



Ministerio de Ambiente  
y Desarrollo Sostenible  
**Argentina**

# Base de datos batimétrica, superficie batimétrica generada a través de la interpolación y variables topográficas derivadas para las áreas del Frente del Río de la Plata y Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood

Año 2022

Enfoque ecosistémico de la pesca  
y áreas marinas protegidas



Organización de las Naciones  
Unidas para la Alimentación  
y la Agricultura



FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL  
INVERTIMOS EN NUESTRO PLANETA

PROYECTO:

## **Fortalecimiento de la Gestión y Protección de la Biodiversidad Costero Marina en Áreas Ecológicas clave y la Aplicación del Enfoque Ecosistémico de la Pesca (EEP)**

# **Base de datos batimétrica, superficie batimétrica generada a través de la interpolación y variables topográficas derivadas para las áreas del Frente del Río de la Plata y Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood**

Consultora Especialista en Oceanografía y Cartografía  
Noela Sánchez Carnero

**Citar como:**

Sánchez-Carnero, N. 2022. *Base de datos batimétrica, superficie batimétrica generada a través de la interpolación y variables topográficas derivadas para las áreas del Frente del Río de la Plata y Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood*. Informe del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, FAO y FMAM. Proyecto “Fortalecimiento de la Gestión y Protección de la Biodiversidad Costero Marina en Áreas Ecológicas Clave y la Aplicación del Enfoque Ecosistémico de la Pesca (EEP)” (Argentina). 62 pág.

Las fotografías e imágenes del presente informe no pueden reproducirse sin autorización previa de su autor/a.

## Resumen

En este documento se presentan las bases de datos recopiladas con información batimétrica de las áreas del Frente Marítimo del Río de la Plata y del Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood. Se detalla la metodología seguida para la depuración y homogenización de estas bases de datos, así como la generación de superficies batimétricas mediante un proceso de interpolación multiescala.

# Índice

## 1. Introducción

1.1 Información batimétrica

1.2 Áreas de interés

1.2.1 Área **Frente Marítimo del Río de la Plata**

1.2.2 Área **Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood**

1.3 Sistema de coordenadas

## 2. Fuentes de información batimétrica disponibles

2.1 Cartas náuticas

2.2 Datos acústicos

2.3 Datos procedentes de otras fuentes

## 3. Depuración y corrección de datos

3.1 bases batimétricas: generación y homogenización

3.2 corrección de marea

3.3 armonización de referencias batimétricas y eliminación de fuentes con fuertes desviaciones

## 4. Generación de superficies batimétricas

4.1 algoritmo de interpolación

4.2 depuración de errores sistemáticos y eliminación de datos erróneos

4.3 filtrado de la superficie interpolada

4.4. Validación de la superficie obtenida

4.5. Interpolación fractal de la superficie

4.6. Cálculo de variables topográficas derivadas de la batimetría

## 5. Presentación de resultados para las áreas de estudio

### 5.1 área de interés “frente marítimo del río de la plata”

5.1.1 base de datos batimétrica

5.1.2 superficie batimétrica

5.1.3 variables topográficas derivadas

### 5.2 base del área de interés **Área Marina Protegida Namuncurá- Banco Burdwood**

5.2.1 base de datos batimétrica

5.2.2 superficie batimétrica

5.2.3 variables topográficas derivadas

## Referencias

# 1. Introducción

## 1.1 Información batimétrica

La información batimétrica constituye un elemento clave para el conocimiento de los fondos marinos. Ya sea que el estudio se centre en geomorfología cercana a la costa (Finkl *et al.*, 2005), hidrología y procesos sedimentarios (Jaffe *et al.*, 2007; Klemas, 2009), pesca (Nishida *et al.*, 2001), efectos de tormentas y tsunamis (Matsuyama *et al.*, 1999), exploración minera (Basu y Malhotra, 2002), ecología (Stocks *et al.*, 2004; Wedding *et al.*, 2008) o sobre el desarrollo de modelos hidrodinámicos (Van Rijn *et al.*, 2003; Sutherland *et al.*, 2004) entre otros, una batimetría detallada es una primera pieza indispensable para avanzar en el conocimiento sobre los procesos bentónicos.

Para satisfacer la necesidad de batimetrías precisas, y en lo posible generadas rápidamente, las técnicas de medición de profundidad han evolucionado durante el último siglo, desde el uso de una línea de plomo anudada hasta ecosondas de haz único basadas en sonar, sonares de barrido lateral, ecosondas de haz múltiple, LiDAR (Light Detection And Ranging), sistemas de escaneo de líneas láser (Basu y Malhotra, 2002) o tecnologías de imágenes por satélite (Lee *et al.*, 2010).

De forma general, para obtener batimetrías precisas es necesario contar con una elevada densidad de sondas (puntos geográficos con valores de profundidad asociados) que permitan una interpolación precisa de una superficie batimétrica. Esta densidad puede obtenerse mediante el uso de técnicas acústicas y ópticas de alta resolución (estos últimos exclusivamente para áreas someras).

Los métodos acústicos son el estándar para el levantamiento batimétrico desde los 1980's (Anderson *et al.*, 2008). Hasta hace pocos años los sistemas más utilizados eran las sondas monohaz y de haz partido, con gran precisión vertical que obtienen datos casi continuos a lo largo de transectas pero separadas hasta centenares de metros entre ellas, lo que obliga a realizar interpolaciones que implican la pérdida de detalle en la batimetría (Sánchez-Carnero *et al.*, 2012). A partir de los años 2000 se comenzó a popularizar el uso de las sondas acústicas de haz múltiple o *multibeam*, que cuentan con tecnología que permite emular el uso de decenas y hasta centenares de haces estrechos, permitiendo una resolución espacial y vertical muy elevada (hasta centimétrica) y una cobertura total (siempre que las transectas sean diseñadas con ese objetivo).



A pesar de su elevada resolución potencial las sondas acústicas multihaz e incluso las de haz simple no pueden dar respuesta a la necesidad de datos batimétricos cuando las áreas son muy amplias. Para una cobertura con una sonda multibeam de un área de unos 52.000 km<sup>2</sup> (como el área del Frente Valdés definida en este trabajo), suponiendo una profundidad media de 100 m, requeriríamos aproximadamente 300 días de toma de datos ininterrumpida.

Por esta razón, cuando las áreas de interés son muy amplias y hacen que un muestreo *ad hoc* sea inabordable, se tiende al uso conjunto de información procedente de fuentes diversas, que permita la mayor cobertura posible. Con este objetivo en este trabajo se construyeron bases de datos batimétricos para cada dos de las cuatro áreas de interés definidas en el proyecto (Frente del Río de la Plata y Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood) mediante la recopilación de los datos disponibles a través de todas las fuentes consultadas. Aunque el uso de diversas fuentes permite aumentar la densidad de datos y cubrir áreas más amplias, es necesario tener en cuenta que al tratarse de datos que han podido ser adquiridos con diferentes métodos, y tratados siguiendo procedimientos distintos, es necesario realizar tareas tanto de corrección como de homogenización de cada una de estas fuentes de datos. Todos estos aspectos son tratados en el presente documento.

## 1.2 Áreas de interés

En el marco del proyecto en el que se inscribe este trabajo se establecieron cuatro áreas de interés: Frente Marítimo del Río de la Plata (FMRP), Frente Valdés (FV), Golfo San Jorge (GSJ) y Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood (AMPNBB). En este informe se presentan únicamente los productos generados para dos de ellas: Frente Marítimo del Río de la Plata (FMRP) y Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood (AMPNBB).

Para definir todas estas áreas, como límite área sumergida-área emergida se utilizó la línea de costa presente en la capa poligonal "País" del Instituto Geográfico Nacional (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial>).

### 1.2.1 Área Frente Marítimo del Río de la Plata (FMRP)

El 19 de noviembre de 1973 fue suscripto el tratado del Río de la Plata y su Frente Marítimo, por la República Argentina y la República Oriental Uruguay, que fue ratificado por la República Argentina por Ley N° 20.645 del 31 de enero de 1974. En los artículos 1 y 2 de esta ley se definen los límites geográficos del Río de la Plata y su Frente Marítimo.

**Artículo 1º** – *El Río de la Plata se extiende desde el paralelo de Punta Gorda hasta la línea recta imaginaria que une Punta del Este (República Oriental del Uruguay) con Punta Rasa del Cabo San Antonio (República Argentina), de conformidad a lo dispuesto en el Tratado de Límites del Río Uruguay del 7 de abril de 1961 y en la Declaración Conjunta sobre el Límite Exterior del Río de la Plata del 30 de enero de 1961.*

**Artículo 2º** – *Se establece una franja de jurisdicción exclusiva adyacente a las costas de cada Parte en el Río. Esta franja costera tiene una anchura de siete millas marinas entre el límite exterior del Río y la línea recta imaginaria que une Colonia (República Oriental del Uruguay) con Punta Lara (República Argentina) y desde esta última línea hasta el paralelo de Punta Gorda tiene una anchura de dos millas marinas. Sin embargo, sus límites exteriores harán las inflexiones necesarias para que no sobrepasen los veriles de los canales en las aguas de uso común y para que queden incluidos los canales de acceso a los puertos. Tales límites no se aproximarán a menos de quinientos metros de los veriles de los canales situados en las aguas de uso común ni se alejarán más de quinientos metros de los veriles y la boca de los canales de acceso a los puertos.*

Aunque estos límites no siguen necesariamente criterios ambientales, para el desarrollo de este proyecto se ha adoptada como Frente Marítimo del Río de la Plata (FMRP) el área definida en esta ley, que fue digitalizada a partir del mapa disponible en la página web de la Comisión Administradora del Río de la Plata (<https://www.comisionriodelaplata.org>). El área definida cubre un total de aproximadamente 260.699 km<sup>2</sup>. Esta área incluye el Río de la Plata junto con su frente, si bien solo este último es inicialmente objetivo en este trabajo.

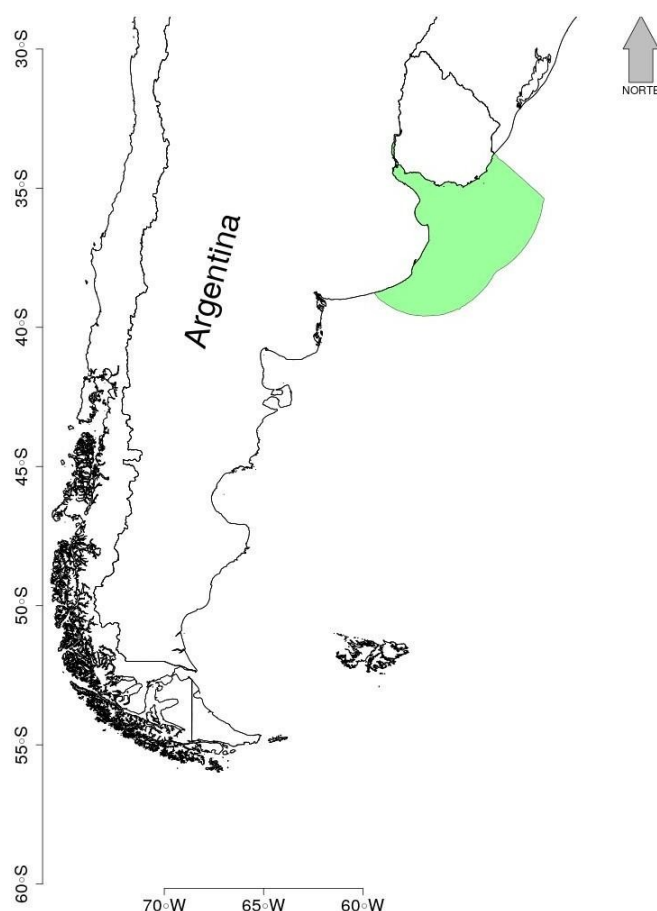


Figura 1. Frente Marítimo del Río de la Plata (FMRP) (en verde)

## 1.2.2 Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood” (AMPNBB)

El Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood (AMPNBB) está integrada por una primera AMP, aprobada en 2013 a través de la ley 26.875 y cuyos límites y categorías se definen en el artículo 4 de dicha ley (y fueron modificadas mediante el decreto 888/19, aunque manteniendo los límites geográficos) y una ampliación aprobada a través de la Ley 27.490 en 2018 y cuyos límites quedan definidos en el artículo 1 de la misma.

**Artículo 1°** - Créase el área marina protegida “Namuncurá - Banco Burdwood II”, constituida por las categorías de manejo de Reserva Nacional Marina Estricta y Reserva Nacional Marina, sobre el total de la plataforma continental y las aguas suprayacentes al lecho y subsuelo del espacio marítimo argentino cuyos límites se detallan en el Anexo I que forma parte integrante de la presente y el cual cuenta con una superficie total de treinta y dos mil trescientos treinta y seis con tres kilómetros cuadrados (32.336,3 km<sup>2</sup>).

La capa en formato vectorial del Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood (AMPNBB) está disponible para su descarga en la web de Parques Nacionales (<https://mapas.parquesnacionales.gob.ar>) y delimita un área aproximada de 56.593 km<sup>2</sup> (Figura 2).

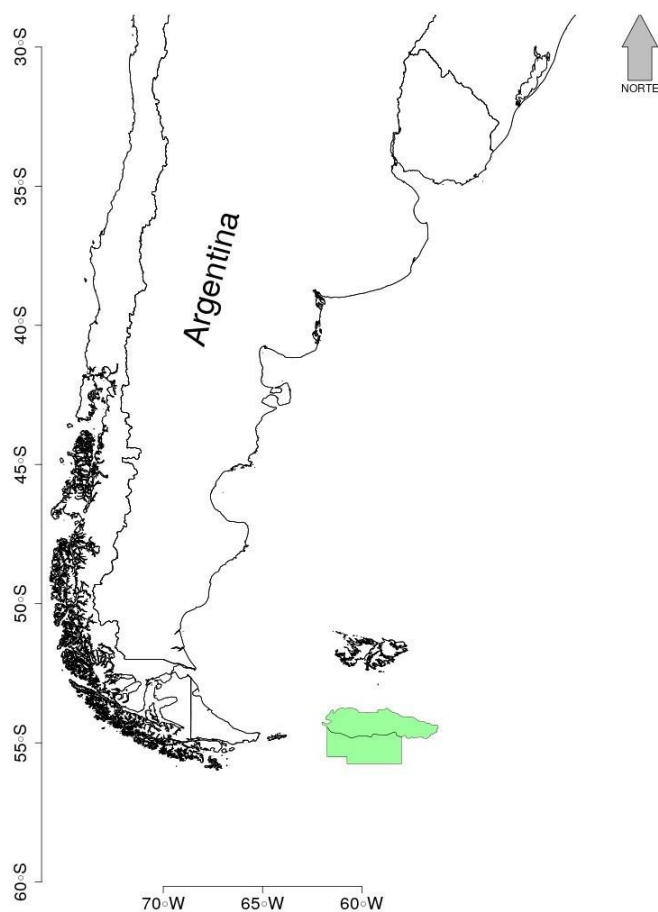


Figura 2. Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood I y II (AMPNBB) (en verde)

## 1.3 Sistemas de coordenadas

Todas las capas de información (en formato vectorial o raster) son generadas en coordenadas geodésicas, utilizando el Sistema de Referencia World Geodesic System de 1984 (WGS84) y el Marco de Referencia POSGAR07. El POSGAR 07 (Posiciones Geodésicas Argentinas 2007) fue adoptado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) como el Marco de Referencia Geodésico Nacional a través de la Disposición N° 20/2009 del 15 de mayo de 2009, reemplazando el hasta entonces vigente POSGAR 94.<sup>1</sup> (Código EPSG: 5348 y EPSG:5347 para el AMPNBB) siguiendo las directrices definidas por el Instituto Geográfico Nacional (<https://www.ign.gob.ar>).

Además, la información cartográfica se proyectará utilizando el Universal Transverse Mercator (UTM), un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, que se construye como la proyección de Mercator normal secante a un meridiano. En estos casos se utilizará el huso más conveniente a cada una de las áreas, es decir:

- Frente Marítimo del Río de la Plata (FMRP): huso UTM 21 S
- Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood (AMPNBB): huso UTM 21 S

---

<sup>1</sup> El POSGAR 07 (Posiciones Geodésicas Argentinas 2007) fue adoptado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) como el Marco de Referencia Geodésico Nacional a través de la Disposición N° 20/2009 del 15 de mayo de 2009, reemplazando el hasta entonces vigente POSGAR 94 (<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Posgar07>).

## 2. Fuentes de información batimétrica disponible

### 2.1 Cartas náuticas

En cualquier parte del mundo, cuando se trabaja con información de fondos marinos la primera fuente de datos de consulta son las cartas náuticas, desarrolladas y mantenidas por los Servicios de Hidrografía Naval de cada país. Estos mapas, que se remontan a más de 5 siglos (carta de Tlacotalpa, 1580<sup>2</sup>) tenían como objetivo único la seguridad en la navegación. Hoy en día, aunque este objetivo sigue siendo el principal no es exclusivo, y en las Cartas Náuticas actualmente se recopila no solo información batimétrica sino también de características del fondo.

En Argentina, el Servicio de Hidrografía Naval (SHN, <http://www.hidro.gov.ar/>), con más de 140 años de historia, cuenta en la actualidad con más de 80 cartas náuticas electrónicas y 196 cartas náuticas en papel del Mar Argentino, que mantiene actualizadas y a disposición tanto de navegantes como de investigadores.

En este trabajo se solicitaron únicamente las cartas náuticas relativas a las áreas de interés, Frente Marítimo del Río de la Plata y Banco Burdwood. El área del FMRP contó con 26 cartas, de las cuales 1 cubre el área completa y las otras corresponden a subáreas. El AMPNBB contó con 3 cartas, cubriendo 1 de ellas la totalidad del área y otras dos áreas adyacentes, cubriendo el área entre el AMPNBB y la costa atlántica de la Isla de Tierra del Fuego (**Tabla 1**). Estas últimas no fueron incluidas en el análisis por encontrarse a una distancia superior del AMPNBB que el buffer de búsqueda establecido (50 km, ver Sección 4).

---

<sup>2</sup> Morato-Moreno, M. (2018). The Map of Tlacotalpa by Francisco Gali, 1580: An Early Example of a Local Coastal Chart in Spanish America. *The Cartographic Journal*, 55(1), 3-15.

**Tabla 1.** Cartas náuticas de las áreas de interés

Área	Carta Náutica	Cobertura
<b>Frente Marítimo del Río de la Plata</b>	AR201010	Completa
	AR302120	Detalle
	AR202100	Detalle
	AR402520	Detalle
	AR201140	Detalle
	AR401590	Detalle
	AR301150	Detalle
	AR420010	Detalle
	AR420020	Detalle
	AR420030	Detalle
	AR420090	Detalle
	AR420040	Detalle
	AR420050	Detalle
	AR401570	Detalle
	AR420060	Detalle
	AR530010	Detalle
	AR401560	Detalle
	AR420070	Detalle
	AR530020	Detalle
	AR530030	Detalle
	AR530040	Detalle
	AR530050	Detalle
	AR530060	Detalle
AR530070	Detalle	
AR530080	Detalle	
AR4PG124	Detalle	
<b>Área Marina Protegida Namuncurá-Banco Burdwood</b>	H501401	Completa
	AR204130	Oeste AMPNBB
	AR204160	Oeste AMPNBB

A excepción de la carta H501401, todas las cartas náuticas fueron recibidas en formato vectorial IHO S-57 (también conocido como S57). Este formato fue desarrollado por el Comité de Requisitos Hidrográficos de la Organización Hidrográfica Internacional (IHO, 2014) para el intercambio de información vectorial hidrográfica, utilizado generalmente para cartas náuticas. Los archivos de datos individuales de S57 tienen una extensión de \*.000 en su versión inicial. A estos se añaden archivos con extensiones correlativas \*.001, \*.002, etc. a medida que se realizan actualizaciones de los datos. De este modo se facilita el mantenimiento de la información actualizada sin necesidad de editar los archivos originales.

Para la lectura y extracción de los datos de sondas presentes en estos archivos se utilizó la herramienta ogr2ogr de la suite de utilidades geoespaciales GDAL y un script *ad hoc* para depurarlos y convertirlos a un formato CSV con datos en columnas XYZ.

La carta H501401 es una carta especial del área del Banco Burdwood, con sondas que coinciden con la carta H50 de todo el Mar Argentino. Ninguna de estas cartas estaba disponibles en formato IHO S-57 en el momento de la realización del trabajo por lo que las sondas se digitalizaron a partir de la carta en formato ráster georreferenciado, puesta a disposición también por el Servicio de Hidrografía Naval.

Todos los datos de profundidad extraídos de las cartas náuticas están referidos a la marea astronómica más baja (*lowest astronomical tide*, LAT), que se define como el nivel de marea más bajo que se puede predecir que ocurrirá en condiciones meteorológicas promedio y en cualquier combinación de condiciones astronómicas. Este es un valor teórico que se calcula matemáticamente mediante un análisis armónico que incluye los niveles de mareas de los últimos 18 años y medio (los dos períodos de oscilación sustanciales para la fluctuación de las mareas).

A pesar de que su uso es común a muchos países, esta no es la única referencia de marea válida (**Figura 3**) ni la única utilizada en Argentina. El SHN para sus tablas de marea utiliza el nivel medio de marea baja (*mean lower low water*, MLLW) en cada uno de los puertos de referencia que luego refiere a planos de reducción que varían de una carta a otra, y que aproximan el LAT.



## USA Tidal Levels

Showing Boundaries of Private Ownership by State

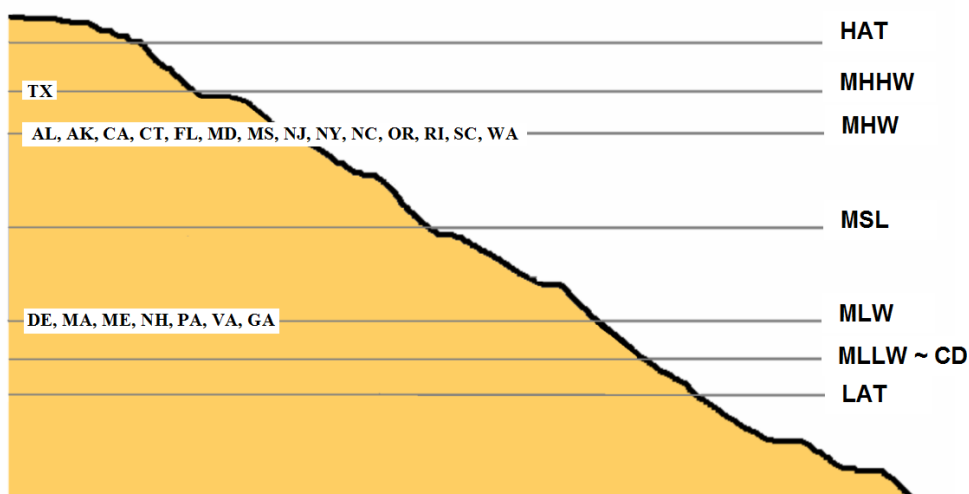


Figura 3. Esquema de referencias de marea. Fuente: [www.geomatix.net](http://www.geomatix.net)

En este proyecto las diferencias entre LAT y MLLW, que son del orden de las decenas de centímetros, han sido consideradas despreciables, teniendo en cuenta el procesamiento posterior que se realizará a los datos (unión de información de diferentes fuentes, interpolación, etc.). Por esta razón se han considerado ambas referencias comparables.

## 2.2 Datos acústicos

En Argentina existen diferentes instituciones que han contado tradicionalmente con embarcaciones que les permitían realizar campañas de toma de datos en el mar. Denominadas oceanográficas o pesqueras, en función de sus objetivos prioritarios, en todas estas campañas se adquieren datos de diferente naturaleza: oceanográficos, biológicos, etc.

Aunque es indispensable para las embarcaciones de estas instituciones contar con equipos acústicos de navegación (por razones de seguridad), además todas ellas incluyen entre sus objetivos de trabajo algunos que pueden ser cubiertos a través del análisis de información acústica: evaluación de *stock* pesquero, estudios topográficos, caracterización de fondos, etc. Por esta razón, en cada una de estas campañas, se adquieren datos acústicos que pueden ser analizados, haya sido este su objetivo original o no, para la caracterización de la batimetría del área.

Estas instituciones son tres:

- Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP)
- Servicio de Hidrografía Naval (SHN)
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET).

En este trabajo se ha solicitado a cada una de las entidades anteriores los datos acústicos de todas aquellas campañas que se hayan realizado con equipamiento que permita su adquisición.

El Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP) realiza regularmente campañas de investigación dirigidas al estudio y evaluación de organismos marinos pelágicos y bentónicos. Por esta razón todos sus buques cuentan con ecosondas científicas o pesqueras cuyos datos son adquiridos en cada campaña. Aunque el objetivo de estos datos no es la caracterización topográfica del fondo y, por lo tanto, estos datos no se procesaban con esta finalidad, a raíz de la puesta en marcha de este proyecto y de la solicitud de los datos, el Gabinete de Hidroacústica del INIDEP generó un repositorio batimétrico. Este repositorio lo compone la información de localización y profundidad (XYZ) obtenida tras el procesamiento de la información acústica de una serie de campañas realizadas. Las campañas incluidas fueron escogidas para maximizar el área caracterizada evitando la repetición de información en derrotas cercanas. El repositorio disponible para su uso contiene archivos de datos batimétricos con una resolución horizontal degradada (en promedio, un dato cada 5m) y homogenizada a lo largo del derrotero de cada campaña, así como un control de calidad (ver detalles en Sonvico *et al.*, 2021).

La información adquirida en campañas oceanográficas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) es procesada y depurada por el servicio para la elaboración de las cartas náuticas que el mismo pone a disposición del público general. Si bien en el marco de este trabajo se solicitaron los archivos acústicos originales para poder contar con mayor cantidad de datos y resolución espacial (en especial en las áreas donde fueron utilizadas sondas acústicas *multibeam*), la naturaleza militar de la institución dota a esta información de un carácter sensible que no permitió su cesión para este trabajo. Debe tenerse en cuenta por lo tanto que es posible que para alguna de las zonas dentro de las áreas de estudio, el SHN cuente con batimetría de resoluciones mayores allá donde fue realizado un levantamiento topográfico con sondas acústicas *multibeam*.

El Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET) consta de 16 Centros Científico Tecnológicos (CCT) dentro de los cuales se integran unas 300 Unidades Ejecutoras. Varias de estas Unidades Ejecutoras tienen líneas de investigación marinas y cuentan con equipamiento acústico propio o participan de campañas sobre buques oceanográficos del CONICET.

En concreto, en el AMPNBB se han venido realizando campañas oceanográficas todos los años desde el 2013, cuando se creó el Área Marina Protegida Banco Namuncurá en la Zona Económica Exclusiva Argentina, bajo los auspicios de la decisión II/10 del convenio de biodiversidad biológica de Yakarta (aprobada en la Convención Sobre la Biodiversidad (CBD) de 1995), el cual promueve la creación de áreas marinas y costeras protegidas. En el marco de la actual consultoría, se tuvo acceso a datos acústicos adquiridos durante el desarrollo de 5 campañas oceanográficas a bordo del ARA Puerto Deseado. Este buque cuenta con una sonda científica Simrad EA600s y dos transductores montados en el casco de la embarcación que trabajan a 12 y 200 kHz respectivamente. La información de 4 de estas campañas (la quinta fue descartada debido a un problema en la adquisición de la información GPS) fue procesada y corregida para su uso en la generación de superficies batimétricas (consultar Sánchez-Carnero, N. 2022. *Base de datos batimétrica obtenida tras el procesamiento y depuración de los datos adquiridos en las campañas acústicas en el área del Banco Burdwood*). Estos datos serán incluidos en la base final del AMPNBB.

Además de la base previa, en este caso se contó con datos para el AMPNBB adquiridos por el Grupo de Prospección Geológica y Geofísica Lacustre y Marina (GeofLaMa) del Instituto de Geociencias Básicas, Aplicadas y Ambientales de Buenos Aires (IGEBA) en el marco de un convenio de colaboración CONICET- YTEC que contempló la adquisición de datos en offshore a realizarse en 9 campañas. Estas campañas se realizarían dentro de la agenda de trabajo del Grupo de Trabajo de Geología Marina de Pampa Azul (GTGM). De las cuatro campañas realizadas hasta el momento, todas ellas a bordo del ARA AUSTRAL, la GTGM-YTEC 1-Malvinas Sur pudo tomar datos de un área al oeste al Banco Burdwood. Estos datos fueron adquiridos con la sonda multibeam Simrad EM122.

Los datos solicitados a todas estas instituciones para las dos áreas de estudio han sido procesados y corregidos para su uso siguiendo la metodología mostrada en la sección 3 de este informe.

Por último, en el año 2020, en el marco del proyecto “Fortalecimiento de la Gestión y Protección de la Biodiversidad Costero Marina en Áreas Ecológicas clave y la Aplicación del Enfoque Ecosistémico de la Pesca (EEP)”, se realizó una consultoría con el objetivo de realizar una grilla batimétrica del Área Marina Protegida Namuncurá- Banco Burdwood y Banco Burdwood II (AMP NBB-BB2). Para la elaboración de esta grilla batimétrica se utilizaron datos acústicos procedentes de campañas realizadas entre 2017 y 2019, así como cartas náuticas (H-50, revisada en 2011 y H-5014, revisada en 2014).

Como resultado de este trabajo se generó una grilla batimétrica de 754.551 nodos, con una resolución espacial de 0,005° x 0,005° (aprox. ~320 m), cubriendo el área comprendida entre el paralelo 53,5°S (al norte) y el paralelo 56°S (al sur) y entre las longitudes 62,5°O y 55,5°O.

En la evaluación de calidad de esta grilla, la consultora responsable de su preparación identificó varias limitaciones que aconsejaron que fuese recalculada una vez que se contase con un mayor número de datos de profundidad, especialmente en la zona del Banco Burdwood, donde la cobertura era muy pobre y los modelos globales no resolvían el detalle del área.

En este trabajo los datos acústicos utilizados por la consultora fueron incluidos en la base de datos batimétrica generada para el AMPNBB. Estos datos no se incorporaron en su formato original sino en el formato puesto a disposición por la consultora, tras los procesos de corrección y depuración que les fueron aplicados (ver detalles en los informes relativos a dicha consultoría). Las tres bases de datos incorporadas fueron:

- datos adquiridos por la ecosonda multihaz SIMRAD ME70 configurada en módulo batimétrico *Bathymetric option* (ME70-BO), registrados en las campañas realizadas por el INIDEP con el buque BIP Víctor Angelescu en el AMPNBB durante los años 2018 y 2019.
- datos adquiridos por la ecosonda monohaz SIMRAD EK80 durante la campaña realizada por el INIDEP a bordo del buque BIP Víctor Angelescu en el año 2019.
- datos adquiridos por la sonda multihaz EM122 durante la campaña Namuncurá F3 realizada durante 2017 a bordo del buque ARA "Austral".

## 2.3 Datos procedentes de otras fuentes

### Datos procedentes de estaciones de muestreo

Aunque el objetivo no incluya la caracterización de la batimetría o incluso del fondo marino, cuando se realizan estaciones de muestreo a bordo de embarcaciones científicas es protocolo recoger, junto con la longitud y la latitud, el valor de la profundidad. Por esta razón son varias las instituciones que cuentan con datos de profundidad asociados a estaciones de muestreo:

- El Gabinete de Ambiente Marino del INIDEP ha adquirido datos de la columna de agua mediante el uso de sensores CTD (Conductivity-Temperature-Depth) durante las campañas pesqueras del INIDEP, desde el año 1969 hasta la actualidad (Base Regional de Datos Oceanográficos (BaRDO)). Estos datos, además de contar con información relativa a las características oceanográficas de la columna de agua, cuentan en algunos casos con información batimétrica que, junto con el resto de variables, es sometida a controles de calidad (INIDEP- Informe de investigación N°014, 2008), así como con información relativa a la fecha y hora de la estación, lo que permite la corrección de marea. Aquellos datos batimétricos procedentes de esta base que superaron los controles de calidad, fueron utilizados en este trabajo.
- El Servicio de Hidrografía Naval cuenta con datos de 4390 estaciones de muestreo distribuidas a lo largo del mar argentino. En cada una de estas estaciones se tomaron valores de variables oceanográficas a diferentes profundidades, en muchos casos llegando hasta el fondo. A pesar de ser una información de gran calidad e interés, al no contar con ningún registro que nos informe de si en cada estación se alcanzó, o no, el fondo marino, no nos ha sido posible aprovechar estos datos para la generación de la base batimétrica de las áreas de estudio. Cabe destacar que no por ello pierde su interés para otros fines de caracterización de la columna de agua.
- Además, en el marco de este trabajo, junto con información relativa a la batimetría, se ha solicitado a las personas información granulométrica disponible del fondo. De este modo se cuenta con una pequeña base de datos que contiene información batimétrica. A pesar de la utilidad potencial de esta información, desafortunadamente no contamos con la información temporal asociada a cada dato, por lo que no es posible realizar la corrección de marea. Por esta razón, solo se incluirán en este análisis los datos batimétricos asociados a estaciones de muestreo en el área AMPNBB (cedidos por la Dra. Luciana Riccialdelli), donde la falta de corrección de marea no puede incluir un error relevante.

### **General Bathymetric Chart of the Oceans**

La General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), es una base de datos batimétricos global desarrollada por un grupo internacional de expertos en cartografía de fondo que trabajan bajo el auspicio de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO. La plataforma GEBCO pone a disposición una serie de productos batimétricos entre los que se incluyen grillas batimétricas regionales y globales. La resolución espacial de esta información es de 15" x 15" (lo que corresponde a aproximadamente 380 m en las latitudes del FMRP y 265 m en las latitudes del AMPNBB).

Para evitar incluir información procedente de procesos de interpolación previos, en este trabajo no se utilizaron todos los valores de los nodos de la malla GEBCO localizados dentro de cada una de las áreas de estudio. Solamente se incluyó la información batimétrica de aquellos nodos en los que la base GEBCO reportaba contar con algún dato original (procedente de registros acústicos, cartas náuticas, etc.).

Dado que los datos GEBCO utilizan como *datum* vertical el nivel medio de marea, en el área del FMRP fue necesario aplicar una corrección de 0.75 m para llevarlos a valores de marea baja. Esta corrección se consideró despreciable en el área del AMPNBB.

No se utilizaron otras bases de datos globales como la ETOPO1 (Amante y Eakins, 2009) por tener una resolución espacial muy baja (mayor a 1km de tamaño de píxel).

## 3. Depuración y corrección de datos

### 3.1 Bases batimétricas: generación y homogenización

Cualquier base de datos batimétrica requiere de tareas de depuración y corrección que permitan compensar el efecto de la marea, eliminar el efecto del movimiento de la embarcación, identificar artefactos en la generación de datos o eliminar valores erróneos aislados. En este caso, al trabajar con diferentes bases de datos, algunos de los procesos previos deben ser realizados de forma independiente en cada base original, debido a sus particularidades, y otros pueden ser realizados una vez que se ha construido una única base de datos con la información de todas las fuentes.

Las correcciones de marea, movimientos de la embarcación e identificación de artefactos fueron realizadas en cada una de las bases de datos de forma independiente, atendiendo a las características de cada una de ellas. En muchos casos estas correcciones ya habían sido realizadas por los grupos de trabajo que proveyeron la información. Aun así, a continuación, se explica de forma general la metodología requerida para la realización de las correcciones de marea y de movimiento de la embarcación.

Todos los datos batimétricos procedentes de las distintas fuentes descritas previamente (Sección 2) fueron añadidos a una base de datos única para cada una de las áreas de interés. Cada una de estas bases de datos completas fueron sometidas a procesos de identificación y eliminación de datos erróneos. Del mismo modo fue evaluado su nivel de coincidencia.

### 3.2 Corrección de marea

La profundidad de un punto determinado es un valor que varía a lo largo de las horas pasando de un máximo (en el momento de marea alta) a un mínimo (en el momento de marea baja), con diferencias entre ellos que varían entre los centímetros (en mares interiores como el Mar Mediterráneo) hasta la decena de metros, en áreas donde la topografía y morfología de la costa acompaña en estas diferencias.

La costa Argentina es un área con rangos mareales medios, que varían desde los 0,60 m en Puerto San Fernando hasta los 8,32 m en Puerto Río Gallegos. En el Frente Marítimo del Río de la Plata el rango mareal toma valores alrededor de los 1,5 m. Esta diferencia, si bien comienza a perder importancia a medida que nos adentramos en áreas de mayor profundidad (por su aportación relativa), es muy relevante en la zona costera, por lo que una correcta corrección de marea se hace imprescindible. Por su parte, el AMPNBB es un

área con profundidades altas (profundidad promedio ~950 m y valores máximos ~4.600 m) donde la corrección de marea podría considerarse despreciable, sin embargo, en este trabajo se aplicó igualmente la corrección de marea en aquellos casos en los que se disponía de información del tiempo de adquisición para realizarla.

Desafortunadamente, Argentina no cuenta con modelos de marea propios actualizados y detallados para la mayor parte de su costa, por lo que en este trabajo se evaluó el uso de dos sistemas de predicción de marea gratuitos de cobertura mundial: XTide y OTPS (*Oregon State University Tidal Prediction Software*).

El XTide es un software que calcula el nivel de marea basándose en los armónicos precalculados para una serie de estaciones de referencia (de las que se dispone de los constituyentes de la marea astronómica) y secundarias (de las que se dispone sólo de las amplitudes y desfases de alta y bajamar respecto a estaciones de referencia) (Flater, 2005).

El software OTPS se basa en datos obtenidos mediante inversión del modelo barotrópico de marea asimilando datos de altimetría radar de las misiones TOPEX/POSEIDON, TOPEX tándem, ERS, y de mareógrafos locales (Egbert *et al.* 2002). El software emplea mapas regionales precalculados con las amplitudes complejas de las distintas ondas de marea (constituyentes). En particular, para las áreas de interés se ha usado la solución regional para la plataforma continental patagónica (<http://people.oregonstate.edu/~erofeevs/PatS.html>), con una resolución espacial de 2' de arco (2 millas náuticas en dirección NS).

Ambos sistemas cuentan con ventajas e inconvenientes de cara a su uso.

El principal inconveniente del software OTPS es su resolución espacial, que puede hacer la corrección menos precisa en las áreas más costeras donde, por otro lado, esta es más relevante. Además, este software usa como marea de referencia una marea media (MSL, mean sea level), por lo que es necesario posteriormente llevar las cotas corregidas a un estado de marea baja.

El software XTide, por su parte, requiere hallar el puerto (de referencia o secundario) más próximo al valor batimétrico que se quiere corregir. Además, por ser sus tablas referidas a puertos (esto es, a mareógrafos costeros), sus predicciones son peores conforme los puntos se hallan más alejados de la costa. Por último, los datos de tablas de marea de Xtide no se hallan actualizados: inicialmente se distribuyeron de forma colaborativa, tomándolos de fuentes oficiales o procedentes de cálculos de contribuyentes al software, pero desde 2012, debido a problemas legales de propiedad intelectual de los armónicos de marea planteados por la oficina hidrográfica del Reino Unido en 2001, sólo se mantienen las tablas correspondientes a Estados Unidos y no otras, como las de los puertos argentinos, por lo a día de hoy es difícil evaluar o asegurar su calidad.

En este caso se decidió utilizar el software OTPS por sus ventajas respecto a Xtide, a las que se suma la velocidad de cálculo que permite, y aprovechar las predicciones del software XTide y los cruces de transectos acústicos (localizaciones con dos adquisiciones



de datos en momentos diferentes) para validar la corrección del primero. Los resultados mostraron un mejor desempeño de la corrección con el software OTPS que con el Xtide (comunicación personal).

Por último, para hacer la corrección desde los datos llevados al nivel medio (MSL, *mean sea level*) al nivel medio de marea baja (MLLW, *mean lower low water*), se ha modificado el software sumando a la altura de marea calculada respecto al MSL la suma de las amplitudes de los armónicos principales en un régimen semidiurno (M2, K1 y O1), de modo que el origen de mareas se desplace al punto de marea baja media.

Esta corrección de marea fue aplicada a todas las bases de datos a excepción de las cartas náuticas del SHN o aquellas que ya fueron obtenidas con corrección a marea baja (como los datos adquiridos con sondas multihaz (*multibeam*), o la grilla batimétrica del AMPNBB generada en el año 2020, en el marco de este mismo proyecto, por la consultora Lic. Stefania Wörner).

En el caso de los datos adquiridos con sondas *multibeam* además de la marea se realizaron correcciones del efecto del movimiento en la embarcación. En este caso, las correcciones fueron implementadas por el grupo que adquirió los datos. Una descripción detallada del efecto del movimiento de la embarcación en los datos de fondo así como de las correcciones requeridas puede encontrarse en Sánchez-Carnero, N. 2021. **Base de datos batimétrica para las áreas de Frente Valdés y Golfo San Jorge** (en concreto, en la sección **3.3 Corrección del efecto de movimiento de la embarcación**).

### 3.3 Armonización de referencias batimétricas y eliminación de fuentes con fuertes desviaciones

A pesar de las correcciones de marea y movimiento de la embarcación, las diferentes fuentes de datos pueden contar con sesgos debido a las características de los equipos o su montaje, a errores en el funcionamiento de los mismos, al procesamiento realizado con ellos o incluso a errores humanos en la transcripción de datos (en la información de las estaciones de muestreo, por ejemplo).

Antes de unir los datos de las diferentes fuentes en una única base, la información de cada fuente de datos fue revisada en busca de errores sistemáticos o puntuales. Para ello se compararon las profundidades de los datos batimétricos en cada una de las fuentes atendiendo a la fiabilidad de éstas. En nuestro caso, para el área FMRP la fiabilidad se estableció (en orden descendente) comenzando por las cartas náuticas, los transectos procesadores por el gabinete acústico del INIDEP, los datos de la base BaRDO y, por último, la información de la plataforma GEBCO. En el caso del AMPNBB el orden

establecido fue: cartas náuticas, información acústica procesada en esta consultoría (ver Sánchez-Carnero, N. 2022. op. cit.), información acústica obtenida con sondas *multibeam* durante la campaña GTGM-YTEC 1-Malvinas Sur, los transectos procesados por el gabinete acústico del INIDEP, la información utilizada para la generación de la grilla batimétrica del AMPNBB calculada por Stefanía Wörner, los datos de la base BaRDO, la información de estaciones de muestreo y la información de la plataforma GEBCO. Los datos se proyectaron en ese orden sobre la malla de interpolación y se ajustó la profundidad media en los puntos de cruce de cada fuente para que coincidiese con la de las fuentes mayor fiabilidad anteriores. Aquellos puntos o fuentes de datos que presentaron errores mayores fueron revisados, corregidos si era posible o eliminados.

El proceso anterior, sin embargo, no elimina los posibles sesgos evidentes cuando se trabaja con fuentes de datos diferentes. Para identificar y corregir estos sesgos se realizaron interpolaciones eliminando, en cada una de ellas, un 10% de los datos y calculando, posteriormente, el error de los puntos no incluidos en la interpolación. En el caso de que algunos de estos datos mostrasen un error elevado, la fuente de datos sería revisada. En nuestro caso todas las fuentes mostraron suficiente coherencia entre ellas como para mantenerlas en el cálculo.

## 4. Generación de superficies batimétricas

A partir de las bases de datos construidas con la información de las diferentes fuentes de datos se obtuvieron las bases batimétricas para cada una de las áreas de estudio. Para evitar artefactos en las áreas límite, en la zona costera del FMRP se incluyeron puntos a lo largo de la línea de costa, separados unos 20- 30 m entre ellos (un segundo de arco, correspondiente a la resolución del modelo SRTM) y con valor de profundidad 0, en la zona marina se utilizaron datos fuera del área de trabajo y se extendió la interpolación varios píxeles por fuera de la misma. Las sondas incluidas en estas áreas junto con los puntos situados sobre la línea de costa constituyeron las bases batimétricas de cada área de estudio.

Además, en ambos casos se estableció un área de amortiguación (*buffer*) de 10 y 50 km para el área FMRP y AMPNBB respectivamente. La información batimétrica incluida dentro de estos *buffers* fue incluida en las bases de datos utilizadas para calcular las superficies batimétricas. De este modo se evitó la generación de artefactos en los límites de las áreas de interés y, en el caso del AMPNBB, se pudo incluir la información obtenida con sondas *multibeam* en la campaña GTGM-YTEC 1-Malvinas Sur.

### 4.1 Algoritmo de interpolación

Existen múltiples métodos de interpolación de datos geográficos que ya están implementados en diversos programas de uso general. Cada uno de estos métodos cuenta con características propias que los hacen más o menos rígidos (permitiendo o no desviarse de los valores dados para un punto, interpoladores exactos o interpoladores aproximados) y más o menos sensibles a la distribución espacial de los datos (mostrando mejor respuesta frente a datos de distribución espacial muy heterogénea como son los batimétricos).

Trabajos previos han estudiado precisamente el desempeño de los métodos de interpolación más comunes ante la particularidad de datos distribuidos en transectas, mostrando el Universal Kriging (UK) y el Radial Basis Functions (RBF) los mejores resultados (Sánchez-Carnero *et al.*, 2012). Sin embargo, incluso con estos algoritmos, el efecto de las transectas es muy relevante y da lugar a artefactos que requieren de un proceso de corrección manual para su eliminación o bien del submuestreo de los datos dentro de las transectas.

Estos métodos, también sufren de efectos de sobre-suavizado al hacer una estimación global de la función de correlación de la superficie (equivalentemente, del semivariograma), cuya estructura puede variar sobre áreas geográficas muy grandes y en las que las densidades de puntos, alta cerca de la costa y más dispersa lejos de ésta, impone un grado de generalización uniforme que hace sacrificar el detalle de unas zonas por la generalización de las otras.

Para evitar esto, en este trabajo se utilizó un algoritmo de interpolación basado en un proceso iterativo multirresolución, que permitiera aprovechar toda la información contenida dentro de las transectas acústicas sin generar artefactos en la superficie obtenida (Rodríguez-Pérez, enviado).

El algoritmo desarrollado busca generar una superficie batimétrica tal que, independientemente de la resolución de ésta (del tamaño de píxel) el valor de la profundidad interpolada en aquellos lugares donde existan datos de profundidad sea el valor medio de dicha profundidad. En el resto de los píxeles, sin datos, la superficie batimétrica se estimará como una media de profundidad en los píxeles vecinos. La naturaleza multirresolución del algoritmo permite emplear en las resoluciones más finas los valores previamente estimados en las resoluciones más groseras, facilitando así la generalización de la superficie interpolada y acelerando el algoritmo.

El algoritmo procede iterativamente repitiendo el proceso siguiente sobre mallas de resolución cada vez más fina, reduciendo el tamaño del lado del píxel a la mitad cada vez.

En cada píxel de la malla se hace una estimación de la profundidad media en él a partir de los valores batimétricos que contiene. Si se trata de la menor resolución de trabajo (mayor tamaño de píxel) el cálculo es directo con los valores presentes en el píxel. Si estamos trabajando con alguna de las resoluciones mayores (menor tamaño de píxel), el valor de la profundidad media en él se estima como el promedio de las profundidades estimadas en los 8 píxeles vecinos; en caso de que alguno de esos vecinos no tenga datos con los que calcular su profundidad (en esta resolución), entonces se emplean los valores de profundidad estimada en ellos en la resolución inmediata superior (con píxeles de tamaño doble).

El algoritmo es interpolador exacto en aquellos píxeles en los que hay datos (estima la batimetría como el valor medio de los datos batimétricos en él) y generalizador en aquellos píxeles sin datos batimétricos. El esquema multirresolución de subdivisiones recursivas hace también que sea óptimo en cuanto a la velocidad del cálculo (se itera sobre una malla de tamaño  $L$  sólo del orden de  $\log_2 L$  veces, y cada vez sólo con el nivel de detalle requerido).

El método permite asignar un peso a los valores batimétricos de partida, basado en su fiabilidad, en su coincidencia con otros valores batimétricos cercanos, etc. En ese caso, en lugar de calcular la profundidad como una media simple en cada píxel, se calcula como una media ponderada con dichos pesos. En nuestro caso, los pesos los asignamos mediante un algoritmo de validación cruzada. Se extrae un 10% de los puntos batimétricos, uniformemente distribuido en el área de interpolación, y se calcula una interpolación con pesos unidad; esto se repite 10 veces extrayendo subconjuntos disjuntos entre ellos. Con las 10 batimetrías parciales calculadas, se asigna a cada punto batimétrico una varianza de interpolación  $V_n$  (correspondiente a la varianza de la batimetría calculada en el correspondiente píxel) y de ella se obtiene el correspondiente peso de Fisher  $W_n$  como  $1/(1+V_n/V)$  donde  $V$  es la media de las varianzas de interpolación en todos los puntos.

La aplicación de estos pesos permite, entre otras cosas, suavizar el efecto de los datos distribuidos en transectas, así como evitar la influencia excesiva de zonas con mucha densidad de puntos sobre otras cercanas de baja densidad.

El algoritmo cuenta también con dos limitaciones importantes. La primera es que es interpolador exacto, lo que implica que no es robusto ante la presencia de valores extremos: en el píxel que los contenga, se notará su efecto y, posiblemente, en los píxeles vecinos sin datos batimétricos hacia los que se generalice el valor de profundidad. La segunda es debida al modo en que se realiza la partición multirresolución: el resultado de la generalización será sensible a la posición particular de los límites entre celdas en cada nivel de resolución, al heredarse para una resolución más fina los valores de batimetría estimados a partir de las celdas vecinas en el nivel superior. Este efecto es más dramático cuanto más alejado está un píxel de las zonas con valores batimétricos reales y puede dar lugar, entre otras cosas, a escalones (aunque se atenúan en los pasos de generalización, que actúan de suavizado) y a extrapolaciones irreales (como valores altos de profundidad en zonas alejadas de los puntos de medida simplemente porque en ellas se generalizó una profundidad promedio de toda el área de estudio en las primeras iteraciones a resoluciones groseras).

## 4.2 Depuración de errores sistemáticos y eliminación de datos erróneos

El proceso de interpolación anterior se realiza en el área de estudio 10 veces. Para ello la base de datos batimétricos (sin incluir la línea de costa) es dividida aleatoriamente en 10 subgrupos de datos y cada interpolación se realiza excluyendo uno de estos (incluyendo siempre los puntos de la línea de costa).

Para cada punto en uno de los 10 subconjuntos, se calcula el error de interpolación respecto a la interpolación que lo excluyó (la diferencia entre su profundidad y la profundidad interpolada, considerando el signo). Para determinar si un punto batimétrico se conserva o se depura de la base de datos se sigue el criterio de las “barreras” de Tukey (Tukey, 1977): se determina el intervalo intercuartílico de la distribución de errores de interpolación y se excluyen como extremadamente desviados aquellos puntos cuyos errores se hallen más de 3 veces el rango intercuartílico por debajo del cuartil inferior (respectivamente, por encima del cuartil superior).

Una vez excluidos estos datos con desviaciones extremas (*far out*, en terminología de Tukey), se vuelven a generar las 10 interpolaciones anteriores empleando la restante base de datos batimétricos con la misma división en 10 grupos de datos (e incluyendo, como antes, la totalidad de la línea de costa).

## 4.3 Relajación de la superficie interpolada

Cada superficie batimétrica interpolada presenta todavía ligeros artefactos por inexactitudes en puntos batimétricos no detectadas en los procesos de depuración anteriores y que se destacarían al calcular las derivadas de la superficie (en las que se basan algunas variables batimétricas). Por ello, para suavizarlas, se aplica un procedimiento iterativo de relajación de los datos batimétricos a sus “posiciones correctas”.

El método iterativo de relajación realiza dos operaciones. Primero, estima la superficie batimétrica y la incertidumbre de ésta en cada píxel mediante el método de validación cruzada descrito más arriba. Posteriormente, en cada punto batimétrico, se realiza una corrección de la profundidad proporcional a la diferencia entre el dato de partida y la superficie interpolada media (resultado de promediar las 10 realizaciones, una de ellas sin el punto en cuestión) y también proporcional al complementario del peso de Fisher correspondiente. La iteración se repite 10 veces.

Este método logra suavizar la superficie, minimizando los gradientes entre píxeles contiguos (evaluados en todas direcciones) moviendo los puntos menos confiables, de acuerdo con la validación cruzada. Pero, al mismo tiempo, evita que este suavizado difumine en exceso las características de la superficie original, alejándola de su forma real, como sucedería con métodos de filtrado sobre el producto ráster. De este modo, el gradiente de un píxel solo será minimizado apreciablemente cuando esto no produzca una modificación excesiva del valor de profundidad de ese píxel respecto a la superficie de partida. Esto garantiza que el método iterativo se acerca cada vez más a la superficie suavizada óptima.

## 4.4 Validación de la superficie obtenida

La batimetría final se calcula como la media de las 10 batimetrías con los datos relajados. El error local en cada píxel de esa batimetría final se estima como la desviación típica de los correspondientes valores de la profundidad en esas batimetrías. Ese error local caracteriza, especialmente, aquellas regiones en las que la incertidumbre de la superficie batimétrica es mayor, debido a la incertidumbre atribuida a los puntos empleados en el cálculo. También informa sobre la reproducibilidad y robustez del resultado. Como se ha dicho, el error estimado arriba caracteriza la incertidumbre debida a la distribución de datos que influye sobre la reproducibilidad y robustez del resultado. Es, por tanto, un error asociado a la precisión del método (cuál es la dispersión de la estimación), pero no informa sobre la exactitud de la superficie batimétrica (cómo de cerca se halla la interpolación de los datos reales).

Para comparar estadísticamente la predicción de la superficie interpolada con los valores realmente medidos en los puntos batimétricos, se empleó el 10% de los puntos batimétricos excluidos de cada interpolación y se calcularon estadísticos a partir de las diferencias entre profundidades medidas y profundidades estimadas. Estos estadísticos fueron:

- La diferencia de profundidades media de los puntos de validación respecto a la superficie batimétrica interpolada (sesgo de la superficie interpolada) ( $\Delta z$ ).
- El error cuadrático medio (RMSE) de los puntos de validación respecto a la superficie batimétrica interpolada (S).
- El coeficiente de correlación calculado entre los valores de profundidad de los puntos de validación y los correspondientes a los píxeles de la superficie batimétrica interpolada. Este coeficiente (elevado al cuadrado) nos indica qué fracción de la variación de profundidad en los puntos de validación es explicada por la superficie interpolada, y complementa la información del RMSE indicando cómo de importante es dicho error respecto de las variaciones globales de la batimetría (C) (Ranganathan *et al.*, 2017).
- El índice de concordancia (*index of agreement*) entre la profundidad de los puntos de validación y la superficie interpolada, combina el significado de los dos anteriores: tiene en cuenta que los valores de profundidad en los puntos batimétricos y en la batimetría interpolada pueden estar correlacionados sin ser coincidentes (D) (Ranganathan *et al.*, 2017).

## 4.5 Interpolación fractal de la superficie

La superficie interpolada anteriormente posee buenas propiedades en las diferentes escalas en que se dispone de datos. Sin embargo, esas propiedades no se distribuyen por igual en las diferentes escalas, siendo la superficie más irregular allí donde sigue los datos que indican las irregularidades del fondo marino, y más suave allí donde el algoritmo generaliza a partir de ellos. El algoritmo interpola la batimetría, pero no la textura del terreno.

Para lograr esto último se ha propuesto una variación en el algoritmo multirresolución, basada en las características fractales del fondo marino (Blondel, 2018) que sugieren describirlo localmente como un fractal autosimilar caracterizado por un exponente de Hurst tal que a una escala de tamaño  $L$  dado, la rugosidad es proporcional a  $L^H$ . De este modo, el algoritmo multirresolución descrito más arriba puede añadir en las zonas sin datos batimétricos una irregularidad aleatoria (de media cero), entre la observada a escalas más groseras (dada por la varianza de las profundidades respecto a la media) y la que se espera en la escala del píxel de la batimetría final (estimada a partir de los datos batimétricos disponibles). Por construcción la profundidad media en una escala más grosera seguirá siendo la correspondiente al valor medio de los datos batimétricos contenidos en ella.

La textura interpolada de este modo permite estudiar estadísticamente la geomorfología aplicando los métodos de caracterización local (basados en derivadas o filtros de vecindario) descritos en el apartado siguiente.

## 4.6 Cálculo de variables topográficas derivadas de la batimetría

A partir de la superficie batimétrica es posible calcular otras superficies derivadas de la misma que nos informan acerca de características topográficas del fondo marino. Las más habituales y de cálculo más directo son la pendiente del fondo y la orientación de esta pendiente. Pero existen muchas otras, habituales en trabajos de caracterización topográfica como son la rugosidad, la curvatura, el índice hipsométrico, etc. (Lecours *et al.*, 2016). Estas variables son a menudo utilizadas junto con la batimetría para realizar estudios de caracterización de fondos marinos (Ierodiaconou *et al.*, 2011; Micallef *et al.*, 2012, Sánchez-Carnero *et al.*, 2021), incluso en el contexto de la evaluación de la delimitación de áreas marinas protegidas (Sánchez-Carnero *et al.*, 2016).

En este trabajo se calcularon la pendiente, las orientaciones este y oeste (coseno y seno del ángulo de orientación), la curvatura media, el índice de posición bentónica (BPI; Walbridge *et al.*, 2018) y el índice hipsométrico (HI; Jiskoot *et al.*, 2009).



## 5. Presentación de resultados para las áreas de estudio

### 5.1 Área de interés Frente Marítimo del Río de la Plata

#### 5.1.1 Base de datos batimétrica

Las bases de datos obtenidas para el Frente Marítimo del Río de la Plata (FMRP), tras su corrección de marea, resultaron tal y como se describe a continuación:

##### 1) Cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval.

Las cartas náuticas obtenidas para el área de interés (área de estudio junto con un *buffer* de 10 km alrededor de la misma) sumaron un total de 34.934 sondas, con profundidades entre los 0 y 99 m, distribuyéndose a lo largo de toda el área de interés (**Figura 4**).

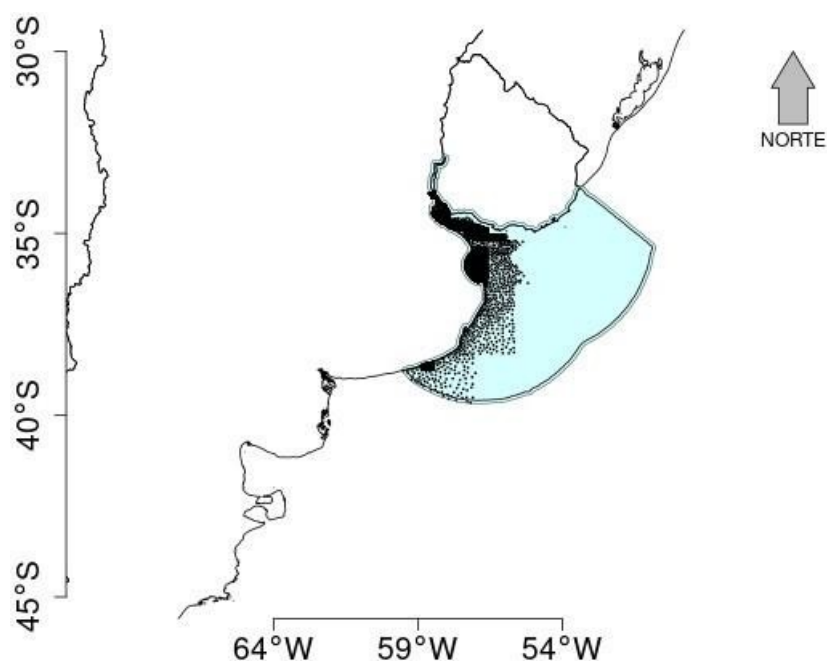


Figura 4. Sondas batimétricas procedentes de 26 cartas náuticas con datos en el área de interés

## 2) Información batimétrica generada a partir de los transectos de las campañas realizadas por el INIDEP

La información procesada y compartida por el INIDEP contribuyó en 2.218.424 datos dentro del área de interés, con valores de profundidad entre los 6,2 y los 517,3 m. Estos datos se distribuyen en todo el frente costero, sin cubrir las áreas interiores del río ni las zonas más externas (al este del área de interés) (**Figura 5**).

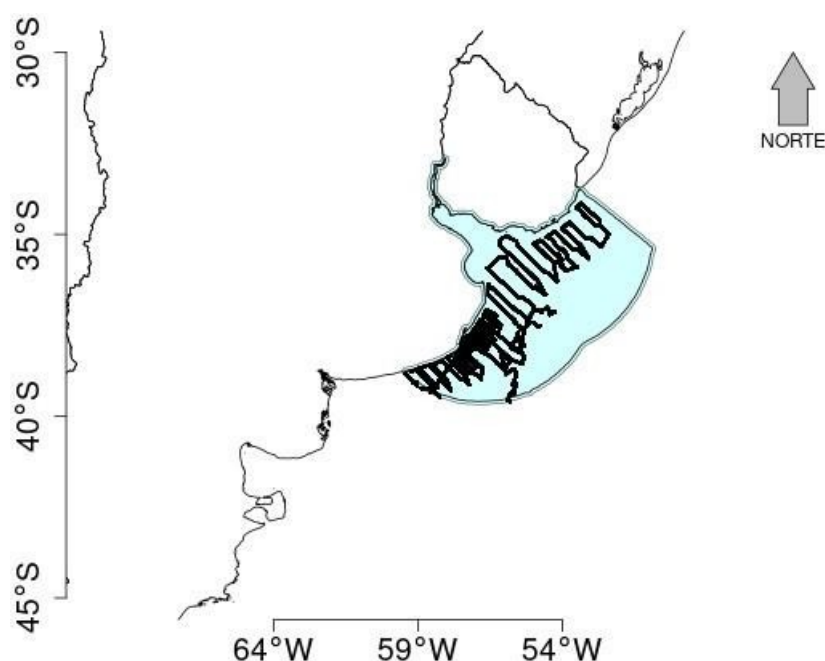


Figura 5. Sondas procedentes de la información batimétrica distribuida por el Gabinete de Acústica del INIDEP (Sonvico *et al.*, 2021)

## 3) Sondas procedentes de la Base Regional de Datos Oceanográficos (BaRDO) del INIDEP

La BaRDO cuenta con estaciones de muestreo con datos de profundidad a lo largo de todo el Mar Argentino. En nuestra área de interés se encontraron 7.631 de estas estaciones, con valores de profundidad entre 0.1 y 3.501 m, distribuidas a lo largo de toda el área de interés, a excepción de la parte más externa (**Figura 6**).

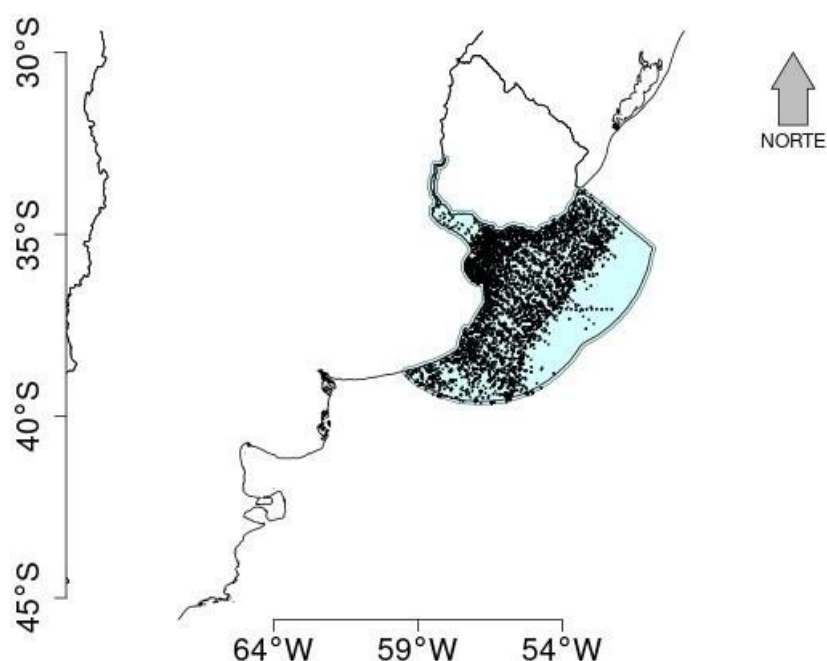
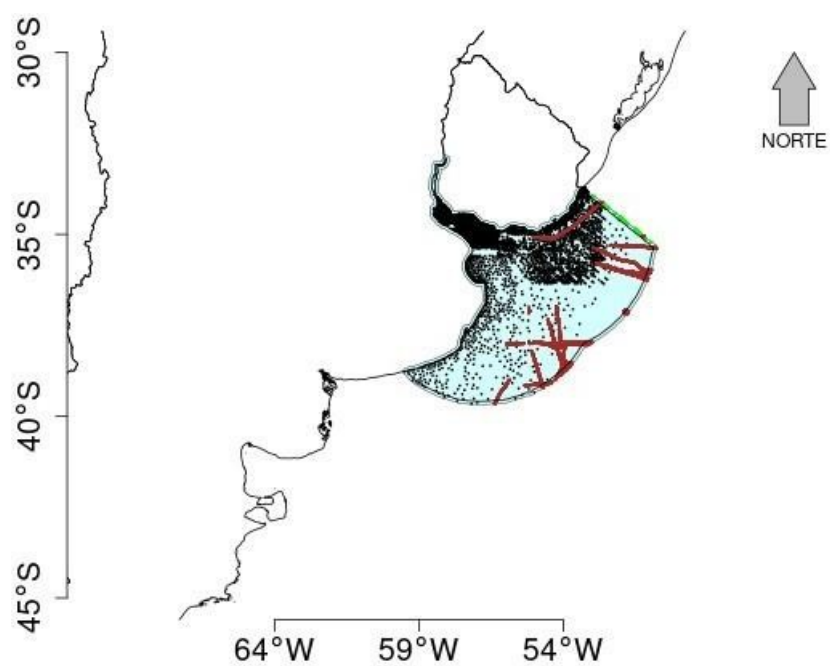


Figura 6. Sondas correspondientes a las estaciones de muestreo de la BaRDO del INIDEP

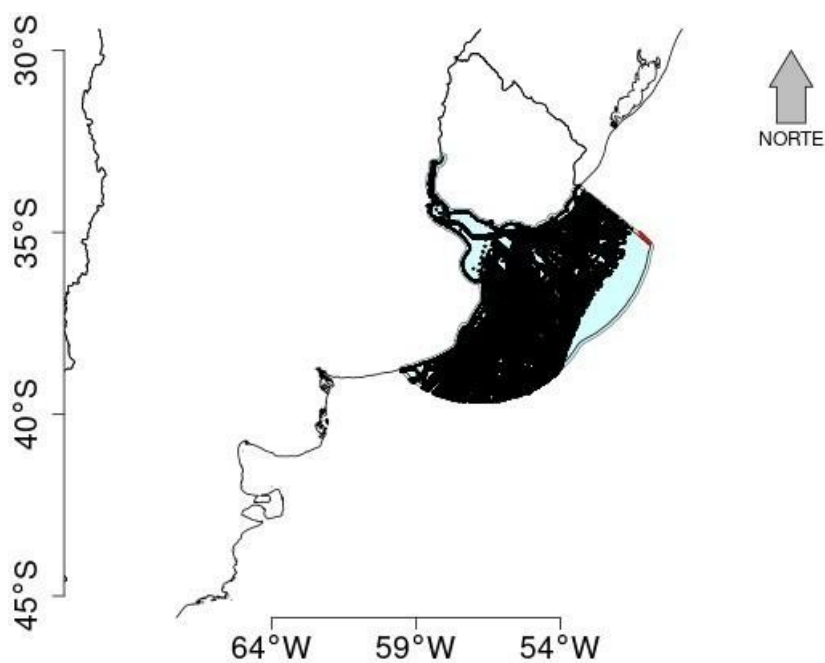
#### 4) Datos procedentes de la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)

Como sondas batimétricas se utilizaron aquellas localizaciones en las cuales la plataforma GEBCO reportó contar con datos originales adquiridos con sondas monohaz, *multibeam*, o con cartas náuticas. Para cada localización se extrajo el valor de profundidad de la grilla GEBCO.

Esta plataforma cuenta con una gran cobertura en el área de estudio por lo que se incluyeron un total de 398.462 datos con profundidades hasta 4.076 m. El 91,6% de los datos corresponden a medidas definidas por la plataforma GEBCO como de “métodos directos” y el 7,2% a datos procedentes de sondas *multibeam*. La contribución de las sondas monohaz, las cartas náuticas y los datos sísmicos es mucho menos. La combinación de todas las fuentes presenta una cobertura casi total del área de interés (**Figura 7 y Figura 8**).

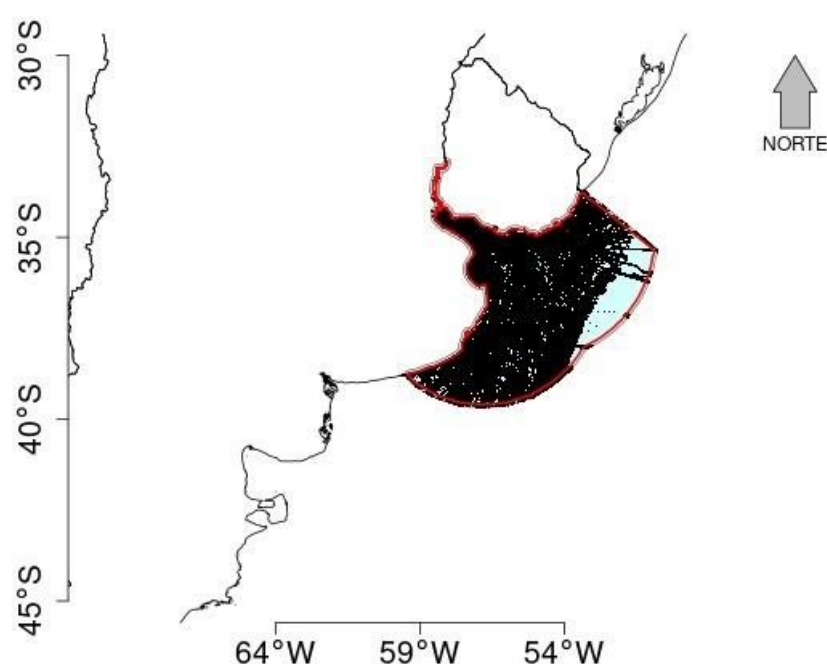


**Figura 7.** Localizaciones donde la plataforma GEBCO reporta contar con datos originales de profundidad. En verde las localizaciones para las que se cuenta con datos multibeam, en marrón monohaz y en negro cartas náuticas.



**Figura 8.** Localizaciones donde la plataforma GEBCO reporta contar con datos originales de profundidad. En negro los datos procedentes de una combinación de métodos directos y en rojo datos procedentes de medidas sísmicas.

Todas las bases anteriores fueron sometidas a los procesos de corrección descritos en los apartados 3.3 y 4.2 de este informe, que permitieron la eliminación de sondas erróneas o cuyos valores se identificaron como outliers (por alejarse de la superficie media calculada un valor mayor a un umbral). La base final para el área de interés del FMRP (que contiene al FMRP y un área de amortiguación de 10 km) contó con 652.158 sondas con profundidades de hasta 4.077 m. Las sondas están distribuidas prácticamente por toda el área de estudio, a excepción de la zona más oriental (**Figura 9**).

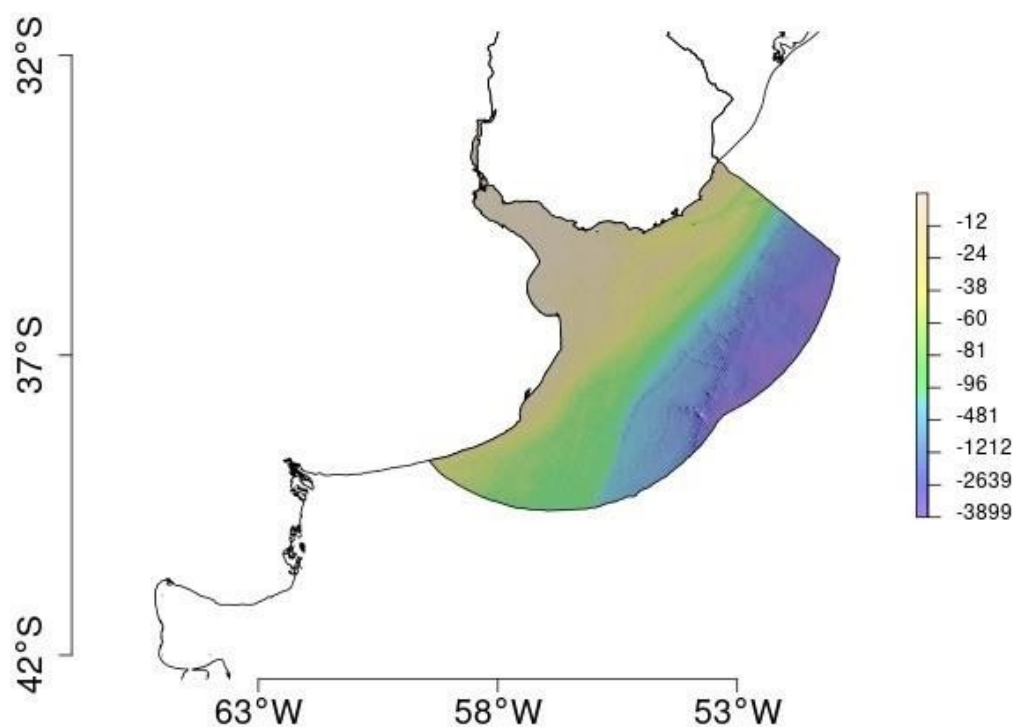


**Figura 9.** Sondas batimétricas totales utilizadas para la interpolación de la superficie batimétrica en el área del FMRP

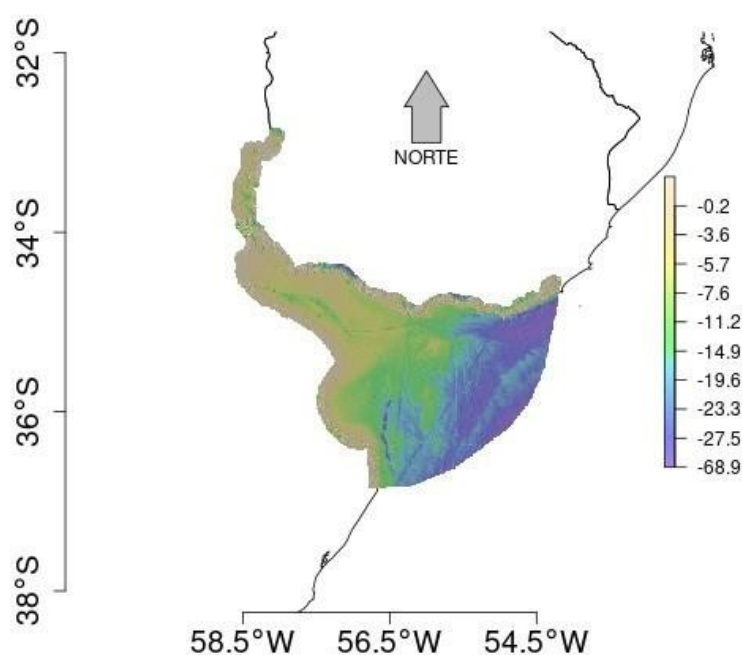
## 5.1.2 Superficie batimétrica

Utilizando la base de datos batimétricos anteriormente descrita, depurada atendiendo a las desviaciones observadas en cada una de las sondas en relación a las superficies interpoladas, así como a la desviación general de cada base de datos con respecto a las bases identificadas como de mayor fiabilidad (ver sección 4 del presente informe), se calculó una superficie batimétrica para toda el área de interés de 100 m de tamaño de píxel.

Esta superficie fue posteriormente recortada para el área de estudio FMRP (definida en la sección 1.2 de este informe). La batimetría obtenida para el FMRP presentó valores de profundidad de hasta 4.593 m (en la zona más oriental, frente a la costa de Uruguay) (**Figura 10**). Estos valores, superiores en casi 500 m a los valores máximos de la base de datos utilizada, se deben al proceso de extrapolación fractal que se produce en el área más profunda donde no se cuenta con datos suficientes para realizar una interpolación. La zona de la desembocadura muestra estructuras topográficas típicas de áreas con procesos sedimentarios activos (**Figura 8**), sin embargo, debe tenerse en cuenta que estas áreas son muy dinámicas y que por la naturaleza de los datos (procedentes de diferentes fuentes y momentos de adquisición), la topografía que representan puede ser el resultado de una mezcla de topografías presentes en momentos diferentes.



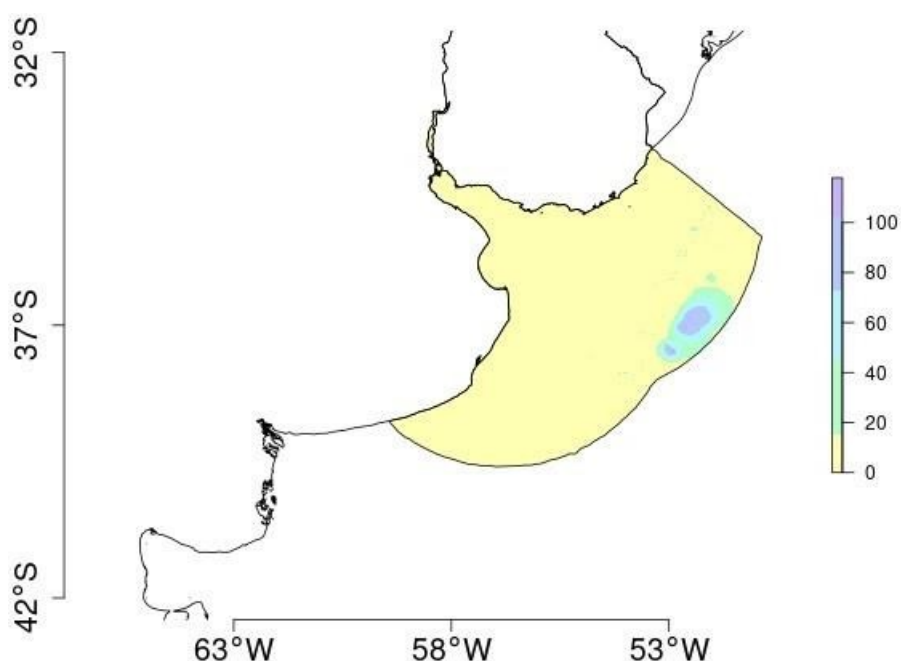
**Figura 10.** Superficie batimétrica calculada para el FMRP. Tamaño de pixel 100 m.



**Figura 11.** Detalle de la superficie batimétrica calculada para el FMRP. Tamaño de pixel 100m.

En lo relativo a su fiabilidad, atendiendo a los estadísticos calculados (sección 4.4 del presente informe), la superficie obtenida muestra una diferencia de profundidades media ( $\Delta z$ ) de aproximadamente 0,15 m, lo que quiere decir que hay un desplazamiento sistemático de los puntos originales de aproximadamente 15 cm respecto de la superficie batimétrica. Por otro lado, el error cuadrático medio (RMSE) de la superficie, evaluado por validación cruzada, fue de 15,8 m. En nuestro caso, los píxeles que muestran mayores errores (medidos como la desviación típica de los valores de profundidad de las 10 superficies interpoladas) son aquellos que se encuentran en el extremo noreste del área de estudio (**Figura 10**), es decir, en la zona con menor densidad de datos (**Figura 9**) y con profundidades mayores (**Figura 7**). Estos valores de desviación, incluso en los casos más extremos ( $>100$  m) representan poco más del 2% de la profundidad. Solo un 5,7% de los datos mostraron RMSE mayores a 15 m.

Tanto el coeficiente de correlación obtenido entre los puntos utilizados para la el cálculo de la batimetría y la superficie obtenida, como el índice de concordancia obtenido para esta superficie fueron mayores de 0,999. Ambos valores son esperablemente altos en una superficie ajustada ya que lo que evalúan es cuánta de la varianza asociada a un subconjunto de los datos de origen es explicada por la superficie interpolada usando el resto de los datos, siendo el resto debido al error cuadrático medio de dichos puntos respecto a la predicción. Es decir, una desviación de estos estadísticos respecto a la unidad, mostraría un sesgo y un número elevado de valores alejados de la superficie interpolada.



**Figura 12.** Desviación típica de las superficies batimétricas calculadas para el área del FMRP

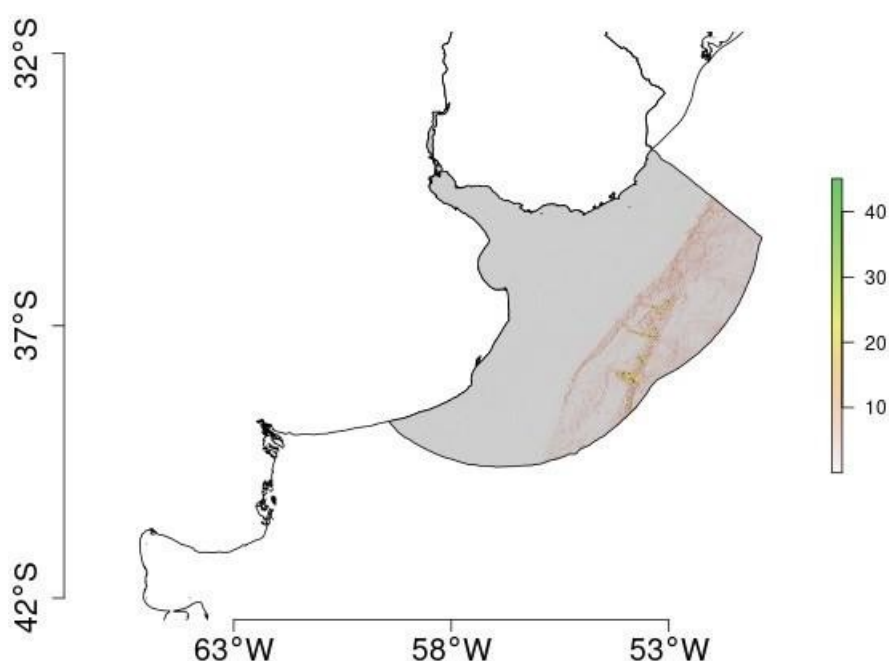
Por último, es necesario recalcar, que esta batimetría ha sido generada con un algoritmo que tiene por objetivo reconstruir, de la forma más fiel posible, las características topográficas del fondo, no la estricta precisión de la batimetría. Por esta razón no debe ser utilizada como fuente de información para la navegación. En este sentido debe acudir siempre a la información facilitada por el SHN.

### 5.1.3 Variables topográficas derivadas

A partir de la superficie batimétrica calculada para el área de interés se calcularon las 6 variables topográficas descritas en la sección 4.6 del presente informe: pendiente, orientaciones (este y oeste), curvatura media, índice de posición bentónica (BPI) e índice hipsométrico (HI). Una vez calculadas se recortaron para el área de estudio FMRP, evitando así artefactos en los píxeles situados en los límites del FMRP.

La pendiente, calculada como porcentaje (metros de ascenso por cada 100 m recorridos), mostró valores de entre 0 y 51,7. Solamente un 4% de los píxeles presentan pendientes mayores al 5%, lo que evidencia un área mayoritariamente plana. Las pendientes mayores se encuentran concentradas en el área más alejada de la costa, en la zona del talud, donde las profundidades alcanzan valores superiores a los 4.000 m (**Figura 13**).

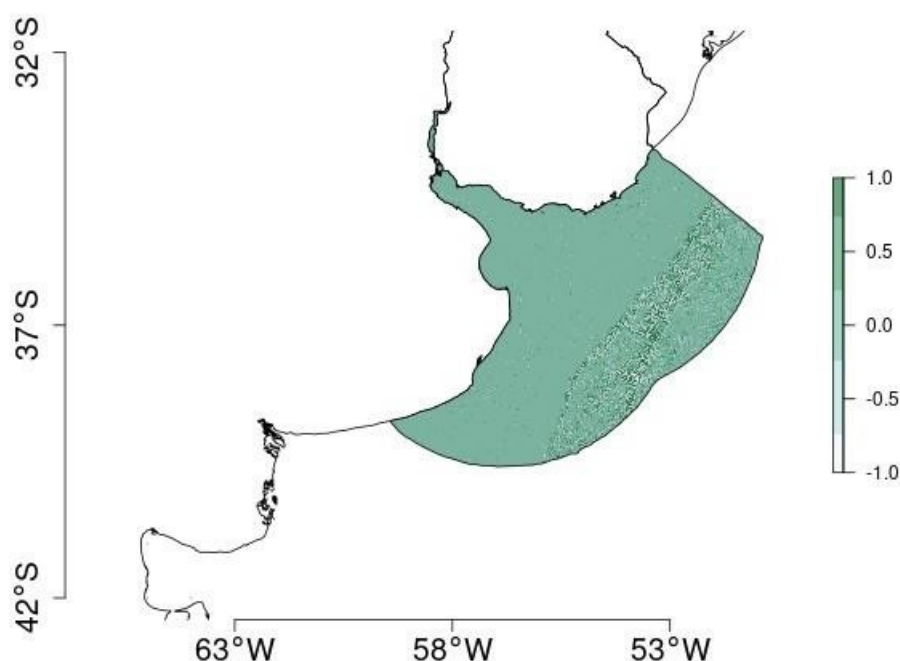




**Figura 13.** Pendientes obtenidas a partir de la batimetría del FMRP (tamaño de píxel: 100 m)

Las orientaciones fueron caracterizadas por su componente norte (coseno de la orientación de la pendiente) y su componente este (seno de la orientación de la pendiente). A nivel general y atendiendo a las orientaciones de sus pendientes, el FMRP muestra mayoritariamente orientaciones sur (en un 66% de los píxeles) y orientaciones este (en un 72% de sus píxeles). En ambas componentes el área frente a la costa muestra alternancia de orientaciones (típica de áreas con pendientes bajas), observándose pendientes con orientaciones mayoritariamente sureste en la zona más externa del FMRP, la cual presenta las mayores profundidades y pendientes (**Figura 14**).

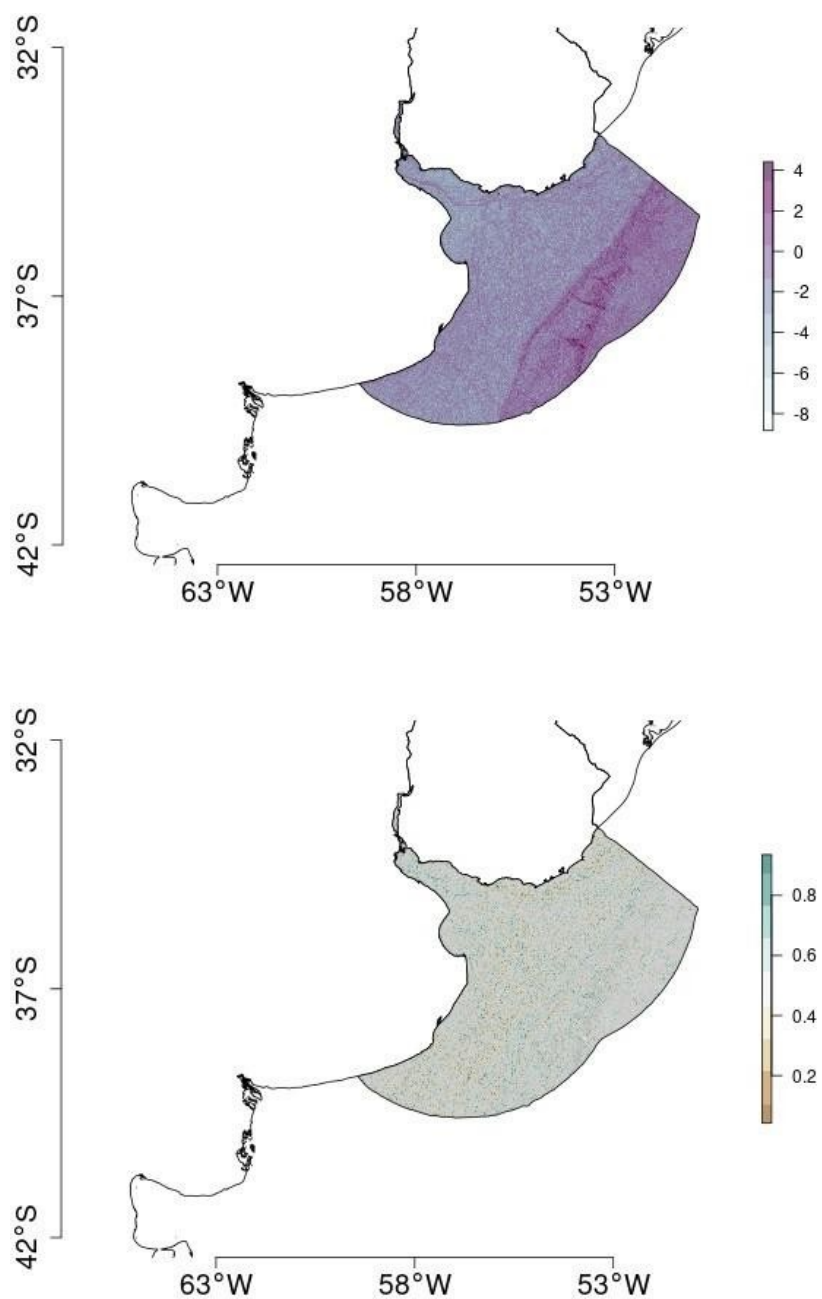
La curvatura media es calculada como la suma de los coeficientes cuadráticos del ajuste local de la superficie a un paraboloides (en el sentido de los mínimos cuadrados), estimados a partir de las derivadas segundas en las direcciones este-oeste y norte-sur. En todo el FMRP los valores de la curvatura media son cercanos a cero (0,0005 como valor medio para toda el área). Solamente se observan un área con valores de curvatura media que se alejan del cero, en la zona de mayor pendiente, donde las profundidades descienden de forma rápida (**Figura 15**).



**Figura 15.** Curvatura media de la superficie batimétrica generada para el FMRP (tamaño de píxel: 100 m). Los valores extremos han sido truncados para mejorar la visualización de las diferencias en el área.

El índice de posición bentónica (BPI) y el índice hipsométrico (HI) son índices utilizados como medida de la complejidad de un área. Mientras que el primero hace referencia a la relación de la profundidad en un punto respecto a los de al lado, la segunda muestra la desviación relativa, en términos de profundidad, de cada píxel en relación a sus vecinos, permitiendo identificar áreas con estructuras que se desvían de la tendencia de la superficie.

En ninguna de estas dos variables se observa la persistencia de trayectorias de transectos, algo habitual pues ambas son especialmente sensibles a la distribución de los datos. Esto muestra el buen desempeño del algoritmo de interpolación y permite observar diferencias debidas a la topografía del terreno con mayor detalle. Ambas variables muestran valores mayores en el área del talud, donde se observó la presencia de mayores pendientes (**Figura 16**). Además de este patrón general, estas superficies pueden también ser interpretadas a escalas menores, junto con otras piezas de información relativas a la naturaleza sedimentológica del fondo.



**Figura 16.** Índice de posición bentónica (BPI, arriba) e Índice hipsométrico (HI, abajo) de la superficie batimétrica generada para el FMRP. Para mejorar la visualización el BPI se muestra en escala logarítmica.

## 5.2 Base del área de interés Área Marina Protegida Namuncurá - Banco Burdwood

### 5.2.1 Base de datos batimétrica

Las bases de datos obtenidas para el Área Marina Protegida Namuncurá- Banco Burdwood (AMPNBB), tras su corrección de marea, resultaron tal y como se describe a continuación:

#### 1) Cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval

Las cartas náuticas obtenidas para el área de interés (área de estudio junto con un *buffer* de 50 km alrededor de la misma) sumaron un total de 416 sondas, con profundidades entre los 45 y 4.813 m, distribuyéndose a lo largo de toda el área de interés (**Figura 17**).

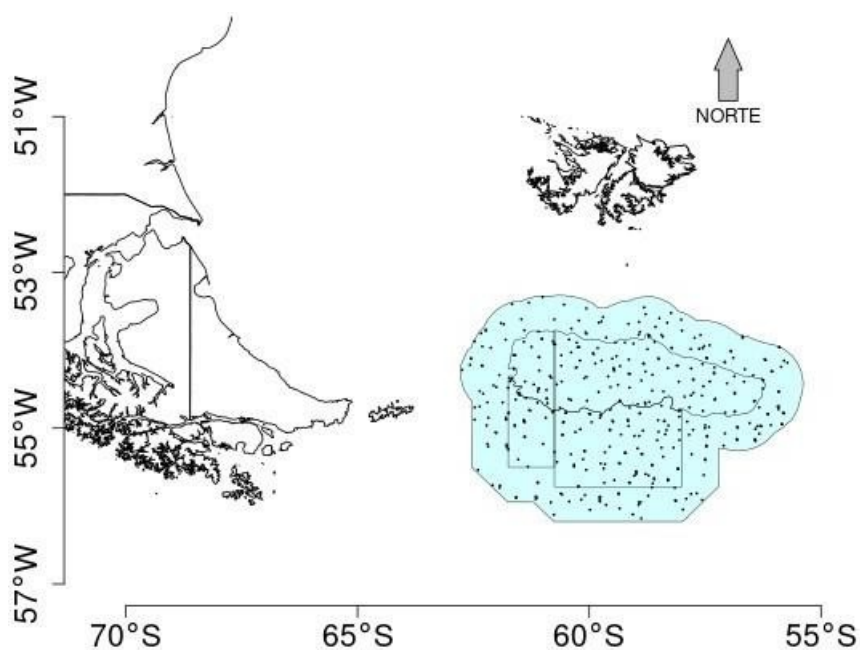
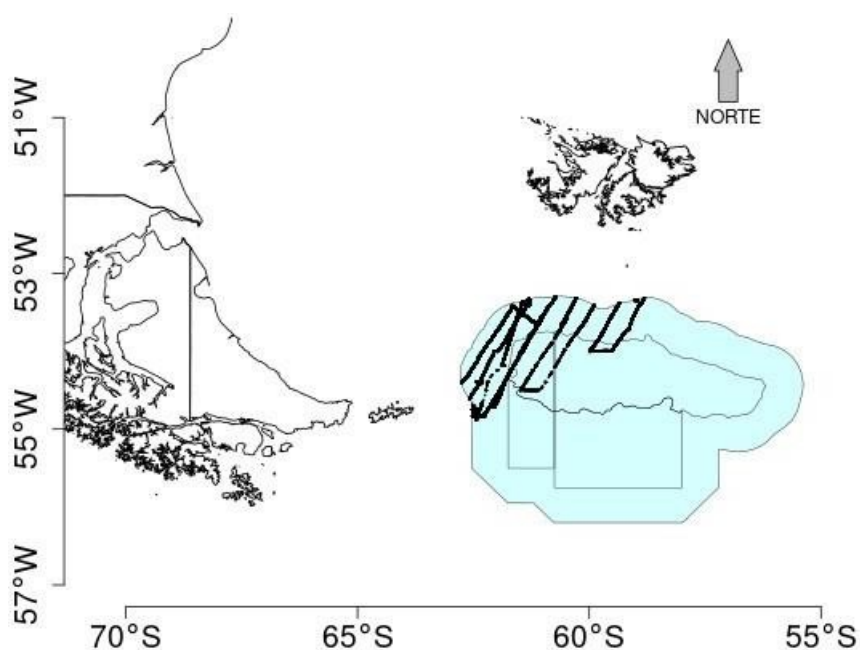


Figura 17. Sondas batimétricas procedentes de 4 cartas náuticas con datos en el área de interés.

## 2) Información batimétrica generada a partir de los transectos de las campañas realizadas por el INIDEP

La información procesada y compartida por el INIDEP contribuyó en 73.762 datos dentro del área de interés, con valores de profundidad entre los 102,7 y los 2.392,8 m. Estos datos se distribuyen en transectas en dirección SW-NE cubriendo únicamente la sección NW del área de interés (**Figura 18**).



**Figura 18.** Sondas procedentes de la información batimétrica distribuida por el Gabinete de Acústica del INIDEP (Sonvico et al., 2021)

## 3) Base de datos obtenida tras el procesamiento de campañas acústicas realizadas con sondas monohaz (Sánchez-Carnero, N. 2022.op. cit.).

Tras el procesamiento y depuración de las campañas acústicas se obtuvo una base de un total de 2.064.858 sondas, distribuidas principalmente dentro del Parque Nacional Marino y la Reserva Nacional Marina y, en menor medida, en la Reserva Nacional Marina Estricta (**Figura 19**). Los valores de profundidad de las sondas incluidos en el área de interés alcanzan valores de 5.089 m, siendo el 90,3% de los mismos valores inferiores a los 500 m.

Debe tenerse en cuenta que estos valores no coinciden con los presentados en Sánchez-Carnero, N. 2022 porque en dicho trabajo se presentaron solamente los datos que se encontraban contenidos en el AMPNBB. En este caso el área de interés se ha extendido 50 km alrededor del AMPBB, por lo que el número de sondas incluidas en la base ha aumentado drásticamente).

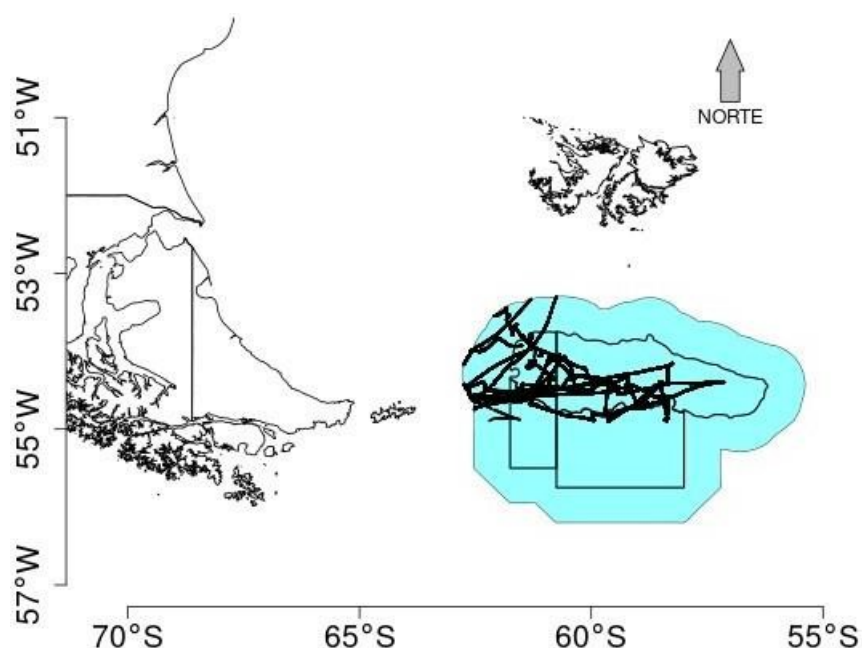


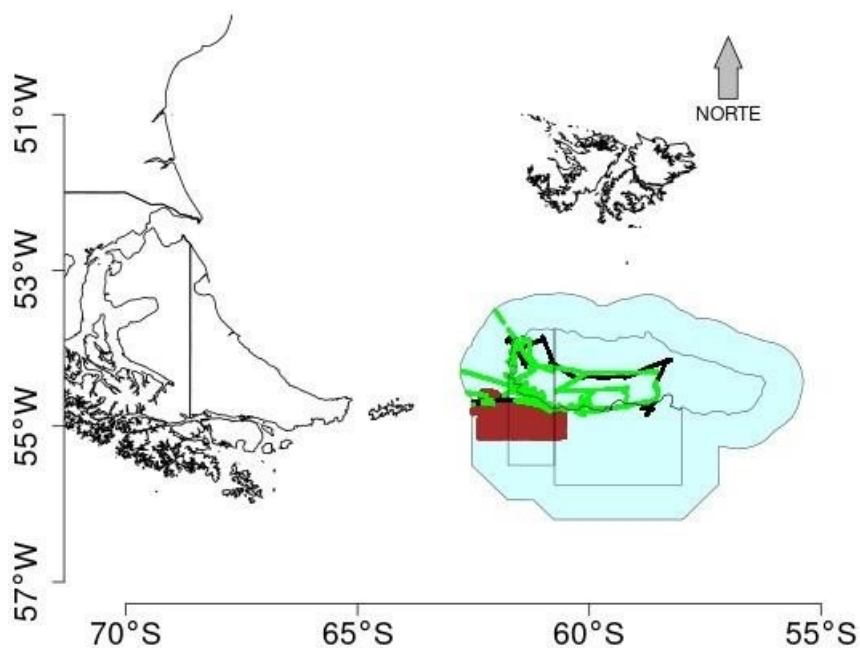
Figura 19. Sondas batimétricas obtenidas tras el procesamiento de campañas acústicas (ver detalle en Sánchez-Carnero, N. 2022. op. cit.)

#### 4) Bases de datos acústicas procesados en una consultoría anterior (Stefanía Wörner).

Las bases de datos acústicas utilizadas en la consultoría previa para la generación de una grilla batimétrica en el AMPNBB fueron incorporadas en la base de datos. Los datos incorporados fueron aquellos generados durante dicha consultoría, tras el procesamiento de los datos originales. Estos datos no fueron corregidos por marea.

En total, para el área de interés se contó con 4.092.644 sondas batimétricas de las cuales el 24,6% correspondieron a los datos adquiridos con el buque BIP Victor Angelescu (11,6% con sondas monohaz y el 13% con sondas *multibeam*) y el 75,4% a las sondas adquiridas con la sonda *multibeam* a bordo del buque ARA Austral. Estos datos presentaron valores de profundidad de entre 50 y 4.520m.

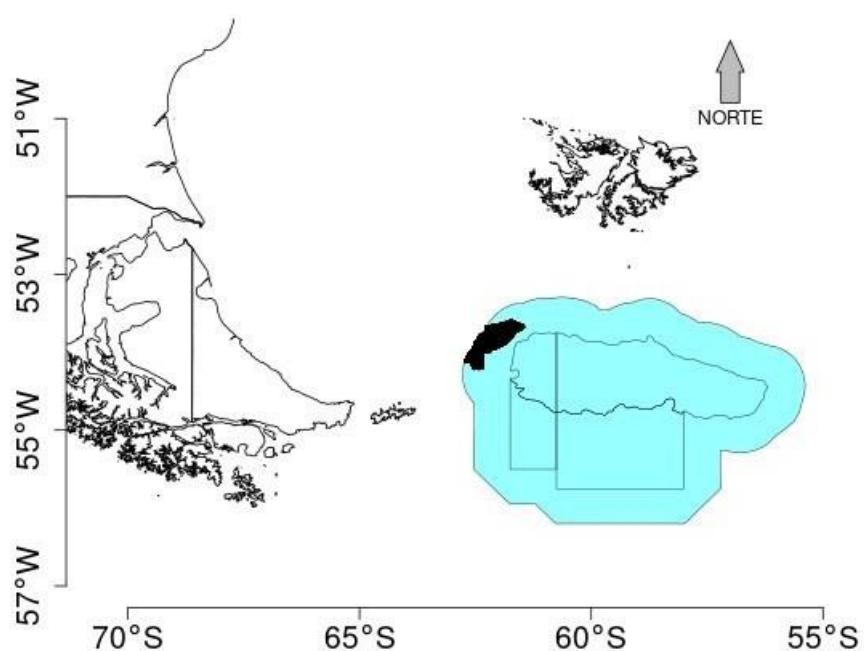
Los datos se distribuyen mayoritariamente dentro de las dos Reservas Nacionales Marinas. La Reserva Nacional Marina Estricta, así como la parte más oriental del Parque Nacional Marino no presentan a penas datos (**Figura 20**).



**Figura 20.** Sondeos procedentes de campañas acústicas procesadas en el marco de la consultoría realizada por Stefania Wörner. En marrón las sondas adquiridas por la sonda EM122 a bordo del ARA Austral (2017) y en verde y negro las adquiridas por las sondas ME70 y EK80 (respectivamente), ambas a bordo del BIP Victor Angelescu (2018 y 2019).

### 5) Base de datos adquiridos con sondas multibeam por el Grupo de Prospección Geológica y Geofísica Lacustre y Marina (GeofLaMa) a bordo del ARA Austral

Los datos acústicos adquiridos durante la campaña GTGM-YTEC 1-Malvinas Sur con la sonda sondas multihaz Simrad EM122 fueron corregidos y depurados por personal del GeofLaMa utilizando el software CARIS. Tras este procesamiento se obtuvo una grilla que contó con 6.045.378 sondas dentro del área de interés, separadas entre sí entre 65 y 120 m, localizadas en la esquina NW del área de interés (todas ellas fuera del AMPNBB) (**Figura 21**). Los valores de profundidad de estos datos oscilaron entre 276 y 1.004,5 m.



**Figura 21.** Sondas batimétricas obtenidas a partir del procesamiento de los datos adquiridos por la sonda multibeam Simrad EM122 durante la campaña GTGM-YTEC 1-Malvinas Sur

## 6) Sondas procedentes de la Base Regional de Datos Oceanográficos (BaRDO) del INIDEP

La BaRDO cuenta con estaciones de muestreo con datos de profundidad a lo largo de todo el Mar Argentino. En nuestra área de interés se encontraron 298 de estas estaciones, con valores de profundidad entre 61,4 y 1.842,5 m, distribuidas a lo largo de todo el Parque Nacional Marino y la Reserva Nacional Marina definida en la primera fase (al norte) (**Figura 22**).



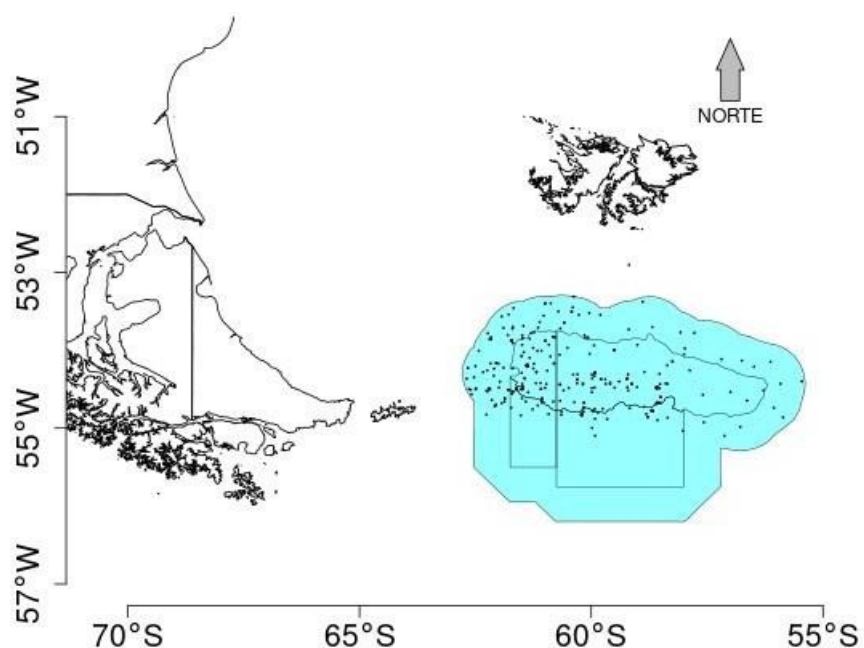


Figura 22. Sondas correspondientes a las estaciones de muestreo de la BaRDO del INIDEP

## 7) Datos procedentes de estaciones de muestreo

A la base de datos se añadieron también 19 localizaciones correspondientes a estaciones de muestreo de muestras granulométricas que cuentan con información batimétrica. Estas 19 sondas se encuentran principalmente dentro del Parque Nacional Marino y presentaron valores de profundidad entre 90,8 y 190,7 m (**Figura 23**).

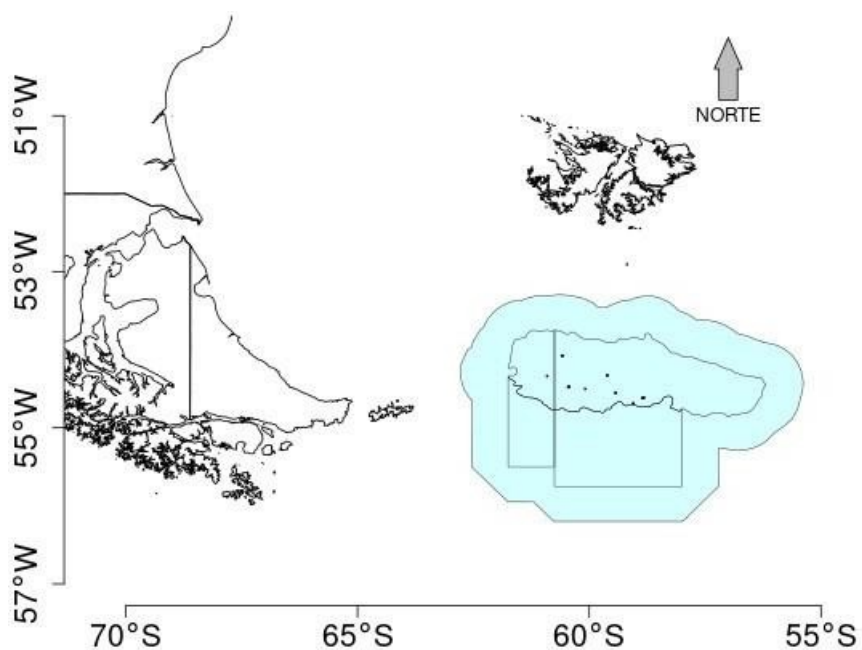
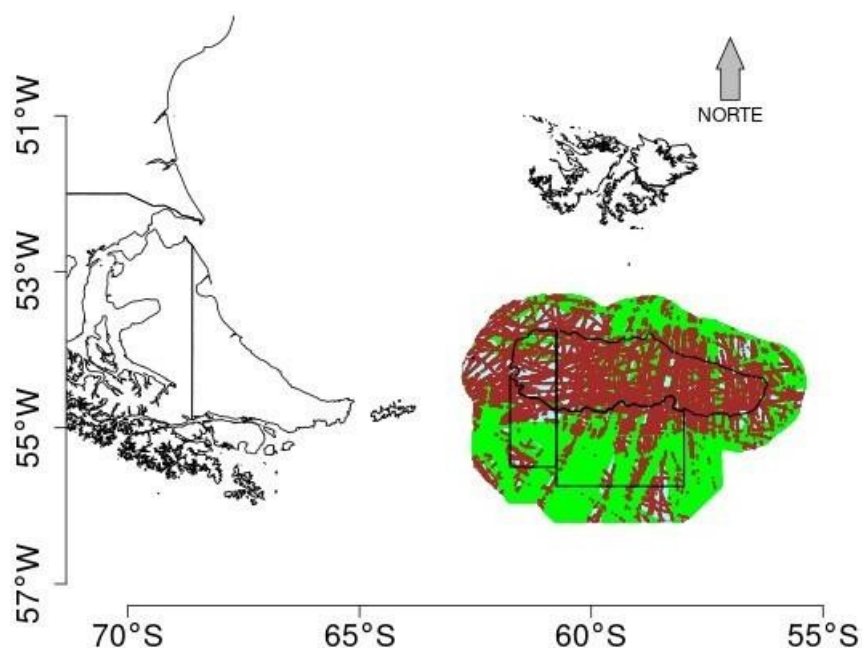


Figura 23. Sondas correspondientes a las estaciones de muestreo tomadas por la Dra. Luciana Riccialdelli

### 8) Datos procedentes de la General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO).

Como sondas batimétricas se utilizaron aquellas localizaciones en las cuales la plataforma GEBCO reportó contar con datos originales adquiridos con sondas monohaz, *multibeam*, o con cartas náuticas. Para cada localización se extrajo el valor de profundidad de la grilla GEBCO.

Esta plataforma cuenta con una gran cobertura en el área de estudio por lo que se incluyeron un total de 458.654 datos con profundidades entre 63 y 5.033 m. El 87% de los puntos pertenecen a registros de sonda monohaz y el 13% a registros de sondas *multibeam*. Solo dos puntos fueron incluidos procedentes de cartas náuticas (Figura 24).



**Figura 24.** Localizaciones donde la plataforma GEBCO reporta contar con datos originales de profundidad. En verde las localizaciones para las que se cuenta con datos MB, en marrón SB y en negro cartas náuticas.

Todas las bases anteriores fueron sometidas a los procesos de corrección descritos en los apartados 3.3 y 4.2 de este informe, que permitieron la eliminación de sondas erróneas o cuyos valores se identificaron como outliers (por alejarse de la superficie media calculada un valor mayor a un umbral). La base final para el área de interés del AMPNBB (que contiene al AMPNBB y un área de amortiguación de 50 km) contó con 6.716.221 con profundidades entre los 50,74 y los 5.033 m. Las sondas están distribuidas por toda el área de estudio AMPNBB y gran parte del área de interés (un *buffer* de 50 km alrededor del AMPNBB) (**Figura 25**).

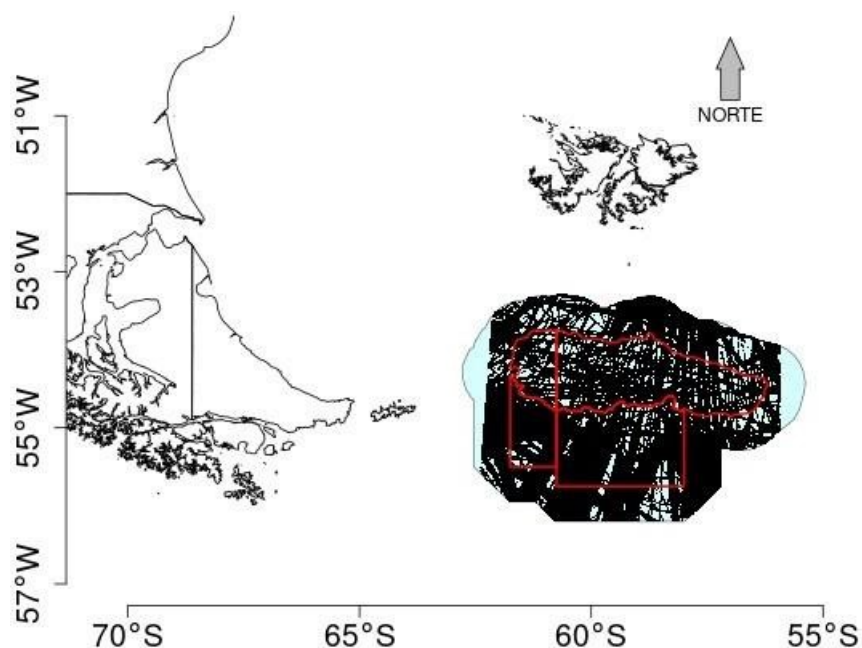


Figura 25. Sondeos batimétricos totales utilizados para la interpolación de la superficie batimétrica en el área del AMPNBB

## 5.2.2 Superficie batimétrica

Utilizando la base de datos batimétricos anteriormente descrita, depurada atendiendo a las desviaciones observadas en cada una de las sondas en relación a las superficies interpoladas, así como a la desviación general de cada base de datos con respecto a las bases identificadas como de mayor fiabilidad (ver sección 4 del presente informe), se calculó una superficie batimétrica para el área de interés de 100 m de tamaño de píxel.

Esta superficie fue posteriormente recortada para el área de estudio AMPNBB (definida en la sección 1.2 de este informe). La batimetría obtenida para el AMPNBB presentó valores de profundidad entre los 57 m (en el área central del Parque Nacional Marino) y los 4.593 m (localizados al sur de la Namuncurá - Banco Burdwood II) (**Figura 26**).

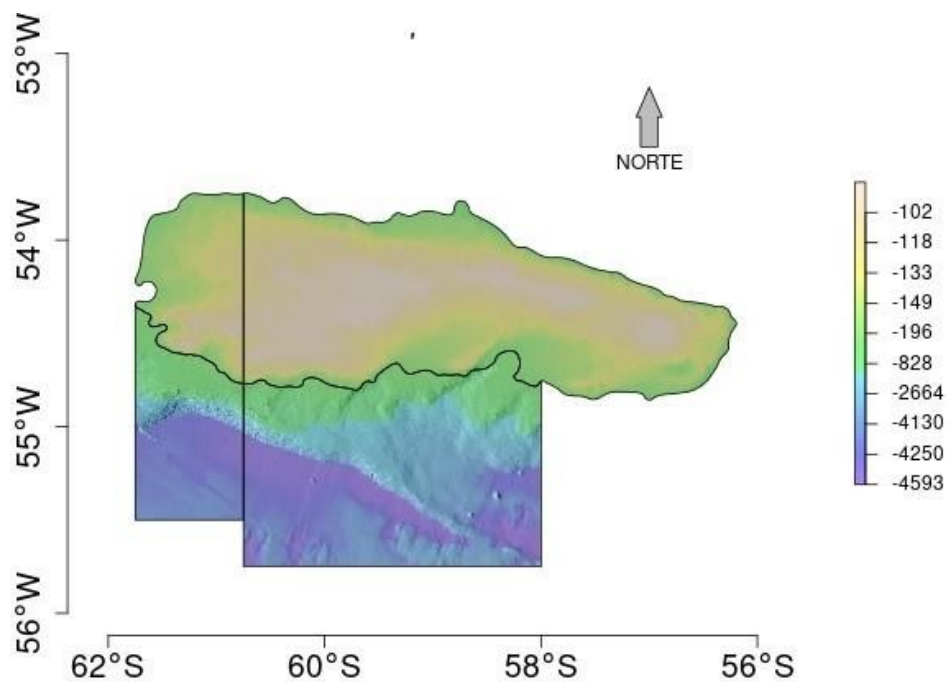


Figura 26. Superficie batimétrica calculada para el AMPNBB. Tamaño de pixel 100 m

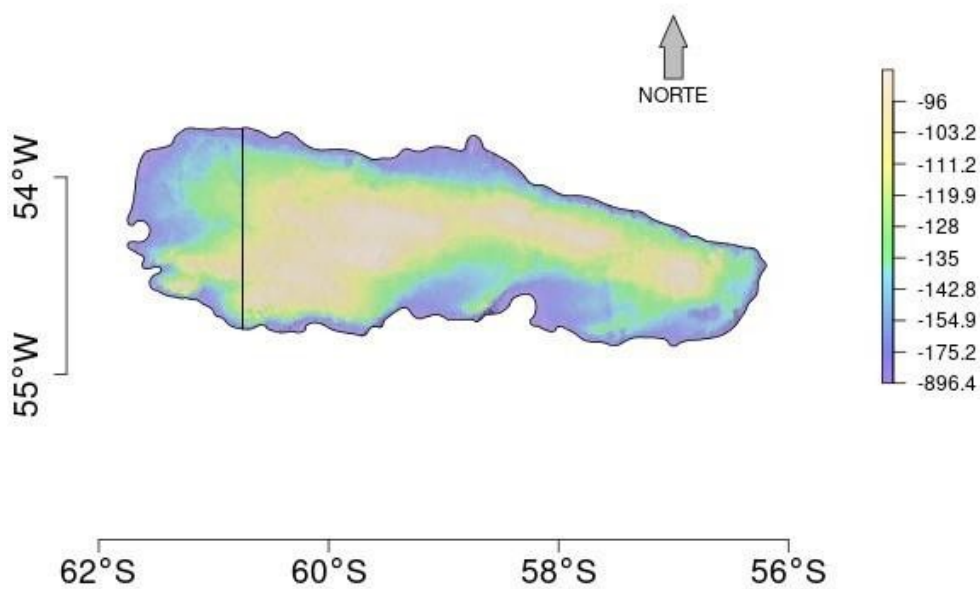


Figura 27. Detalle de la superficie batimétrica calculada para el Parque Nacional Marino y la Reserva Nacional Marina de la primera fase del AMPNBB

En lo relativo a su fiabilidad, atendiendo a los estadísticos calculados (sección 4.4 del presente informe), la superficie obtenida muestra una diferencia de profundidades media ( $\Delta z$ ) de aproximadamente 0m, lo que quiere decir que no hay ningún desplazamiento sistemático de los puntos respecto de la superficie batimétrica. Por otro lado, el error cuadrático medio (RMSE) de la superficie, evaluado por validación cruzada, fue de 13,86 m. La distribución de la desviación típica de los valores de profundidad de las 10 superficies interpoladas, muestra valores mayores en zonas profundas (**Figura 27**), fuera del área somera del AMPNBB definida en 2013. En estas áreas, con profundidades mayores a 500 m, un RMSE de 14 m representa una desviación menor al 3%.

Tanto el coeficiente de correlación obtenido entre los puntos utilizados para a el cálculo de la batimetría y la superficie obtenida, como el índice de concordancia obtenido para esta superficie fueron de 0,9999. Ambos alores son esperablemente altos en una superficie ajustada a los datos de origen. Una desviación en estos estadísticos mostraría un sesgo y un número elevado de valores extremos.

Es necesario tener en cuenta que, a pesar de los buenos valores de validación obtenidos, existen puntos con errores relativos altos correspondientes a elementos batimétricos que, por sus dimensiones, no pueden ser resueltos en batimetrías generales y suavizadas (**Figura 28**). En nuestro caso los errores más altos se localizaron en la Reserva Nacional Marina Estricta, donde se encuentran también las profundidades mayores. En nuestra área de estudio menos de un 1% de los píxeles mostraron desviaciones mayores a 15m.

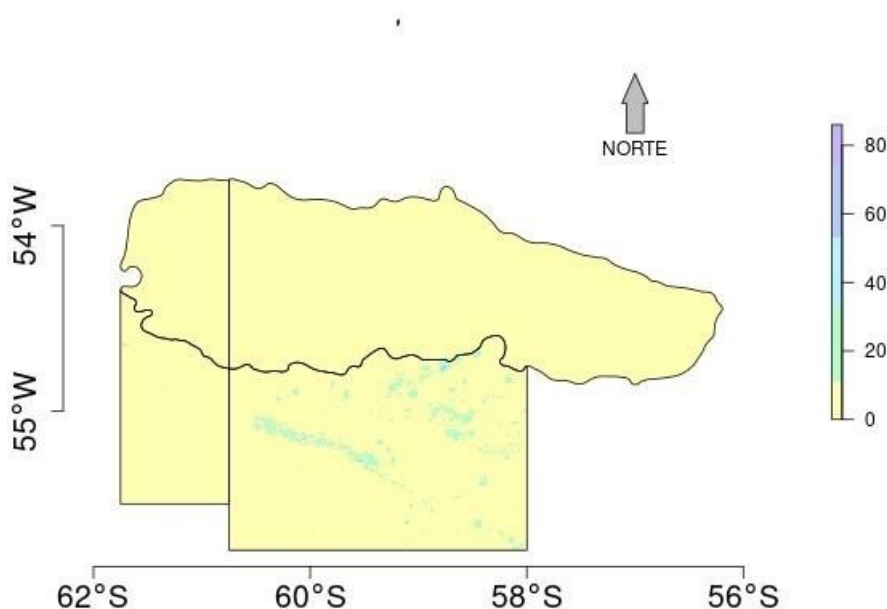


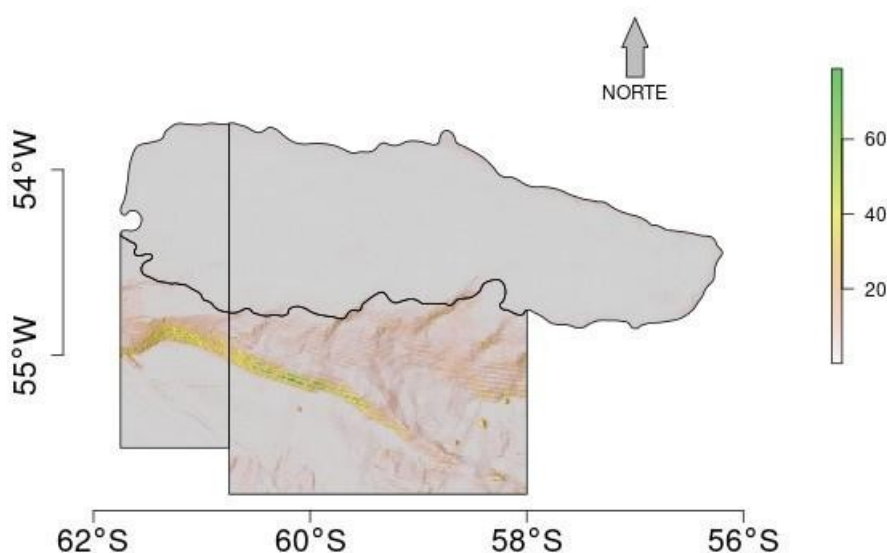
Figura 28. Desviación típica de las superficies batimétricas calculadas

Por último, es necesario recalcar, que esta batimetría ha sido generada con un algoritmo que tiene por objetivo reconstruir, de la forma más fiel posible, las características topográficas del fondo, no la estricta precisión de la batimetría. Por esta razón no debe ser utilizada como fuente de información para la navegación. En este sentido debe acudir siempre a la información facilitada por el SHN.

### 5.2.3 Variables topográficas derivadas

A partir de la superficie batimétrica calculada para el área de interés se calcularon las 6 variables topográficas descritas en la sección 4.6 del presente informe: pendiente, orientaciones (este y oeste), curvatura media, índice de posición bentónica (BPI) e índice hipsométrico (HI). Una vez calculadas se recortaron para el área de estudio AMPNBB, evitando así artefactos en los píxeles situados en los límites del AMPNBB.

La pendiente, calculada como porcentaje (metros de ascenso por cada 100m recorridos), mostró valores de entre 0.001 y 80.1. Poco más de un 15% de los píxeles presentan pendientes mayores al 5%. Las pendientes mayores se encuentran concentradas en la franja que transcurre del NW al SE del área marina protegida "Namuncurá - Banco Burdwood II", donde las profundidades descienden abruptamente entre los 1.500 y los 5.000 m. Se muestran también valores altos al noreste de la Reserva Nacional Marina Estricta, donde la topografía muestra cañones submarinos en dirección NE-SW (**Figura 29**).



**Figura 29.** Pendientes obtenidas a partir de la batimetría del AMPNBB (tamaño de píxel: 100m)

Las orientaciones fueron caracterizadas por su componente norte (coseno de la orientación de la pendiente) y su componente este (seno de la orientación de la pendiente). A nivel general y atendiendo a las orientaciones de sus pendientes, se observan en el AMPNBB tres zonas diferenciadas, limitadas por estructuras con orientación NW-SW. La estructura del sur, en la zona sur del área marina protegida “Namuncurá - Banco Burdwood II”, observada previamente en la batimetría y presentando pendientes altas, y una estructura al norte de la primera fase del AMPNBB, con pendientes bajas. Al norte y sur de estas franjas se observan áreas con orientaciones de componente predominantemente nordeste, mientras que en el área central limitada por las mismas las pendientes observadas presenta componentes mayoritariamente sur (**Figura 30**). Se observa además que la Reserva Nacional Marina de la primera fase (al noroeste del AMPNBB), así como la parte más occidental del Parque Nacional Marino, presenta una alternancia de orientaciones, con más presencia de pendientes con orientación oeste que en el resto del AMPNBB.

La curvatura media es calculada como la suma de los coeficientes cuadráticos del ajuste local de la superficie a un paraboloides (en el sentido de los mínimos cuadrados), estimados a partir de las derivadas segundas en las direcciones este-oeste y norte-sur. En toda la primera fase del AMPNBB (Reserva Nacional Marina y Parque Nacional Marino) la curvatura media presenta valores cercanos a 0 (**Figura 31**). Las curvaturas alternantes observadas al norte del área marina protegida “Namuncurá - Banco Burdwood II” indican la existencia de surcos y crestas, esperables en áreas de cañones submarinos.



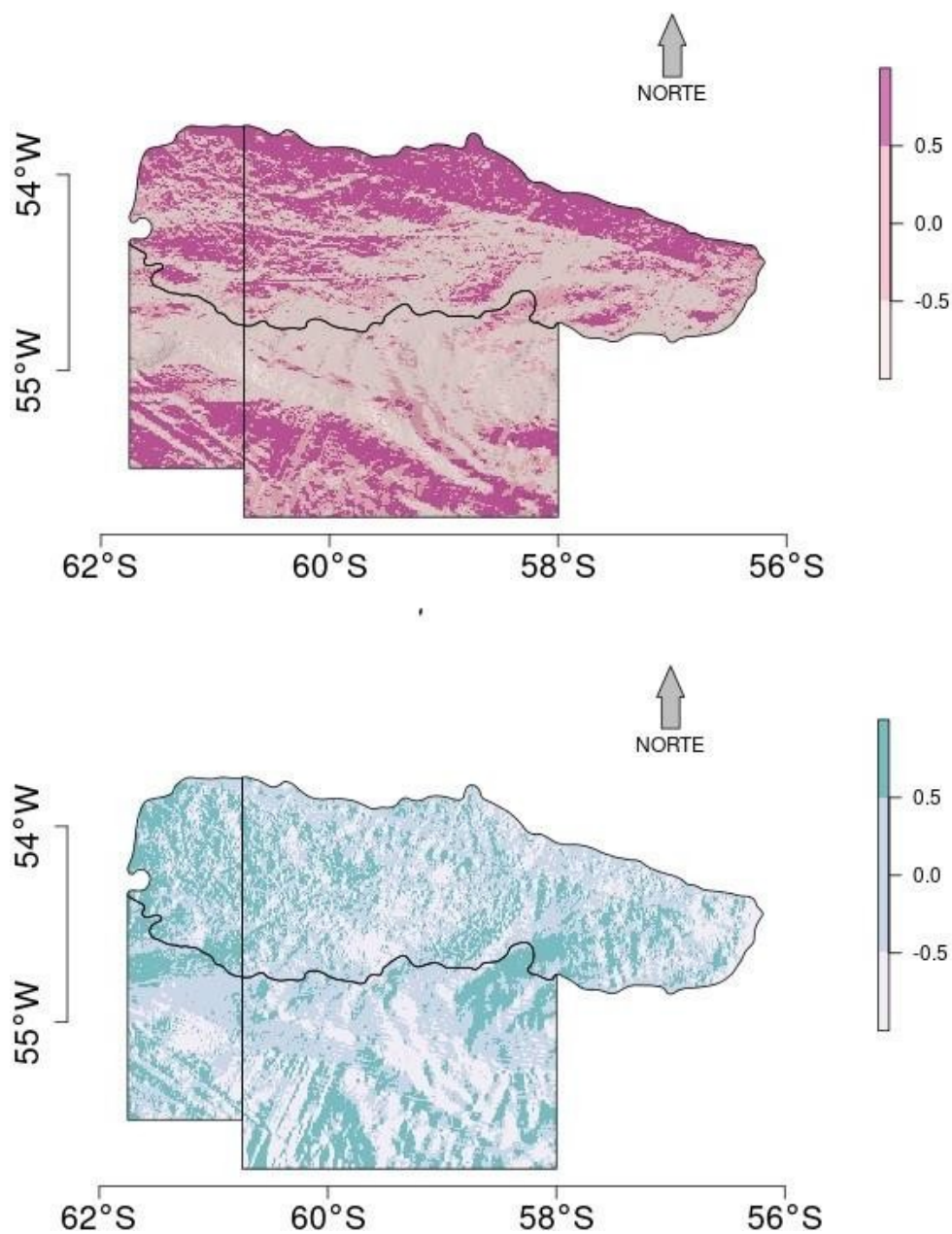
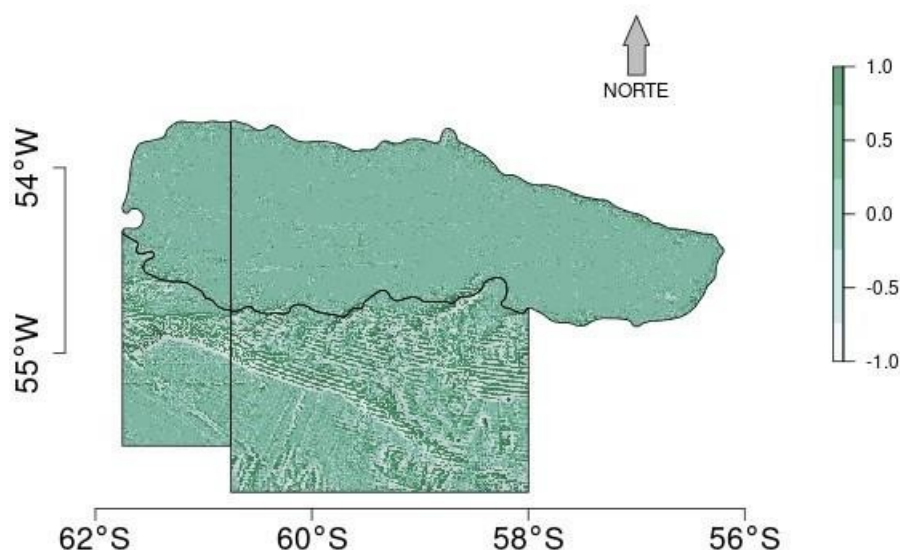


Figura 30. Componente norte (arriba) y componente este (abajo) de la orientación de la pendiente en el área del AMPNBB (tamaño de píxel: 100m)



**Figura 31.** Curvatura media de la superficie batimétrica generada para el AMPNBB (tamaño de píxel: 100m). Los valores extremos han sido truncados para mejorar la visualización de las diferencias en el área.

El índice de posición bentónica (BPI) y el índice hipsométrico (HI) son índices utilizados como medida de la complejidad de un área. Mientras que el primero hace referencia a la relación de la profundidad en un punto respecto a los de al lado, la segunda muestra la desviación relativa, en términos de profundidad, de cada píxel en relación a sus vecinos, permitiendo identificar áreas con estructuras que se desvían de la tendencia de la superficie.

En ninguna de estas dos variables se observa la persistencia de trayectorias de transectos, algo habitual pues ambas son especialmente sensibles a la distribución de los datos. Esto muestra el buen desempeño del algoritmo de interpolación y permite observar diferencias debidas a la topografía del terreno con mayor detalle. Como cabía esperar, ambas variables muestran valores mayores en el área marina protegida “Namuncurá - Banco Burdwood II”, donde se observó la presencia de cañones submarinos y de una topografía más variable. Además de este patrón general, estas superficies pueden también ser interpretadas a escalas menores, junto con otras piezas de información relativas a la naturaleza sedimentológica del fondo.

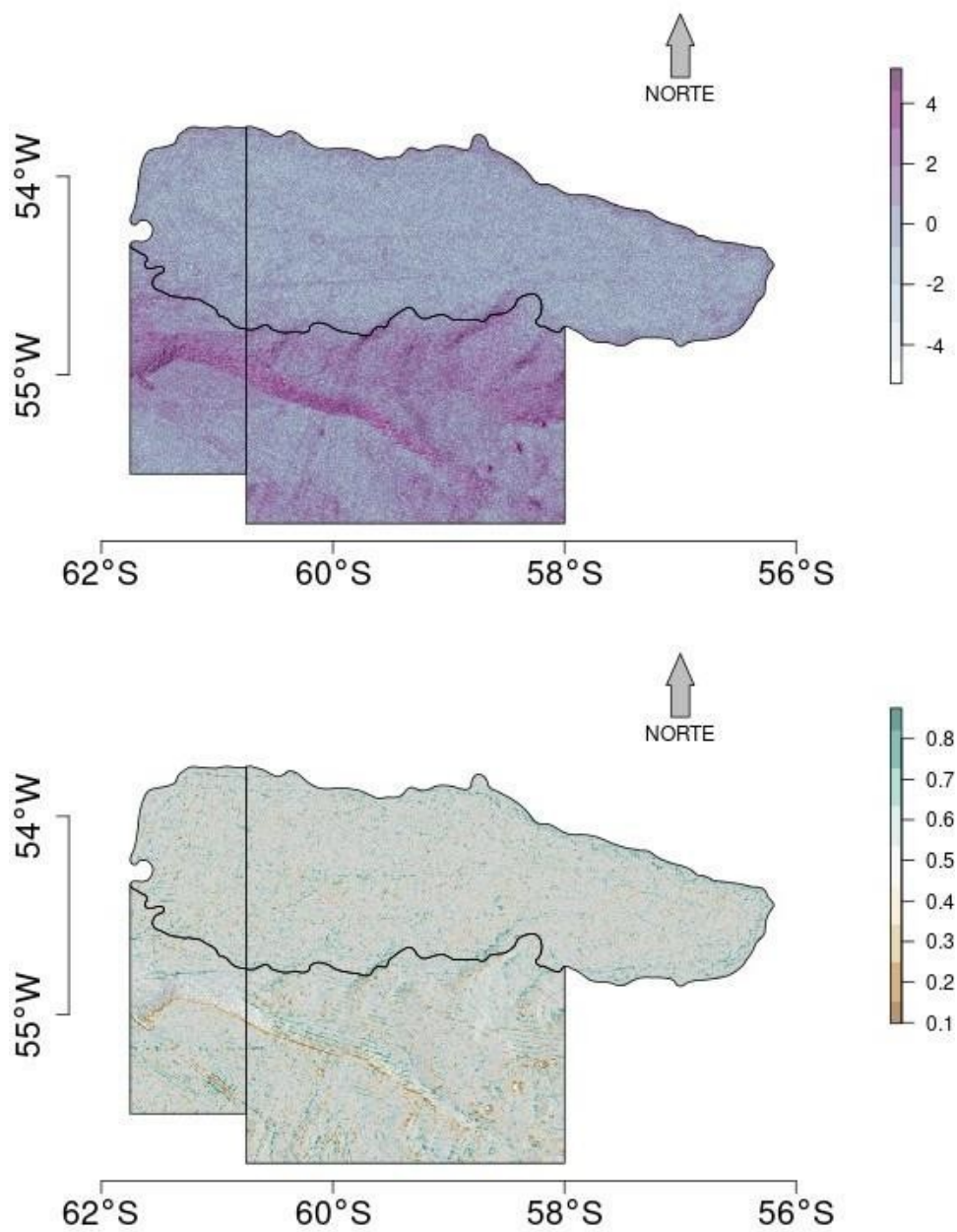


Figura 32. Índice de posición bentónica (BPI, arriba) e Índice hipsométrico (HI, abajo) de la superficie batimétrica generada para el AMPNBB. Para mejorar la visualización el BPI se muestra en escala logarítmica.

## Referencias

- Amante C., y Eakins B.W.**, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. DOI: 10.7289/V5C8276M
- Anderson, J. T., Van Holliday, D., Kloser, R., Reid, D. G., & Simard, Y.** (2008). Acoustic seabed classification: current practice and future directions. *ICES Journal of Marine Science*, 65(6), 1004-1011.
- Basu, A., & Malhotra, S.** (2002). Error detection of bathymetry data by visualization using GIS. *ICES Journal of Marine Science*, 59(1), 226-234.
- Blondel, P.** (2018) Quantitative Analyses of Morphological Data. In: Submarine Geomorphology. Aaron Micallef, Sebastian Krastel, Alessandra Savini, Eds. Springer Geology, Springer. (ISBN: 978-3-319-57851-4; DOI: 10.1007/978-3-319-57852-1)
- Egbert, Gary D., and Svetlana Y. Erofeeva** (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19(2): 183-204.
- Finkl, C. W., Benedet, L., & Andrews, J. L.** (2005). Interpretation of seabed geomorphology based on spatial analysis of high-density airborne laser bathymetry. *Journal of Coastal Research*, 501-514.
- Flater, D.** (2005). XTide. <https://flaterco.com/xtide/>
- Ierodiaconou, D., Monk, J., Rattray, A., Laurenson, L., & Versace, V. L.** (2011). Comparison of automated classification techniques for predicting benthic biological communities using hydroacoustics and video observations. *Continental Shelf Research*, 31(2), S28-S38.
- Jaffe, B. E., Smith, R. E., & Foxgrover, A. C.** (2007). Anthropogenic influence on sedimentation and intertidal mudflat change in San Pablo Bay, California: 1856– 1983. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73(1-2), 175-187.
- Jiskoot, H., Curran, C. J., Tessler, D. L., & Shenton, L. R.** (2009). Changes in Clemenceau Icefield and Chaba Group glaciers, Canada, related to hypsometry, tributary detachment, length–slope and area–aspect relations. *Annals of Glaciology*, 50(53), 133-143.
- Klemas, P., & Victor, V.** (2009). Remote sensing of coastal resources and environment. *Environmental Research, Engineering and Management*, 48(2), 11-18. 62
- Lecours, V., Dolan, M. F., Micallef, A., & Lucieer, V. L.** (2016). A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(8), 3207-3244.
- Lee, Z., Hu, C., Casey, B., Shang, S., Dierssen, H., & Arnone, R.** (2010). Global Shallow–Water Bathymetry from Satellite Ocean Color Data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 91(46), 429-430.
- Matsuyama, M., Walsh, J. P., & Yeh, H.** (1999). The effect of bathymetry on tsunami characteristics at Sisano Lagoon, Papua New Guinea. *Geophysical Research Letters*, 26(23), 3513-3516.
- Micallef, A., Le Bas, T. P., Huvenne, V. A., Blondel, P., Hühnerbach, V., & Deidun, A.** (2012). A multi-method approach for benthic habitat mapping of shallow coastal areas with high-resolution multibeam data. *Continental Shelf Research*, 39, 14-26.
- Nishida, T., Mohri, M., Itoh, K., & Nakagome, J.** (2001). Study of bathymetry effects on the nominal hooking rates of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and bigeye tuna (*Thunnus obesus*) exploited by the Japanese tuna longline fisheries in the Indian Ocean. In *IOTC Proceedings* (Vol. 4, No. 4, pp. 191-206).

- Ranganathan, P., Pramesh, C. S., & Aggarwal, R.** (2017). Common pitfalls in statistical analysis: Measures of agreement. *Perspectives in Clinical Research*, 8(4), 187-191.
- Rodríguez-Pérez, D. & Sánchez-Carnero, N.** (2022). Multigrid/multiresolution interpolation: killing the transect effect. *Geomatics* (enviado).
- Sánchez-Carnero, N., Aceña, S., Rodríguez-Pérez, D., Couñago, E., Fraile, P., & Freire, J.** (2012). Fast and low-cost method for VBES bathymetry generation in coastal areas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 114, 175-182.
- Sánchez-Carnero, N., Rodríguez-Pérez, D., Couñago, E., Le Barzik, F., & Freire, J.** (2016). Species distribution models and local ecological knowledge in marine protected areas: The case of Os Miñarzos (Spain). *Ocean & Coastal Management*, 124, 66-77.
- Sánchez-Carnero, N., & Rodríguez-Pérez, D.** (2021). A sea bottom classification of the Robredo area in the Northern San Jorge Gulf (Argentina). *Geo-Marine Letters*, 41(1), 1-14.
- Sonvico P.M.F., Cascallares G., Madirolas A., Cabreira A.G. y Menna B.V.,** 2021. Repositorio de líneas batimétricas de las campañas de investigación del INIDEP. INIDEP, Gabinete de Hidroacústica, 6 pp.
- Stocks, K. I., Boehlert, G. W., & Dower, J. F.** (2004). Towards an international field program on seamounts within the Census of Marine Life. *Archive of Fishery and Marine Research*, 51(1-3), 320-327.
- Sutherland, J., Walstra, D. J. R., Chesher, T. J., Van Rijn, L. C., & Southgate, H. N.** (2004). Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering*, 51(2), 119-142.
- Tukey, J. W.** (1977). *Exploratory data analysis* (Vol. 2, pp. 131-160).
- Van Rijn, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J. P.** (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295-327.
- Walbridge, S., Slocum, N., Pobuda, M., & Wright, D. J.** (2018). Unified geomorphological analysis workflows with Benthic Terrain Modeler. *Geosciences*, 8(3), 94.
- Wedding, L. M., Friedlander, A. M., McGranaghan, M., Yost, R. S., & Monaco, M. E.** (2008). Using bathymetric lidar to define nearshore benthic habitat complexity: Implications for management of reef fish assemblages in Hawaii. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), 4159-4165.



Ministerio de Ambiente  
y Desarrollo Sostenible  
**Argentina**



Organización de las Naciones  
Unidas para la Alimentación  
y la Agricultura



FONDO PARA EL MEDIO AMBIENTE MUNDIAL  
INVERTIMOS EN NUESTRO PLANETA