disponible no caiga por debajo de valores seguros en las condiciones más desfavorables.

La información mareográfica también es utilizada en estudios de impacto ambiental de obras costeras y portuarias, ya que cualquier intervención sobre la morfología del estuario puede alterar la propagación de mareas y ondas de tormenta, afectando potencialmente a zonas vecinas. Por esta razón, los modelos numéricos que se emplean para evaluar proyectos de gran escala (por ejemplo, nuevos canales o ampliaciones portuarias) se calibran y validan con datos de nivel proporcionados por la red mareográfica existente.

4. Redes mareográficas y contribuciones institucionales

La obtención, mantenimiento y aprovechamiento de los datos mareográficos en el Río de la Plata y su Frente Marítimo se apoya en la labor de diversas instituciones nacionales y binacionales, así como en la colaboración con organismos internacionales. Entre las instituciones clave se encuentran el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) de la Argentina, el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) de Uruguay y la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP), además de otros organismos de investigación y servicios meteorológicos que utilizan y complementan estas observaciones.

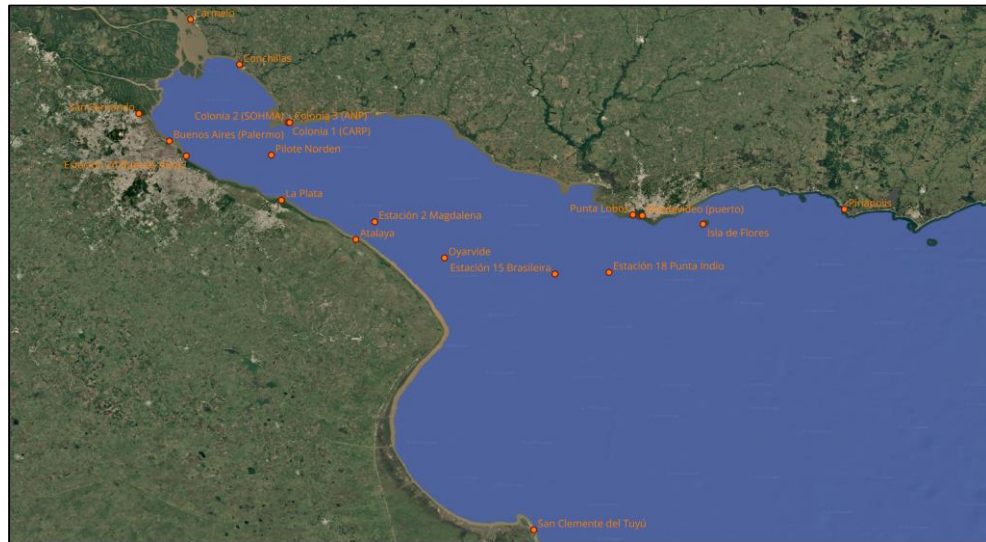


Figura 9. Imagen de los distintos mareógrafos distribuidos por todo el RDP.

Fuente: Elaboración propia, utilizando varias fuentes académicas.

Tabla 1. Lista de estaciones mareográficas en el RDP con sus coordenadas geográficas y la institución de la cual dependen.

Nombre	Latitud	Longitud	Institución
San Fernando	-34,433889	-58,540000	SHN
Buenos Aires (Palermo)	-34,560833	-58,398890	SHN
La Plata	-34,833889	-57,880280	SHN
Atalaya	-35,015278	-57,536110	SHN
Oyarvide	-35,100278	-57,127500	SHN
San Clemente del Tuyú	-36,354665	-56,715140	SHN
Estación 24 Buenos Aires	-34,630000	-58,320000	AGP
Estación 2 Magdalena	-34,933333	-57,450000	AGP
Estación 15 Brasileira	-35,175000	-56,616670	AGP
Estación 18 Punta Indio	-35,166667	-56,366670	AGP
Punta Lobos	-34,900857	-56,256870	SOHMA
Colonia 2 (SOHMA)	-34,475000	-57,850000	SOHMA
Pilote Norden	-34,626250	-57,927420	CARP
Colonia 1 (CARP)	-34,475000	-57,850000	CARP
Conchillas	-34,208333	-58,075000	CARP
Carmelo	-34,000000	-58,300000	CARP
Isla de Flores	-34,943844	-55,932320	ANP
Montevideo (puerto)	-34,904606	-56,213140	ANP
Colonia 3 (ANP)	-34,475556	-57,842610	ANP
Piriápolis	-34,875969	-55,280060	ANP

4.1. Servicio de Hidrografía Naval (SHN) – Argentina

El Servicio de Hidrografía Naval (SHN) es la autoridad hidrográfica nacional de la República Argentina y tiene a su cargo la operación de la red mareográfica argentina. En el ámbito del Río de la Plata, el SHN mantiene estaciones mareográficas en puntos estratégicos como Buenos Aires (Palermo), La Plata, Atalaya, San Fernando y otros puertos y boyas, que en conjunto conforman una red capaz de capturar la variabilidad espacial de la marea y las mareas meteorológicas en el estuario.

Las estaciones mareográficas del SHN han pasado de utilizar mareógrafos clásicos de flotador con registro gráfico a emplear sensores electrónicos modernos (radar, presión) con transmisión de datos en tiempo casi real. Los registros de estas estaciones se utilizan para la elaboración de tablas de marea, pronósticos mareológicos, cartas náuticas y productos oceanográficos, y se integran en publicaciones oficiales y servicios web. El SHN participa asimismo en programas internacionales como GLOSS, aportando series históricas de estaciones como Buenos Aires y Mar del Plata a bases de datos globales de nivel del mar (Servicio de Hidrografía Naval, 2023).

La institución realiza también estudios y desarrollos de modelos numéricos de circulación y pronóstico de agua alta en el Río de la Plata, que se alimentan con datos mareográficos y meteorológicos. Estos modelos permiten estimar la evolución del nivel durante sudestadas y otros eventos, mejorando la capacidad de alerta temprana y proporcionando insumos para la planificación portuaria y costera.

4.2. Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) – Uruguay

El Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) es el organismo responsable de las predicciones de marea, la elaboración de cartas y la operación de estaciones mareográficas en la República Oriental del Uruguay. En el Río de la Plata, SOHMA mantiene estaciones en puertos como Montevideo, Colonia y otros puntos de la costa uruguaya, integrando una red que complementa a la del SHN en la margen argentina del estuario.

SOHMA elabora y publica tablas de marea para puertos uruguayos y algunos puertos argentinos, y coopera estrechamente con el SHN en la armonización de datums y la difusión de información mareográfica y

meteorológica. Sus estaciones mareográficas, equipadas con sensores electrónicos modernos, se integran a redes internacionales de observación del nivel del mar y contribuyen a estudios regionales de variabilidad y tendencias del NMM (SOHMA, 2023).

La coordinación entre SHN y SOHMA es fundamental para asegurar la coherencia de la información en todo el estuario y garantizar que los navegantes dispongan de datos consistentes en ambos márgenes del Río de la Plata. Esta cooperación se materializa en acuerdos bilaterales y en proyectos conjuntos, en muchos casos canalizados a través de la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP).

4.3. Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP)

La Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) es un organismo binacional creado por el Tratado del Río de la Plata y su Frente Marítimo para administrar y regular el uso del río compartido entre Argentina y Uruguay. En el contexto de la mareografía, la CARP opera un conjunto de estaciones en el Canal Martín García y la costa noreste del estuario (por ejemplo, Carmelo, Conchillas, Colonia y Pilote Norden), que suministran información en tiempo real sobre vientos y nivel del mar para apoyar la navegación y el control de la vía navegable.



Figura 10. Sistema de información de la CARP para el Canal Martín García: estaciones de Carmelo, Conchillas, Colonia y Pilote Norden.

Fuente: Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP), sección “Vientos y mareas” del Canal Martín García.

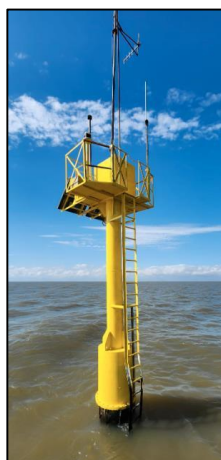


Figura 11. Estación mareográfica de Pilote Norden (Canal Martín García).

Fuente: PortalPortuario.cl (2023)

El sistema de información de la CARP integra datos de estas estaciones en una plataforma web, donde se visualizan curvas de nivel y viento en tiempo casi real. Esta información es utilizada por prácticos y autoridades de tráfico marítimo, y complementa los pronósticos y productos emitidos por SHN y SOHMA (CARP, 2023). La CARP también actúa como ámbito de coordinación entre ambos países para la instalación de nuevos

instrumentos, la definición de datums comunes y la planificación de obras en el canal y sus áreas adyacentes.

La existencia de este sistema binacional de monitoreo en el Canal Martín García pone de manifiesto la importancia de contar con una infraestructura mareográfica coordinada a nivel regional, capaz de proporcionar datos consistentes y accesibles a todos los usuarios de la vía navegable compartida.

4.4. Otras organizaciones y colaboraciones

Además de SHN, SOHMA y CARP, otras organizaciones contribuyen al conocimiento y al uso de los datos mareográficos en el Río de la Plata.

Entre ellas se encuentran:

- Institutos de investigación como el Instituto Nacional del Agua (INA), universidades nacionales y centros de investigación de Argentina y Uruguay, que utilizan series mareográficas para estudios de dinámica costera, sedimentología, intrusión salina y cambio climático.
- Servicios meteorológicos nacionales, que integran información de nivel del mar en sistemas de alerta de inundaciones costeras y en pronósticos de fenómenos severos.
- Proyectos de cooperación regional e internacional que han contribuido a la modernización de instrumentación, la capacitación de personal y la consolidación de redes de observación.

Estas colaboraciones amplían el alcance de la red mareográfica del Río de la Plata, asegurando que los datos recopilados se utilicen en múltiples ámbitos (científico, operativo, educativo) y que el sistema de observación se mantenga actualizado y alineado con estándares internacionales.

5. Tipos de instrumentos de medición del nivel del mar

La red mareográfica del Río de la Plata y su Frente Marítimo se apoya en una variedad de instrumentos y tecnologías desarrolladas a lo largo de más de un siglo. Desde los mareógrafos clásicos de flotador con registro en papel hasta los sensores de radar sin contacto, los transductores de presión, las boyas oceanográficas y la altimetría satelital, la medición del nivel del mar ha evolucionado siguiendo los avances tecnológicos. En esta sección se describen los principales tipos de instrumentos utilizados para medir la altura del nivel del mar, con énfasis en sus principios de funcionamiento, ventajas y limitaciones (IOC, 1985; NOAA, 1985).

5.1. Mareógrafos clásicos de flotador y registro gráfico

Los mareógrafos clásicos de flotador consisten en un pozo de calma conectado al mar mediante un conducto. En el interior del pozo, un flotador sube y baja siguiendo el nivel del agua y transmite este movimiento mediante un sistema de poleas y engranajes a un brazo escribiente que traza una curva continua sobre un tambor de papel en rotación accionado por un mecanismo de reloj. El pozo actúa como amortiguador del oleaje de alta frecuencia, permitiendo que el flotador siga las variaciones más lentas de marea.

Este tipo de instrumentación fue la base de las observaciones mareográficas durante gran parte del siglo XX en el Río de la Plata. Estaciones como Buenos Aires y Montevideo han operado mareógrafos de flotador durante décadas, generando series históricas de gran valor. No obstante, estos equipos requieren mantenimiento frecuente (reemplazo de papel, ajuste de mecanismos, calibraciones) y la digitalización de los datos implica la lectura manual de los registros, con la consiguiente carga de trabajo y potenciales errores.

A pesar de sus limitaciones, muchos mareógrafos mecánicos han sido mantenidos como sistemas de respaldo frente a los sensores electrónicos modernos, debido a su robustez y a la continuidad histórica que representan. Los registros en papel conservan, además, un importante valor documental para estudios históricos y comparación con datos actuales.

5.2. Sensores mareográficos de alta resolución (radar, presión, acústicos)

La modernización de la red mareográfica ha incorporado sensores electrónicos de alta resolución que permiten medir el nivel del mar con precisión centimétrica o milimétrica y transmitir datos en tiempo casi real. Entre los tipos de sensores más utilizados se encuentran los sensores de radar sin contacto, los transductores de presión y los sensores acústicos.

Los sensores de radar de nivel del mar emiten pulsos electromagnéticos hacia la superficie del agua y miden el tiempo de retorno de la señal reflejada. A partir de este tiempo, conocido el valor de la velocidad de propagación, se calcula la distancia entre el sensor y la superficie libre. Dado que la posición del sensor respecto al datum local es conocida, se obtiene el nivel del mar en cada instante. Estos sensores se instalan sobre estructuras fijas (muelles, pilotes) y no tienen contacto con el agua, lo que reduce problemas de corrosión y bioincrustación.

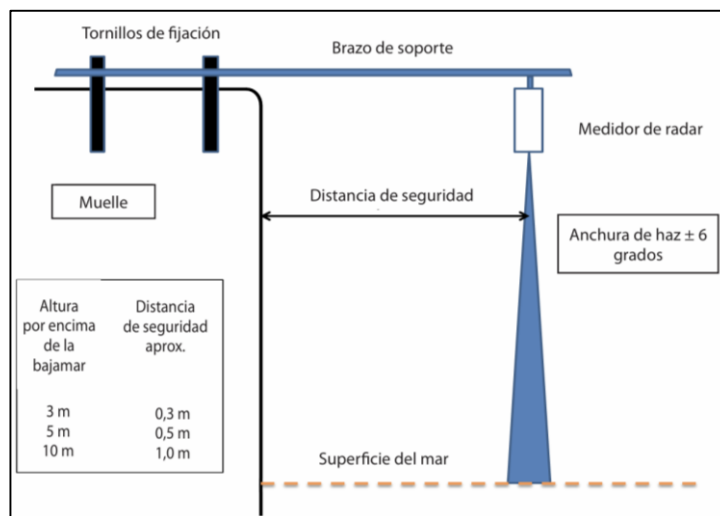


Figura 12. Esquema de montaje de un mareógrafo de radar sobre un muelle, indicando altura sobre bajamar, distancia de seguridad y ancho del haz.

Fuente: Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI, 2016), *Manual sobre la Medición e Interpretación del Nivel del Mar, Volumen V: Medidores de radar.*

Los sensores de presión miden la presión ejercida por la columna de agua sobre un transductor. Aplicando la relación hidrostática $P = \rho g h$, donde ρ es la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad y h la altura de la columna, se infiere el nivel del mar. Existen configuraciones en las que el transductor se encuentra sumergido (requiriendo correcciones barométricas y cuidado frente a la corrosión) y otras en las que se utiliza un sistema de burbujeo, manteniendo el transductor a resguardo en tierra y transmitiendo aire por un tubo hasta un orificio sumergido.

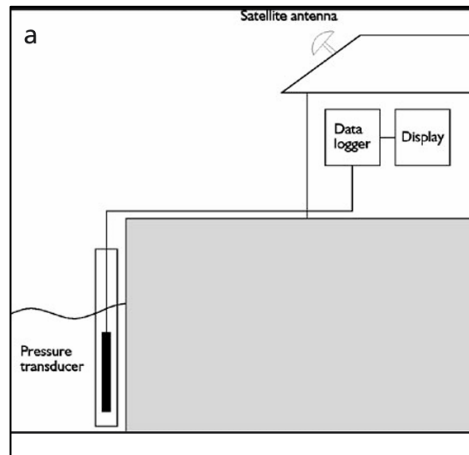


Figura 13. Sistema de medición del nivel del mar mediante transductor de presión sumergido y registrador en tierra.

Fuente: Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC, 2016), Manual on Sea-Level Measurement and Interpretation. Volume V: Radar Gauges.

Los sensores acústicos, por su parte, emplean ondas sonoras emitidas en un tubo o pozo de calma que se reflejan en la superficie del agua; midiendo el tiempo de vuelo de la señal se obtiene la distancia al nivel del mar. Estos sistemas requieren correcciones por temperatura del aire (que afecta la velocidad del sonido) y son sensibles a condiciones ambientales dentro del tubo.

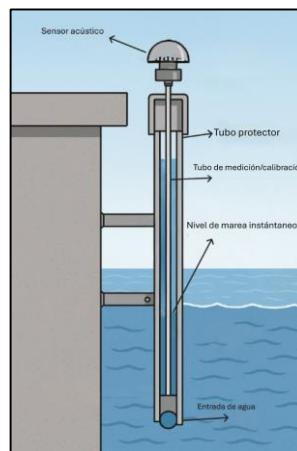


Figura 14. Esquema de sensor acústico instalado sobre pozo de calma con tubo protector y tubo interno de medición.

Elaboración propia sobre la base de: Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC, 2006), Manual on Sea-Level Measurement and Interpretation.

En la red mareográfica del Río de la Plata, las combinaciones de sensores de radar y presión se han vuelto comunes, proporcionando redundancia y mejorando la confiabilidad de las mediciones. La salida digital de estos equipos facilita la integración en sistemas automáticos de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos (NOAA, 1985).

Tabla 2. Algunos de los mareógrafos del RDP y sus sensores instalados.

Fuente: SHN y SOHMA.

N	Nombre	Sensor de radar	Sensor de presión
1	San Fernando	-	1
2	Buenos Aires (Palermo)	1	2
4	La Plata	1	1
5	Atalaya	1	-
6	Oyarvide	1	1
7	San Clemente del Tuyú	-	1
8	Punta Lobos	1	1
9	Colonia	-	1

5.3. Boyas oceanográficas y otros sensores in situ

Además de las estaciones mareográficas costeras, es posible medir el nivel del mar mediante boyas oceanográficas y otros sensores in situ. Las boyas de oleaje y boyas multiparamétricas pueden incorporar transductores de presión y sistemas de posicionamiento GNSS de alta precisión que permiten estimar la altura de la superficie del mar en mar abierto. En algunos casos, se utilizan sistemas GNSS diferenciales que, al promediar las oscilaciones debidas al oleaje, permiten obtener el nivel medio con respecto a un datum geodésico.

Las boyas atracadas, sujetas al fondo por líneas de fondeo, pueden registrar niveles y otros parámetros (temperatura, salinidad, corrientes) y transmitirlos vía satélite o sistemas celulares. Este tipo de instrumentación

es particularmente útil en zonas donde no existen estructuras costeras aptas para instalar mareógrafos, o en proyectos de investigación específicos.

Si bien en el Río de la Plata el uso de boyas para medición sistemática de marea no está tan extendido como en otras regiones, las experiencias internacionales muestran que la combinación de estaciones costeras y boyas puede ofrecer una visión más completa de la variabilidad espacial del nivel del mar, especialmente en sectores alejados de la costa o en frentes de plataforma.

5.4. Redes automáticas de monitoreo y transmisión de datos en tiempo real

La evolución de la electrónica y las telecomunicaciones ha permitido el desarrollo de redes automáticas de monitoreo del nivel del mar con transmisión de datos en tiempo real. En estas redes, cada estación mareográfica cuenta con un sistema de adquisición y un módulo de transmisión (vía satélite, telefonía móvil o radio), que envían los datos hacia un centro de control donde son almacenados, validados y distribuidos a los usuarios.

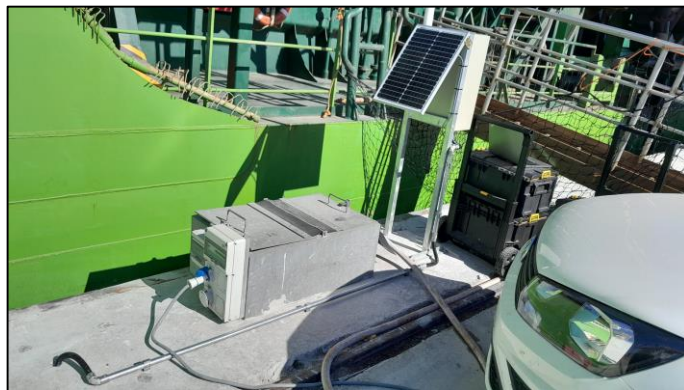


Figura 15. Equipamiento autónomo de registro y transmisión (gabinete de instrumentación, panel solar y baterías) perteneciente al mareógrafo del SOHMA instalado en el puerto de Colonia (Uruguay).

Fuente: gentileza del personal del SOHMA.

En el caso del Río de la Plata, tanto SHN como SOHMA y CARP han avanzado en la automatización de sus estaciones, permitiendo la visualización en línea de niveles y vientos en puertos y puntos críticos del estuario. Estos sistemas son fundamentales para la emisión de alertas tempranas ante sudestadas, bajantes extremas y otros eventos, ya que permiten a las autoridades y a los usuarios seguir la evolución del nivel en tiempo casi real y tomar decisiones informadas.

La integración de sensores modernos con tecnologías de transmisión y bases de datos centralizadas facilita asimismo la implementación de sistemas de detección automática de anomalías, la generación de productos gráficos para difusión pública y la conservación de archivos históricos de alta resolución temporal, todo lo cual contribuye a la mejora continua de la red mareográfica regional (NOAA, 1985).

5.5. Observación satelital del nivel del mar

La observación satelital del nivel del mar mediante altímetros radar ha revolucionado la oceanografía durante las últimas décadas. Misiones como TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3 y Sentinel-6 han permitido medir la altura de la superficie del océano a escala global con precisión centimétrica, proporcionando series temporales homogéneas desde principios de la década de 1990 (JPL-NASA, 2019).



Figura 16. Cronograma de misiones de altimetría radar desde los años setenta hasta la actualidad, destacando misiones históricas, operativas y futuras.

Fuente: Ballesteros, M. (2021), *Tesis de grado*

La altimetría satelital es particularmente valiosa para estudiar la variabilidad global y regional del nivel medio del mar y para inferir la circulación oceánica a gran escala. Aunque su aplicación directa en zonas costeras y estuarios está limitada por la resolución espacial y la interferencia de ecos terrestres, los datos altimétricos cercanos a la costa pueden utilizarse para complementar y validar las observaciones mareográficas, y para conectar las tendencias locales con el contexto global.

La combinación de datos altimétricos y mareográficos permite, por ejemplo, distinguir entre cambios debidos a movimientos verticales de la corteza (subsistencia o levantamiento) y cambios debidos al aumento absoluto del nivel del mar. Asimismo, la altimetría contribuye a la estimación de la componente oceánica de la variación del nivel en el Río de la Plata, complementando el análisis de las componentes fluviales y meteorológicas (Piecuch, 2023).

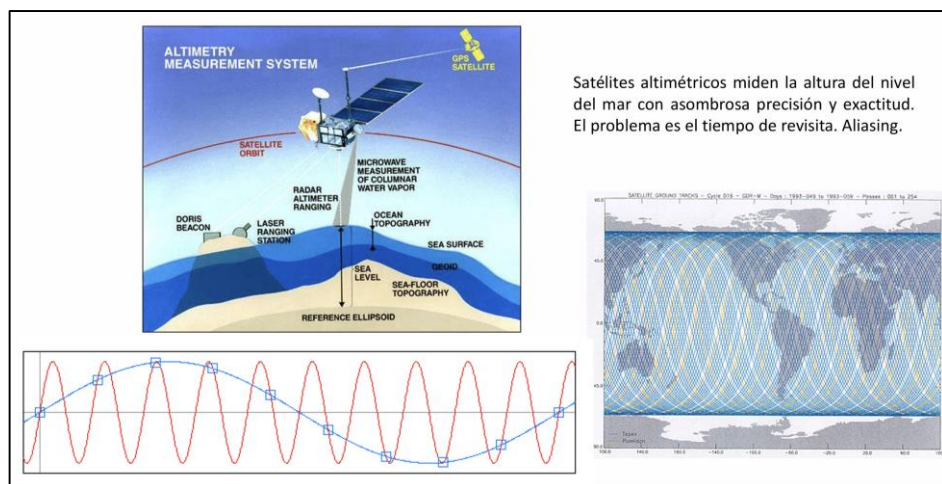


Figura 17. Medición del nivel del mar con satélites altimétricos y problema de aliasing temporal en órbitas repetitivas.

Fuente: material de cátedra del Lic. W. Grismeyer.

En el contexto del Río de la Plata, los altímetros satelitales aportan información principalmente sobre la altura del mar en la región oceánica

adyacente y sobre tendencias regionales de nivel medio. Su integración con los datos de mareógrafos costeros permite cuantificar la contribución de la señal oceánica a las variaciones del nivel del estuario y mejorar el entendimiento de la conexión entre procesos de gran escala y respuestas locales.

A futuro, misiones diseñadas específicamente para observación de zonas costeras y cuerpos de agua continentales, como SWOT, ofrecerán mayor resolución espacial y permitirán un análisis más detallado de los gradientes de nivel en estuarios y ríos de gran escala, lo que podría beneficiar directamente los estudios sobre el Río de la Plata y su Frente Marítimo.

6. Modernización de los estudios mareográficos:

Inteligencia artificial y modelos de pronóstico

La modernización de los estudios mareográficos en el Río de la Plata no se limita a la incorporación de nuevos sensores y redes automáticas de monitoreo, sino que incluye también el desarrollo de modelos de pronóstico avanzados y la aplicación de herramientas de inteligencia artificial (IA) al análisis de series de nivel del mar. Los modelos numéricos hidrodinámicos bidimensionales y tridimensionales son actualmente la base de los pronósticos de marea y nivel del mar en muchos estuarios y zonas costeras, y el Río de la Plata no es la excepción. Estos modelos resuelven las ecuaciones de movimiento y continuidad para la columna de agua, forzados por mareas oceánicas, vientos, presión atmosférica y caudales fluviales, y se calibran y validan con datos mareográficos (Fossati, 2013).

La inteligencia artificial ofrece nuevas herramientas para complementar estos modelos. Técnicas de aprendizaje automático y redes neuronales

recurrentes pueden entrenarse con series históricas de nivel del mar, viento, presión y caudales para aprender relaciones no lineales y patrones de variabilidad que los modelos puramente deterministas pueden no capturar de manera óptima. Estudios recientes en otras regiones han demostrado que este tipo de enfoques puede mejorar la capacidad de pronóstico a corto y medio plazo, especialmente para la componente meteorológica del nivel del mar (Semana, 2025).

Entre las posibles aplicaciones de la IA en el contexto del Río de la Plata se encuentran:

- El pronóstico de sudestadas y bajantes extremas a partir de predicciones meteorológicas y series históricas de nivel.
- La reconstrucción de datos faltantes en registros mareográficos mediante modelos entrenados con datos de estaciones cercanas y variables meteorológicas.
- La detección automática de eventos anómalos (por ejemplo, meteotsunamis u oscilaciones inusuales) mediante algoritmos de detección de anomalías.
- El refinamiento de las relaciones entre condiciones oceánicas y respuesta del estuario, integrando datos altimétricos, mareográficos y fluviales.

La incorporación de estas herramientas requiere contar con series de datos largas y de calidad, así como con infraestructura computacional y recursos humanos capacitados en ciencia de datos e IA. La red mareográfica del Río de la Plata, con sus registros seculares en puertos clave y su creciente integración con redes automáticas en tiempo real, ofrece una base de datos valiosa para explorar estas aplicaciones.

En conjunto, la integración de modelos numéricos, observaciones in situ, observaciones satelitales e inteligencia artificial promete mejorar significativamente la capacidad de pronóstico del nivel del mar en el Río de la Plata, contribuyendo a una gestión más anticipatoria y resiliente de los riesgos asociados a eventos costeros extremos y a las tendencias de largo plazo del nivel medio del mar.

Conclusiones

El análisis realizado en este Trabajo Final Integrador pone de manifiesto la importancia estratégica de la red mareográfica en el Río de la Plata y su Frente Marítimo para la comprensión y la gestión de los procesos hidrodinámicos costeros. La descomposición del nivel del mar en sus componentes físicas (nivel medio, marea astronómica, mareas meteorológicas, oscilaciones de larga periodicidad, tsunamis) muestra que, en este estuario, las variaciones meteorológicas asociadas a sudestadas y bajantes constituyen la principal fuente de eventos extremos de nivel, superponiéndose a una marea astronómica de amplitud moderada y a una tendencia de fondo de aumento del nivel medio del mar.

Los registros mareográficos de larga duración en puertos como Buenos Aires y Montevideo han permitido cuantificar estas componentes y detectar tendencias seculares de ascenso del nivel medio, coherentes con el aumento global del nivel del mar pero moduladas por variaciones regionales de caudales fluviales y otros factores. Esta información resulta esencial para la planificación de obras costeras y portuarias, la definición de datum hidrográficos y la evaluación de riesgos de inundación en zonas ribereñas.

Desde el punto de vista de las aplicaciones, los datos mareográficos del Río de la Plata se utilizan intensamente en la gestión ambiental, la seguridad de la navegación y la planificación portuaria. La capacidad de

predecir con horas de anticipación las crecidas asociadas a sudestadas, basándose en modelos numéricos alimentados por observaciones de nivel y variables meteorológicas, constituye una herramienta fundamental para la emisión de alertas tempranas y la reducción de impactos. Asimismo, la determinación de niveles extremos para el diseño de defensas costeras y la operación segura de canales y puertos se apoya directamente en análisis estadísticos de series mareográficas.

El trabajo destaca también el rol de las instituciones involucradas: el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y el Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA) como operadores principales de la red mareográfica en Argentina y Uruguay, respectivamente; la CARP como organismo binacional que coordina estaciones y sistemas de información para el Canal Martín García; y otras organizaciones de investigación y cooperación internacional que contribuyen al mantenimiento, análisis y difusión de los datos. La articulación de estos actores ha permitido consolidar una red de observación que combina estaciones costeras, sistemas de transmisión en tiempo real y estándares internacionales de calidad.

Finalmente, se ha analizado la evolución tecnológica de la mareografía, desde los mareógrafos de flotador hasta los sensores electrónicos modernos, las redes automáticas de monitoreo y la observación satelital. La incorporación de la altimetría satelital y de técnicas de inteligencia artificial al análisis y pronóstico del nivel del mar abre nuevas perspectivas para mejorar la capacidad predictiva, optimizar el control de calidad de los datos y desarrollar productos innovadores útiles para la gestión costera.

En conjunto, los elementos analizados permiten concluir que la hipótesis planteada en el trabajo se ve ampliamente respaldada: una red mareográfica robusta, moderna y articulada a nivel binacional es

indispensable para comprender los procesos hidrodinámicos del Río de la Plata y para sustentar decisiones en ámbitos tan diversos como la navegación, la planificación portuaria, la gestión ambiental y la adaptación al cambio climático. Mantener y fortalecer esta red, incorporando nuevas tecnologías, ampliando la cobertura espacial y temporal e integrando métodos de inteligencia artificial y observación satelital, constituye una línea prioritaria de acción para mejorar la resiliencia y el desarrollo sustentable de las zonas costeras del Río de la Plata en las próximas décadas.

Bibliografía

Balparda, D., Sellanes, L., Silva, D., Jackson, M., Ezzatti, P., & Fossati, M. (2022). Desarrollo del sistema de pronóstico del Río de la Plata y su Frente Marítimo: PronUy_RPFM. Ribagua – Revista Iberoamericana del Agua, 9(2), 25–40. <https://doi.org/10.1080/23863781.2023.2210262>

Ballesteros Almonacid, M. (2021). Sistema de pronóstico de los niveles de marea en tiempo real en el Río de la Plata (Tesis de maestría). Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, IMFIA. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12008/27990>

CARP. (2023). Estado actual del Río de la Plata – Costa noreste: vientos y mareas. Comisión Administradora del Río de la Plata. Recuperado de <https://www.carp.org.uy>

COI-UNESCO. (2012). Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume III: Reappraisals and recommendations as of the year 2000 (IOC Manuals and Guides, No. 14, Vol. III). Intergovernmental Oceanographic Commission Technical Series.

COI-UNESCO. (2016). Manual de medición e interpretación del nivel del mar. Volumen V: Medidores de radar (Manuales y Guías de la COI, 14, Vol. V). Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO.

Dragani, W. C., D'Onofrio, E. E., Grismeyer, W., & Fiore, M. M. E. (2006). Tide gauge observations of the Indian Ocean tsunami, December 26, 2004, in Buenos Aires coastal waters, Argentina. *Continental Shelf Research*, 26(14), 1543–1550. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.04.002>

Fiore, M. M. E., D'Onofrio, E. E., Pousa, J. L., Schnack, E. J., & Bértola, G. R. (2009). Storm surges and coastal impacts at Mar del Plata, Argentina. *Continental Shelf Research*, 29(14), 1643–1649. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.05.004>

Fossati, M. (2013). Dinámica global de sedimentos finos en el Río de la Plata (Tesis doctoral). Universidad de la República, Uruguay.

IOC. (1985). Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume I: Basic procedures (IOC Manuals and Guides, No. 14, Vol. I). Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO.

IOC. (2006). Manual on sea-level measurement and interpretation. Volume IV: An update to 2006 (IOC Manuals and Guides, No. 14, Vol. IV). Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO.

JPL-NASA. (2019). TOPEX/Poseidon: The pioneering sea surface topography mission. Jet Propulsion Laboratory, NASA. Recuperado de <https://sealevel.jpl.nasa.gov>

NOAA. (1985). The Next Generation Water Level Measurement System (NGWLMS). National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce.

Piecuch, C. G. (2023). River effects on sea-level rise in the Río de la Plata estuary during the past century. *Ocean Science*, 19, 57–75.

<https://doi.org/10.5194/os-19-57-2023>

PortalPortuario.cl. (2025, 10 de junio). CARP adquiere e instala ayuda de navegación en Pilote Norden. PortalPortuario. Recuperado de

<https://portalportuario.cl/carp-adquiere-e-instala-ayuda-de-navegacion-en-pilote-norden/>

Pugh, D. T. (1987). *Tides, surges and mean sea-level: A handbook for engineers and scientists*. Wiley.

Semana. (2025, 28 de octubre). IA y cambio climático: el modelo que predice las variaciones del nivel del mar con alta precisión. *Revista Semana*.

Servicio de Hidrografía Naval. (2023). *Mareas y niveles del mar*. Servicio de Hidrografía Naval, Argentina. Recuperado de <https://www.hidro.gov.ar>

SOHMA. (2023). *Tablas de marea y nivel del mar para puertos uruguayos*. Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada, Uruguay. Recuperado de <https://www.sohma.armada.mil.uy>