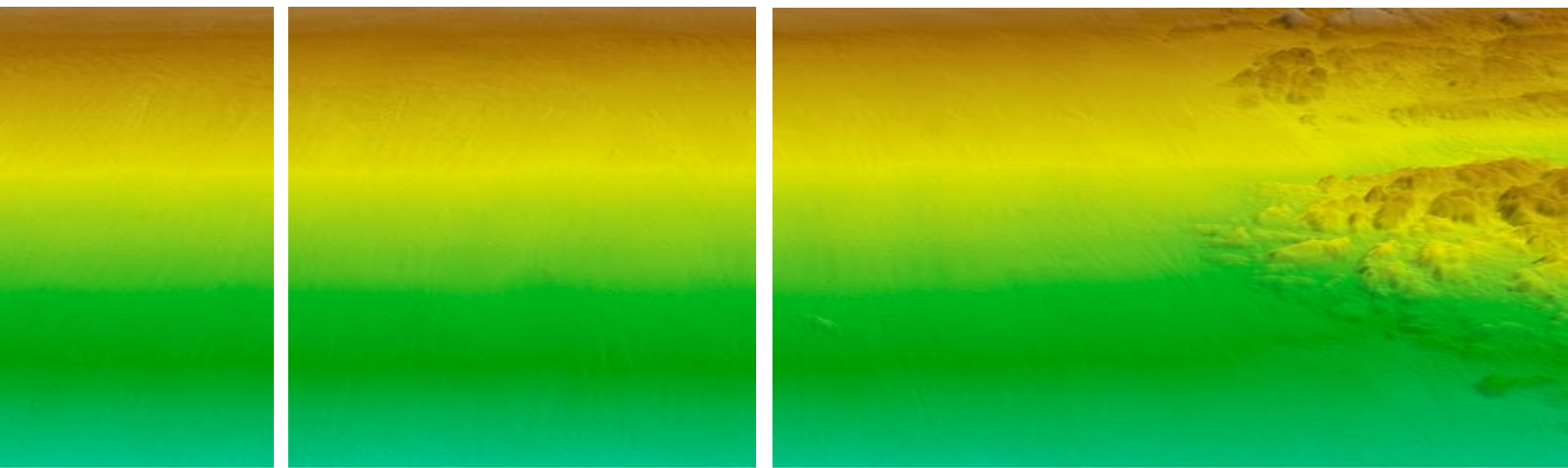




## INFORME FINAL

PROYECTO FIPA N° 2017-34

**REALIZACIÓN DE ESTUDIOS BATIMÉTRICOS DE AMPLIA COBERTURA  
EN APOYO A ESTUDIOS DE MODELACIÓN NUMÉRICA - REGIÓN DE AYSÉN**



Preparado para:



Marzo 2020

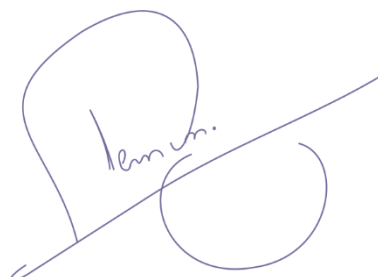
## INFORMACIÓN DEL DOCUMENTO

Documento:	PRE-INFORME FINAL FIPA N° 2017-34: "REALIZACIÓN DE ESTUDIOS BATIMÉTRICOS DE AMPLIA COBERTURA EN APOYO A ESTUDIOS DE MODELACIÓN NUMÉRICA - REGIÓN DE AYSÉN"
Elaborado para:	FONDO DE INVESTIGACIÓN DE PESCA Y ACUICULTURA
Fecha de Entrega:	23-03-2020
Autores:	<p><b>Alex Lobos A.</b> Ingeniero Civil Oceánico Magister en Gestión y Operaciones Portuarias</p> <p><b>Enzo Peirano M.</b> Ingeniero Civil Oceánico</p> <p><b>Stefano Pontarelli C.</b> Geólogo</p>

REV	VERSIÓN	ELABORADO POR	REVISADO POR	APROBADO POR	FECHA DE APROB.
01	SEGUNDA EMISIÓN	ALA/EPM//SPC			
00	PRIMERA EMISIÓN	ALA/EPM//SPC			



**Alex Lobos Astudillo**  
Gerente de Proyectos  
GEOCIENCIAS E.I.R.L.



**John Fleming Baeza**  
Gerente General  
GEOCIENCIAS E.I.R.L.

---

## RESUMEN EJECUTIVO

El año 2017 Geociencias EIRL se adjudica el proyecto FIPA N° 2017-34 “Realización de estudios batimétricos de amplia cobertura en apoyo a estudios de modelación (región de Aysén)”, de acuerdo con las bases y lo acordado con la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA). El principal objetivo de este estudio fue la generación de un modelo batimétrico mejorado sobre la base de información disponible (proporcionados por SUBPESCA) e integrado con datos batimétricos levantados en zonas sin información. Para esto, se planteó realizar un análisis de los datos batimétricos preexistentes con el fin de integrarlos de manera óptima con los nuevos datos adquiridos. La cobertura de la superficie levantada fue 70.000 [Ha] divididas en cuatro zonas que complementaron la información ya disponible, estas corresponden a Canal Simpson, Canal Moraleda y Ferronave, Canal Carrera del Chivato y Canal Vicuña.

En primera instancia se realizó un análisis y normalización de la información batimétrica existente mediante distintas herramientas GIS con objeto de estandarizar la base de información disponible y eliminar cualquier incertidumbre en el set de datos. Posteriormente se implementaron distintos métodos de interpolación y se generaron modelos batimétricos preliminares, comparados entre sí a través de métodos estadísticos y perfiles batimétricos. Basado en lo anterior se identificó el método con mejor ajuste. Una vez desarrollado el modelo batimétrico preliminar, se procedió a la etapa de levantamiento de datos hidrográficos in-situ. El levantamiento se ejecutó mediante un sistema multi haz de alta resolución Edgetech-6205 y conforme a los estándares OHI S-44 en lo que respecta a batimetrías de orden especial y las Instrucciones Hidrográficas N° 5 pub. 3105 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. Cabe mencionar que este levantamiento fue apoyado por mediciones de nivel del mar (para determinación de NRS), velocidad de propagación del sonido (SVP) y estaciones CTD. Los datos adquiridos fueron procesados mediante el software especializado Qimera.

Finalmente, los datos del modelo batimétrico preliminar y los datos adquiridos in situ fueron integrados generando una grilla batimétrica de 50x50 m utilizando el método de interpolación de mejor ajuste (Kriging ordinario), para así desarrollar el nuevo modelo batimétrico mejorado. Este nuevo modelo batimétrico fue presentado en software GIS (Arcgis) y analizado mediante métodos cualitativos y estadísticos. Los nuevos datos alcanzaron profundidades máximas de 260 metros (Canal Simpson) y permitieron la observación de diversas morfologías en los canales interiores de esta área. El modelo fue congruente con los datos preliminares, mostrando una clara mejora en la resolución y calidad de la data batimétrica.

---

## ABSTRACT

In 2017, “Geociencias EIRL” awarded the project FIPA No. 2017-34, “Conducting bathymetric studies with broad coverage in support of modeling studies (Aysén region)”, according to the bases and what was agreed with the client, “Subsecretaria de Pesca y Acuicultura” (SUBPESCA). In the first instance, meetings were held for the planning and coordination of the project, in which the survey was defined would reach the depth of 120 [m] among other requirements. In the first stage a pre-report was made with the methodologies to execute and the information the information delivered by the client. This information was analysed and processed, testing this data with different interpolation methods, preliminary bathymetric models generated were compared through different statistical methods and bathymetric profiles. The surveyed area was of 70,000 [Ha] divided into four zones that complement the information already available: Carrera del Chivato Channel, Vicuña Channel, Simpson Channel and Moraleda Channel.

With the methodology and study area defined, the field work started, these were divided into four stages; April to July 2018, October to November 2018, March 2019 and June to July 2019. For this survey the platform TenTen-Vilú was used (registration CHO-1668) to host the multi-beam system and positioning systems. The software used to acquire the data was Qinsy, and the software Qimera were used to clean the data and to make angular corrections of the vessel (patch test).

During the field work, simultaneously with the acquisition of bathymetric data, the speed of sound propagation in the water was measured to correct the depths in the post-process stage. On the other hand, four tidal stations were installed for a period of 30 days, acquiring data every 5 minutes in each study area to determine the main tidal planes.

After the stage of data acquisition and post-processing, a single data file was generated with the initial data provided by the client and the acquired data to improve the bathymetry in areas without enough data, so it was created an improved bathymetric model. For the generation of this model, the method of Ordinary Kriging interpolation was used, which in the previous stage presented one of the best settings. The grid created for the improved bathymetric model was 50 x 50 [m].

Finally, the improved bathymetric model was analyzed using qualitative and statistical methods, this being consistent with the preliminary data supplied from “SHOA” nautical charts also the analysis methods show improvement in the resolution and quality of the bathymetric data was observed.

## CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL .....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
2.3	NIVEL DE AVANCE SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	11
<b>3</b>	<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>13</b>
3.1	ZONA DE ESTUDIO .....	13
3.2	SUPERFICIE DE LEVANTAMIENTO HIDROGRÁFICO .....	14
<b>4</b>	<b>MATERIALES Y HERRAMIENTAS</b> .....	<b>16</b>
4.1	SOFTWARES DE PROCESAMIENTO DE DATOS .....	16
4.2	EMBARCACIÓN HIDROGRÁFICA .....	16
4.2.1	<i>Descripción general</i> .....	16
4.2.2	<i>Esquema de offsets estáticos</i> .....	17
4.3	SISTEMA MULTHAZ EDGETECH 6205.....	18
4.4	SISTEMA DE NAVEGACIÓN Y CORECCIONES DINÁMICAS .....	19
4.5	SISTEMA DE POSICIONAMIENTO .....	20
4.6	MAREÓGRAFOS .....	20
4.7	SENSOR DE VELOCIDAD DEL SONIDO, TEMPERATURA, PRESIÓN Y SALINIDAD .....	21
4.8	SERVICIO DE CORRECCIÓN SATELITAL ATLAS HEMISPHERE .....	21
<b>5</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
5.1	OBJETIVO ESPECÍFICO N°1: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BATIMÉTRICA EXISTENTE .....	22
5.2	OBJETIVO ESPECÍFICO N°2: REVISIÓN, ANÁLISIS Y NORMALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN BATIMÉTRICA EXISTENTE .....	27
5.3	OBJETIVO ESPECÍFICO N°3: GENERAR Y EVALUAR UN MODELO BATIMÉTRICO PRELIMINAR EN BASE A DISTINTOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN .....	32
5.3.1	<i>Método de ponderación de la distancia inversa (IDW)</i> .....	32
5.3.2	<i>Método de kriging ordinario</i> .....	33
5.3.3	<i>Método de shepard</i> .....	33

---

5.3.4	<i>Método de triangulación con interpolación lineal</i> .....	34
5.3.5	<i>Método vecino natural</i> .....	34
5.3.6	<i>Método vecino más cercano</i> .....	34
5.3.7	<i>Análisis estadístico de los resultados</i> .....	37
5.3.8	<i>Indicadores de error</i> .....	38
5.3.9	<i>Análisis de perfiles batimétricos</i> .....	40
5.4	<b>OBJETIVO ESPECÍFICO N°4: EFECTUAR UN LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO MULTIHAZ IN SITU</b>	<b>43</b>
5.4.1	<i>Descripción general de los trabajos de sondaje</i> .....	43
5.4.2	<i>Calibración del sistema multihaz</i> .....	45
5.4.3	<i>Levantamiento de datos de backscatter</i> .....	46
5.5	<b>OBJETIVO ESPECÍFICO N°5: DESARROLLAR ESTUDIOS Y MEDICIONES HIDROGRÁFICAS Y GEODÉSICAS IN SITU PARA COMPATIBILIDAD DEL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO</b>	<b>48</b>
5.5.1	<i>Mediciones de velocidad del sonido y CTD</i> .....	48
5.5.2	<i>Medición del nivel del mar</i> .....	49
5.6	<b>OBJETIVO ESPECÍFICO N°6: GENERACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
6.1	<b>LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO IN SITU</b> .....	<b>53</b>
6.1.1	<i>Cobertura de información batimétrica in situ</i> .....	53
6.1.2	<i>Modelo batimétrico mejorado</i> .....	54
6.1.3	<i>Comparación con modelos previos</i> .....	61
6.2	<b>CLASIFICACIÓN DEL FONDO MARINO</b> .....	<b>65</b>
6.3	<b>ESTUDIO DE MAREAS</b> .....	<b>68</b>
6.3.1	<i>Análisis armónico</i> .....	69
6.3.2	<i>Residuo o marea meteorológica v/s Presión Atmosférica</i> .....	70
6.3.3	<i>Análisis no armónico</i> .....	72
<b>7</b>	<b>DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>74</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>75</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>76</b>
<b>10</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>77</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Identificación del área de estudio.....	13
Figura 2: Zonificación del área de estudio.....	14
Figura 3: Esquema gráfico de offsets de sensores periféricos.....	17
Figura 4: Sistema multihaz, Edgetech 6205.....	19
Figura 5: Sistema de navegación y correcciones dinámicas.....	20
Figura 6: Sensor de presión para medición de nivel del mar HOB0.....	21
Figura 7: SVP/CTD AML Base.....	21
Figura 8: Línea de costa proporcionada por el mandante.....	22
Figura 9: Distribución espacial de las cartas disponibles.....	28
Figura 10: Distribución de sondas disponibles.....	30
Figura 11: Densidad de sonda por km <sup>2</sup> .....	31
Figura 12: Modelos preliminares. A: Distancia Inversa Ponderada, B: Kriging, C: Modificado de Shepard, D: Triangulación con Interpolación Lineal, E: Vecino Más Cercano, F: Vecino Natural.....	36
Figura 13: Análisis de correlación lineal entre métodos interpoladores.....	39
Figura 14: Ubicación de los perfiles batimétricos.....	41
Figura 15: Comparación de métodos de interpolación para perfil 1.....	42
Figura 16: Comparación de métodos de interpolación para perfil 2.....	42
Figura 17: Comparación de métodos de interpolación para perfil 3.....	43
Figura 18: interfaz de trabajo Qimera.....	44
Figura 19: interfaz 3D de trabajo Qimera.....	45
Figura 20: Principales movimientos angulares de la embarcación.....	45
Figura 21: Selección de áreas para pruebas de parche (Patch Test).....	46
Figura 22: modulo software Sonarwiz de clasificación de fondo marino.....	47
Figura 23: Ubicación zonas de muestreo perfiles velocidad del sonido.....	48
Figura 24: Ubicación sensores de presión. A: Canal Vicuña, B: Canal Moraleda y Ferronave, C: Canal Carrera del Chivato, D: Canal Simpson.....	49
Figura 25: Interfaz software ArcGIS, generación de perfiles batimétricos.....	52
Figura 26: Mapas batimétricos resultantes del levantamiento hidrográfico en cada uno de los canales.....	54
Figura 27: Plano batimétrico del área de estudio.....	55
Figura 28: Plano batimétrico Canal Simpson.....	57
Figura 29: Plano batimétrico Canal Moraleda y Ferronave.....	58
Figura 30: Plano batimétrico Canal Vicuña.....	59
Figura 31: Plano batimétrico Canal Carrera del Chivato.....	60
Figura 32: Comparación entre modelo batimétrico previo(derecha) y modelo batimétrico mejorado(izquierda). En el modelo batimétrico previo están identificados los perfiles de elevación que se muestran a continuación.....	61
Figura 33: Perfiles batimétricos, se compara el modelos batimétrico mejorado con los modelos previos.....	62
Figura 34: Perfiles batimétricos, se compara el modelos batimétrico mejorado con los modelos previos.....	63

---

Figura 35: Perfiles batimétricos, se compara el modelos batimétrico mejorado con los modelos previos.....	64
Figura 36: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Simpson). ....	65
Figura 37: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Moraleda) .....	66
Figura 38: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Carrera del Chivato) .....	67
Figura 39: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Vicuña). ....	67
Figura 40: Gráficos de series de marea.....	68
Figura 41: Serie de marea meteorológica v/s presión atmosférica.....	71



---

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cuadro de avance de proyecto.....	11
Tabla 2: Nombre zonas interés región Aysén.....	15
Tabla 3: Especificaciones técnicas embarcación.....	16
Tabla 4: Valores de offsets estáticos.....	18
Tabla 5: Detalle de las cartas SHOA.....	23
Tabla 6: Abreviación nombre de cartas.....	27
Tabla 7: Carta utilizadas para la elaboración del modelo preliminar.....	29
Tabla 8: Parámetros de entrada métodos interpoladores.....	35
Tabla 9: Dominio grilla batimétrica.....	35
Tabla 10: Cantidad de datos utilizados.....	37
Tabla 11: Resumen estadístico métodos de interpolación.....	40
Tabla 12: Valores resultantes del Patch Test.....	46
Tabla 13: Coordenadas sensores de presión para las cuatro zonas estudiadas.....	50
Tabla 14: Coordenadas cotas de marea para cada zona estudiada.....	50
Tabla 15: Validación cruzada.....	56
Tabla 16: Principales constituyentes armónicos.....	69
Tabla 17: Valores de K para cada sector.....	69
Tabla 18: NRS respecto al cero instrumental.....	70
Tabla 19: Planos mareales al NRS local, Canal Simpson.....	72
Tabla 20: Planos mareales al NRS local, Canal Moraleda y Ferronave.....	72
Tabla 21: Planos mareales al NRS local, Canal Carrera del Chivato.....	73
Tabla 22: Planos mareales al NRS local, Canal Vicuña.....	73
Tabla 23: Anexos.....	77

---

## 1 INTRODUCCIÓN

La región de Aysén se encuentra en una de las zonas de fiordos y canales más extensas de Chile, la Política Nacional de la Acuicultura, promulgada en el año 2003 en conjunto con el creciente desarrollo de la acuicultura en estas zonas ha motivado la realización de múltiples estudios dirigidos a comprender la dinámica de este sistema de estuarios y canales. El proyecto FIPA N° 2017-34 “Realización de estudios batimétricos de amplia cobertura en apoyo a estudios de modelación, Región de Aysén” tuvo por objetivo la obtención de datos de sondas producto de un levantamiento batimétrico para así generar un modelo batimétrico digital mejorado de alta resolución con el fin de apoyar futuros estudios de modelación numérica de diferentes fenómenos, y con esto, apoyar el conocimiento y caracterización de distintos procesos tales como transporte y mezcla de sedimentos y dispersión contaminantes entre otros.

Este informe técnico da a conocer las distintas etapas realizadas, como; estudios previos realizados, metodología implementada y los resultados de las etapas de adquisición y procesamiento de datos del proyecto en cuestión, informando finalmente los logros de las campañas realizadas (datos adquiridos producto del levantamiento multihaz, modelos batimétricos georreferenciados, modelos geomorfológicos y estudios de marea) y presentando el modelo batimétrico mejorado.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Proveer un modelo batimétrico mejorado sobre la base de modelos actualmente disponibles, cartografía accesible y un levantamiento batimétrico costero en la XI Región de Aysén.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2.1 Recopilar la información batimétrica disponible para la XI Región de Aysén.
- 2.2.2 Revisar, analizar, normalizar y procesar la información batimétrica existente para el área de estudio.
- 2.2.3 Generar y evaluar un modelo batimétrico preliminar en base a distintos métodos de interpolación de la información batimétrica existente.
- 2.2.4 Efectuar un levantamiento batimétrico multihaz de las zonas previstas, llegando a la más alta resolución disponible para estas zonas.
- 2.2.5 Desarrollar los estudios y mediciones hidrográficas y geodésicas para proveer a este levantamiento una calidad compatible con la cartografía náutica disponible hoy en día.
- 2.2.6 Generar un modelo batimétrico mejorado, incluyendo la información recopilada y el levantamiento batimétrico efectuado en el área de estudio.

### 2.3 NIVEL DE AVANCE SEGÚN OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Respecto de las actividades realizadas hasta la fecha, se presenta en la Tabla 1 el cuadro de avance del proyecto en función de los objetivos específicos planteados.

Tabla 1: Cuadro de avance de proyecto.

Objetivo Específicos	Porcentaje de Avance
Recopilar información batimétrica disponible para la XI Región de Aysén.	100%

Revisar, analizar, normalizar y procesar la información batimétrica existente para el área de estudio.	100%
Generar y evaluar un modelo batimétrico preliminar con bases en las distintas fuentes de información disponibles, en función de distintos métodos de interpolación.	100%
Efectuar un levantamiento batimétrico Multihaz de las zonas previstas, velando por la mayor calidad de la información adquirida para estas zonas, según su factibilidad y seguridad de la embarcación.	100%
Desarrollar los estudios y mediciones hidrográficas y geodésicas pertinentes para proveer a este levantamiento una calidad compatible con la cartografía náutica disponible actualmente.	100%
Generar un modelo batimétrico mejorado, incluyendo la información recopilada y el levantamiento batimétrico efectuado en las áreas de interés definidas en conjunto con el Mandante.	100%

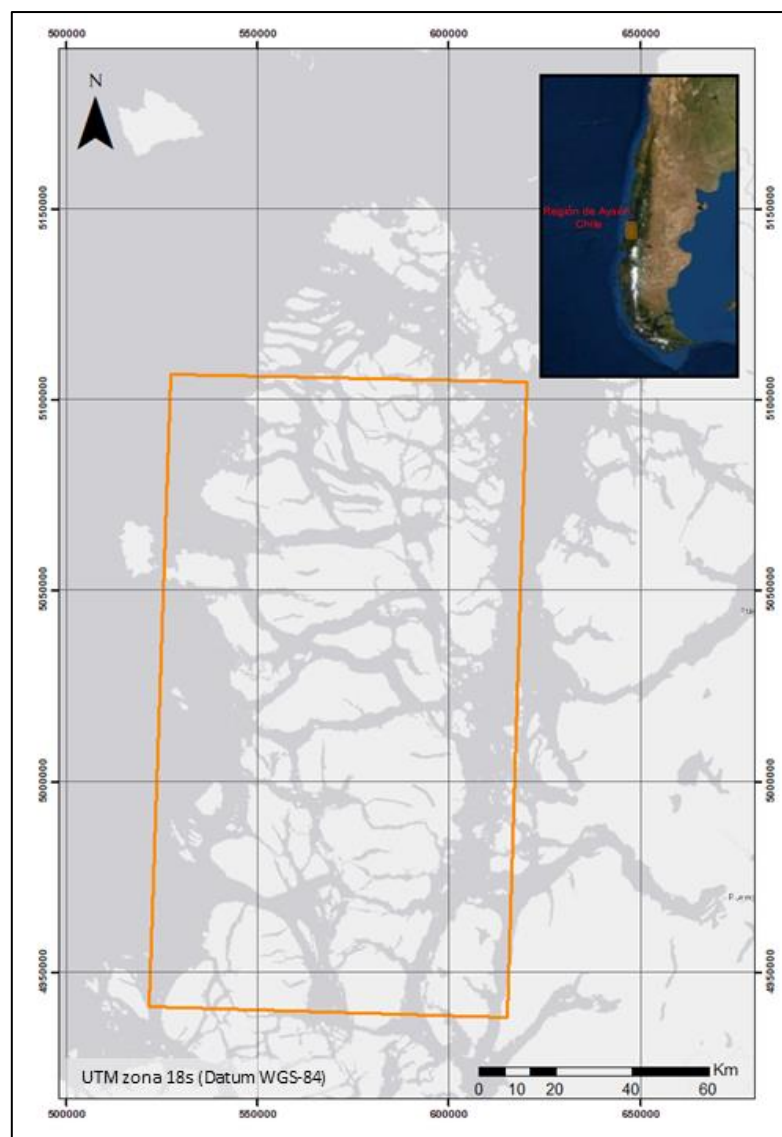
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 3 ANTECEDENTES

#### 3.1 ZONA DE ESTUDIO

Las áreas de estudio se encuentran emplazadas en la zona de fiordos y canales, en la XI Región de Aysén, el polígono que se presenta en la Figura 1 delimita el área de estudio (polígono color naranja).

Figura 1: Identificación del área de estudio.

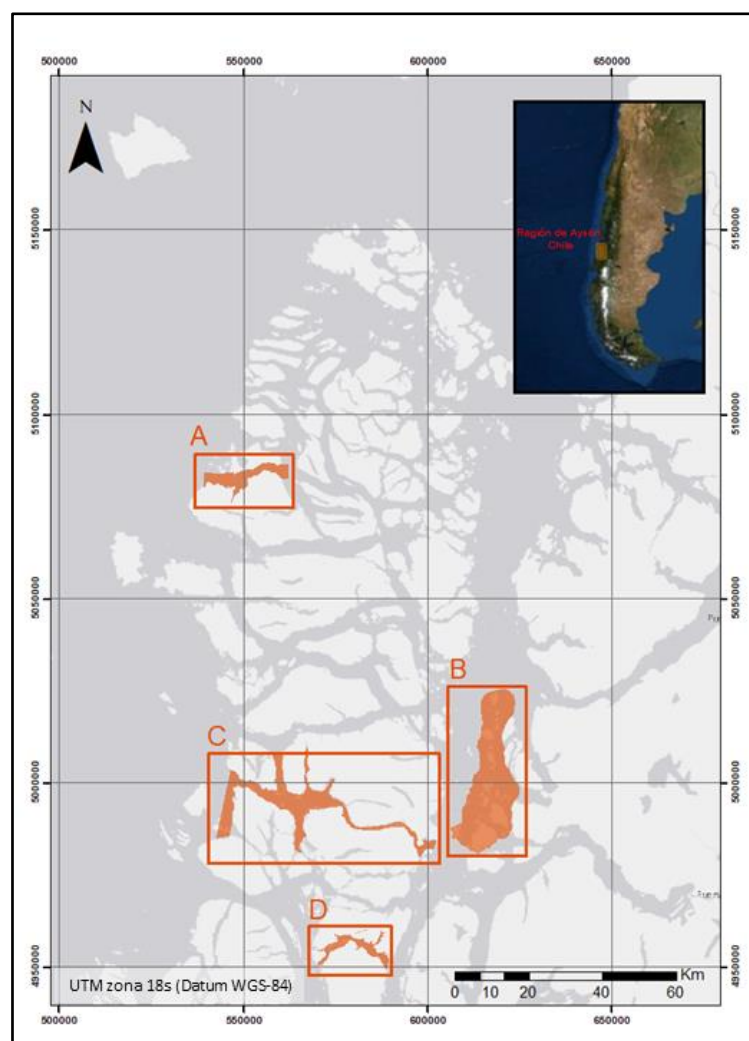


Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 3.2 SUPERFICIE DE LEVANTAMIENTO HIDROGRÁFICO

La cobertura del presente estudio se definió en conjunto con la unidad técnica a cargo del proyecto (SUBPESCA), bajo los requerimientos y alcances del presente estudio, y en beneficio del desarrollo de información batimétrica de alta calidad como insumo de información para futuros estudios de modelación numérica. Dicha cobertura se definió considerando una mejora en la resolución de los datos batimétricos en las zonas costeras hasta el veril de los 100 [m], decisión que fue tomada en conjunto a la unidad técnica por parte de FIPA. Finalmente se aumentó el rango de adquisición de datos batimétricos hasta el veril 120 [m] debido las capacidades técnicas del equipo utilizado.

Figura 2: Zonificación del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

La superficie total donde se desarrollaron los trabajos de investigación fue de aproximadamente 70.000 [ha], zonificadas según las especificaciones técnicas del mandante y que se grafican con polígonos de color naranja en la Figura 2, detalle de cada zona identificada en Tabla 2.

**Tabla 2: Nombre zonas interés región Aysén**

<b>Zona</b>	<b>Nombre zona</b>
A	Canal Simpson
B	Canal Moraleda Y Ferronave
C	Canal Carrera del Chivato
D	Canal Vicuña

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 4 MATERIALES Y HERRAMIENTAS

### 4.1 SOFTWARES DE PROCESAMIENTO DE DATOS

- QIMERA: Es un programa para el proceso y análisis de información geo-espacial. Permite extraer información inherente a conjuntos de datos para la evaluación de información, precisión de control de calidad y completitud del dato.
- GLOBAL MAPPER: Es un software de Sistema de Información Geográfica desarrollado por Blue Marble Geographics. Permite el manejo de datos de elevación, vectores y ráster, ofreciendo herramientas de visualización y conversión, entre otras.
- GOLDEN SOFTWARE SURFER: Es un programa que permite analizar, integrar y visualizar distintos tipos de datos. Dispone de una gran variedad de métodos y parámetros de interpolación.
- MATLAB: Es un ambiente de programación desarrollado por MathWorks. MATLAB permite la manipulación de matrices, generación de gráficos de datos y funciones, implementación de algoritmos, creación de interfaces de usuarios y la interconexión con otros lenguajes de programación.
- ARCGIS: Es un completo sistema de información geográfica que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

### 4.2 EMBARCACIÓN HIDROGRÁFICA

#### 4.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La embarcación que se utilizó para la instalación del sistema multihaz corresponde a TenTen-Vilú, detalles en Tabla 3.

Tabla 3: Especificaciones técnicas embarcación

Matrícula	CHO-1668
Distintivo de llamada	CA2501
TRG	41.6
Eslora	16.6 [m]
Manga	5 [m]
Puntal	2.13 [m]
Motor	Mercedes Benz 366



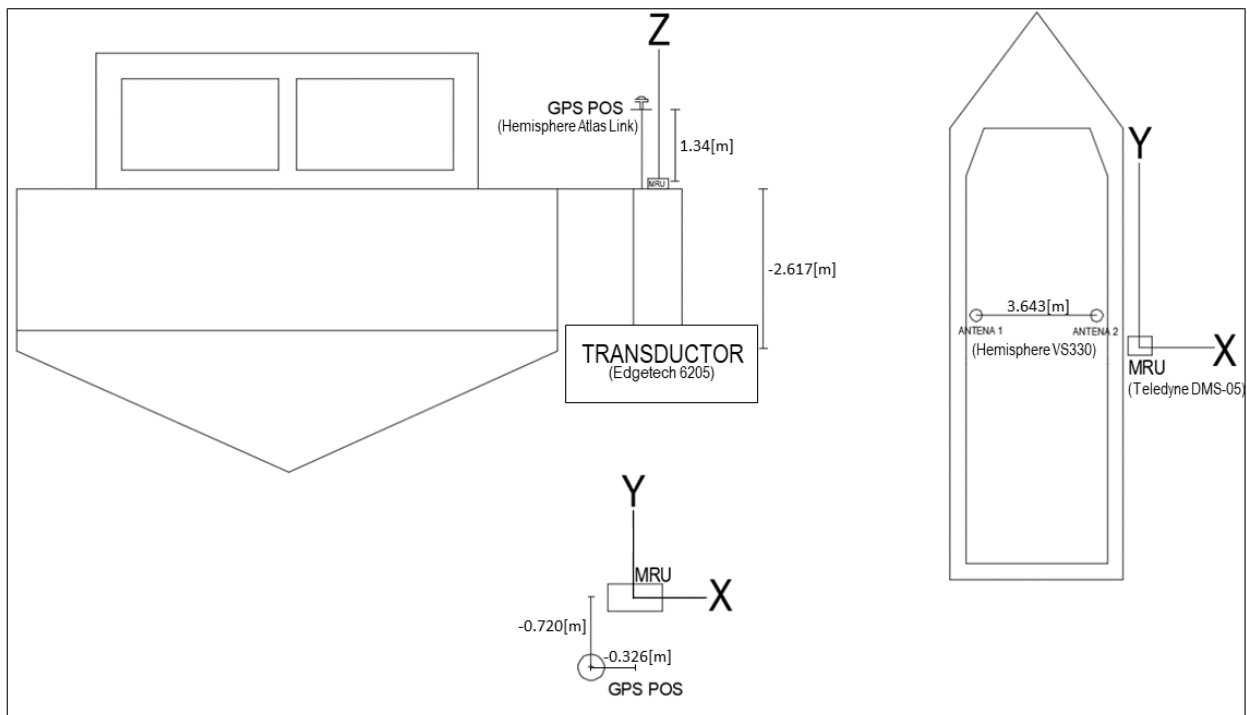
Capacidad de agua	2200 Lts
Capacidad de petróleo	1000 Lts

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

#### 4.2.2 ESQUEMA DE OFFSETS ESTÁTICOS

Los offset estáticos son los valores de referencia del sistema multihaz en relación a un punto 0 de un plano arbitrario correspondiente a la ubicación de la unidad de movimiento inercial. A partir de dicha referencia se desprenden las distancias de los puntos de las antenas y transductor, los offsets estáticos fueron medidos con estación total al momento de acoplar las bases de cada equipo a la embarcación. Previo a cada levantamiento, se corroboraban las distancias con cinta de medir (utilizando el promedio de tres mediciones, para así procurar una mayor exactitud.) (Tabla 4 y Figura 3).

Figura 3: Esquema gráfico de offsets de sensores periféricos.



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

**Tabla 4: Valores de offsets estáticos.**

Fecha	Desplazamiento [m]						Método
	X		Y		Z		
	Transductor	GPS	Transductor	GPS	Transductor	GPS	
12-12-2018	0	-0.326	0	-0.72	-2.617	1.34	Estación total
14-03-2019	0	-0.33	0	-0.721	-2.62	1.34	cinta de medir
02-05-2018	0	-0.33	0	-0.72	-2.62	1.334	cinta de medir
16-06-2018	0	-0.328	0	-0.723	-2.62	1.34	cinta de medir
03-07-2019	0	-0.33	0	-0.72	-2.62	1.34	cinta de medir

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 4.3 SISTEMA MULTHAZ EDGETECH 6205

Un ecosonda envía un pulso acústico directamente hacia el fondo del mar y registra el eco devuelto, dicho pulso de sonido es generado por un transductor que emite un pulso acústico y luego espera que la señal retorne, el tiempo que demora la señal para retornar se registra y se convierte en una medición de profundidad en función de la velocidad del sonido en la columna de agua.

Las mediciones de profundidad se realizaron con un ecosonda Multihaz interferométrico Edgetech modelo 6205 (Figura 4) de alta resolución cumpliendo con la Norma de la OHI para los levantamientos hidrográficos de orden especial (S-44), este ecosonda está compuesto por dos transductores y está diseñado para trabajar en frecuencias de 230 [kHz] y 550 [kHz].

El ecosonda Multihaz Edgetech 6205 integra completamente batimetría y un sistema de sonar de barrido lateral (side scan sonar) de doble frecuencia el cual produce en tiempo real imágenes de retrodispersión y batimetría. Dicho ecosonda utiliza la tecnología de sondaje de ecos multifásicos de Edgetech o enfoque híbrido, para superar las limitaciones de los sonómetros de ecos múltiples (MBES) y los sistemas interferométricos en aguas poco profundas combinando tanto la formación de haz como la discriminación de fase para determinar cada punto de sondaje a lo largo del fondo marino. El equipo también incorpora la tecnología Full Spectrum de EdgeTech para superar las especificaciones de batimetrías de Orden Especial 44, NOAA y USACE de la OHI en relación con la caracterización del fondo marino y la incertidumbre de datos batimétricos.

Figura 4: Sistema multihaz, Edgetech 6205



Fuente: <https://www.edgetech.com>

#### 4.4 SISTEMA DE NAVEGACIÓN Y CORECCIONES DINÁMICAS

El continuo movimiento que se genera en la embarcación producto de la naturaleza de la navegación provoca que existan desviaciones en la posición y ángulo del ecosonda, es por esto que se deben aplicar sistemas que permitan la corrección de dichas desviaciones en datos batimétricos registrados.

Para efectos de la caracterización dinámica de la embarcación y la posterior aplicación de las correcciones en sus 3 ejes espaciales, se utilizó una unidad de movimiento inercial (IMU) marca TELEDYNE modelo "DMS-05" (Figura 5) que permitió entregar las correcciones de roll y pitch al ecosonda con un error dinámico de +/- 0,05°. Para definir el vector de rumbo y dirección de navegación, se utilizó un sistema de navegación marca HEMISPHERE modelo "VS330".

Estos equipos entregaron la información de movimiento y navegación para generar correcciones en tiempo real y así permitir la correcta ejecución de los trabajos de sondaje y la verificación de la cobertura de levantamiento.

Figura 5: Sistema de navegación y correcciones dinámicas



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 4.5 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

Para definir el posicionamiento de la embarcación utilizada para el levantamiento, y al mismo tiempo georreferenciar la información de las profundidades registradas, se utilizó un GPS marca HEMISPHERE modelo ATLAS LINK con corrección satelital ATLAS, en modalidad diferencial RTK. Este GPS entrega la información de posicionamiento mediante un sistema de navegación referencial en tiempo real con un error de +/- 10 [cm], sin la necesidad de la instalación de una base en tierra y optimizando los tiempos de trabajo en terreno, el cual es una solución especialmente pensada en levantamientos de información marina en zonas lejanas al borde costero, donde la señal de radio RTK no tenga alcance.

## 4.6 MAREÓGRAFOS

Las variaciones del nivel del mar y temperatura se registraron con sensores de presión marca HOBO, modelo WATER LEVEL DATA LOGGER U20 (Figura 6). El objetivo de estas estaciones de mareas es la determinación de los planos mareales por cada una de las zonas de estudio, además del análisis armónico de mareas según las especificaciones técnicas para realizar mediciones y análisis oceanográficos contenidas en las Instrucciones Oceanográficas N°1 Pub. 3201.

Figura 6: Sensor de presión para medición de nivel del mar HOBO.



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 4.7 SENSOR DE VELOCIDAD DEL SONIDO, TEMPERATURA, PRESIÓN Y SALINIDAD

Para efectos de la compensación de los errores de propagación del pulso electroacústico en el medio marino, se realizó la observación de esta variable con un perfilador de velocidad del sonido marca AML, modelo Xbase SVP (Figura 7).

Figura 7: SVP/CTD AML Base.



Fuente: amloceanographic.com.

## 4.8 SERVICIO DE CORRECCIÓN SATELITAL ATLAS HEMISPHERE

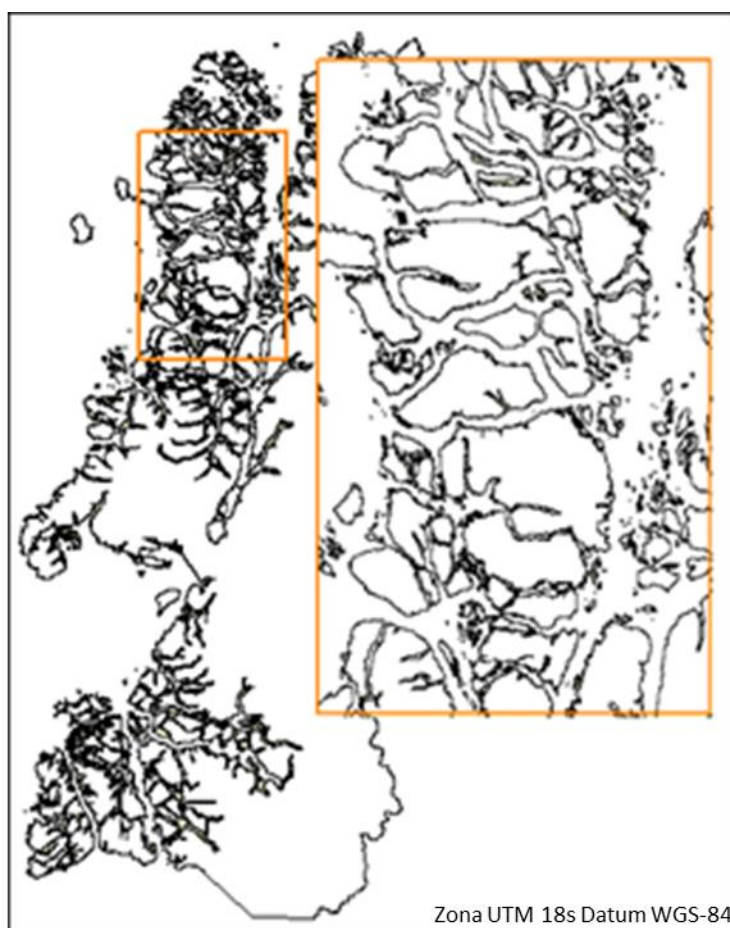
Atlas es un servicio de corrección de banda L global, líder en la industria basado en GNSS, este es un servicio flexible y escalable, que entrega sus señales de corrección a través de satélites L con precisiones a niveles sub decimétricos. El servicio contratado por GEOCIENCIAS corresponde a ATLAS H10, que tiene precisiones de 8 [cm] 95% (4 cm RMS).

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 OBJETIVO ESPECÍFICO N°1: RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN BATIMÉTRICA EXISTENTE

En primera instancia, se realizó una recopilación de toda la información batimétrica disponible para el área de estudio, constituida principalmente por las cartas náuticas desarrolladas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), las cuales están referidas al NRS local, estimado por dicha entidad a cargo.

Figura 8: Línea de costa proporcionada por el mandante



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Esta información fue entregada por SUBPESCA como parte de los antecedentes batimétricos y cartográficos disponibles a la fecha según lo acordado con la unidad técnica a cargo del proyecto. Además de la información batimétrica, SUBPESCA proporcionó la línea de costa digitalizada del área de estudio en formato “*shp*”, siendo esta última la referencia que ocupa el Mandante en sus modelos y que se empleó a lo largo del desarrollo de los productos correspondientes a este proyecto. El detalle de dicha línea de costa utilizada se observa en la Figura 8, además el detalle de las cartas SHOA entregadas se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5: Detalle de las cartas SHOA**

N° Carta	Nombre	Escala 1:	Proyección original de la carta	Método de adquisición	Edición	
8000	Isla Guafo a Golfo de Penas	500.000	Proyección Mercator	Sin información	2001/2010 reimpresión	
8100	Boca del Guafo - Archipiélago Guaitecas	100.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2009	
8111	Bahías y puertos en Islas Guaitecas	Bahía y Puerto Low	25.000	Proyección Mercator – WGS-84	Multihaz y monohaz con DGPS (2004)	2006
		Puerto Barrientos	25.000			
		Bahía y Puerto Melinka	25.000			
8112	Fondeaderos en Isla Guafo y Península Tres Montes	Caleta Rica	10.000	Sin información	Sin información	2001
		Caleta Samuel	10.000			
		Caleta Sheep	20.000			
		Puerto Slight	25.000			
		Bahía San Andrés	50.000			
8113	Archipiélago de los Chonos. Puertos en los Canales Chaffers y King	Puerto May	15.000	Proyección Mercator – WGS-84	Multihaz y monohaz con DGPS (2004)	2009
		Puerto Llanos	20.000			
		Estero Level	25.000			
8160	Canal Ninualac	Rocas Blanco a Roca Engaño	50.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	1998/2009 reimpresión
		Roca Engaño a Bahía Adventure	50.000			
8161	Puerto María Isabel - Canal Ninualac	10.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2000	

8200	Archipiélago Chonos - Canales Oceánicos		100.000	Proyección Mercator – WGS-84	Multihaz y monohaz (1998 al 2009)	2011
8211	Canal Refugio y Puerto Santo Domingo		30.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	1997
	Puerto Santo Domingo		10.000			
8221	Seno Melimoyu y Estero Mena		20.000	Proyección Mercator – Datum Sudamericano 1969	Sin información	1994
8300	Canales Pérez Norte y Sur		100.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2006
8400	Canal Moraleda. Islas Guaitecas a Isla Tuap		150.000	Proyección Mercator	Sin información	2006
8412	Puertos en el Canal Moraleda	Puerto Ballena	15.000	Sin información	Sin información	2006
		Puerto Cuptana	20.000			
		Puerto Nassau	20.000			
		Puerto Francés	20.000			
8500	Canales Puyuguapi y Jacaf		100.000	Proyección Mercator	Sin información	2006
	Canal Puyuguapi. Puerto Cisnes		20.000	Sin información	Sin información	2006
8511	Seno Gala		20.000	Proyección Mercator	Sin información	1985
8520	Senos Ventisquero y Magdalena	Seno Ventisquero. Paso Galvarino	12.000	Proyección Mercator – WGS-84	Multihaz y monohaz con DGPS (2003)	2006
		Seno Ventisquero. Bahía Dorita	15.000			
		Seno Ventisquero. Puerto Puyuguapi	30.000			
		Seno Magdalena	45.000			
8610	Fiordo Aysén		50.000		Sin información	2003



	Caleta Pérez		25.000	Proyección Mercator – WGS-84		2003
8611	Bahía Chacabuco y Accesos	Acceso a Bahía Chacabuco	20.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2003
		Bahía y Puerto Chacabuco	8.000			
8612	Ríos Aysén, de los Palos y Aguas Muertas	Acceso a Río Aysen. Isla de las Nalcas a Punta Pantano	10.000	Sin información	Sin información	2003
		Río Aysén. Punta Pantano a Puerto Aysén	10.000			
		Ríos de los Palos y Aguas Muertas	6.000			
8620	Canal Moraleda - Isla Tuap a Isla Traiguén		70.000	Proyección Mercator – WGS-84	Levantamiento SHOA Monohaz y Multihaz	2002
	Acceso Canal Ferronave		50.000			
	Caleta Vidal		20.000			
8621	Puertos en Canal Moraleda	Puerto Lagunas	20.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2002
		Puerto Americano	20.000			
		Puerto Aguirre	10.000			
8630	Canal Darwin		50.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2003
8631	Fondeaderos en el Canal Darwin	Puerto Yates	20.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2003
		Puerto Italiano	15.000			
		Rada Vallenar	30.000			
		Caleta Aurora	15.000			
8640	Canales Pulluche -Chacabuco y Adyacentes		50.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2003
	Canal Pulluche. Bajo Roepke		20.000			
8650	Canales Errázuriz, Costa y Estero Elefantes		70.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2004
	Termas Quitralco		35.000			

	Puerto Bonito		30.000			
8660	Esteros Elefantes, Cupquelán y Barros Arana		70.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2005
	Bahía Erasmo		45.000			
	Bahía Exploradores		40.000			
8670	Golfo Elefantes a Laguna San Rafael		50.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2005
	Río Témpanos		25.000			
	Paso Quesahuén		30.000			
	Caleta Gualas		25.000			
8700	Bahías Darwin y Anna Pink		150.000	Proyección Mercator	Sin información	1986
8720	Bahía Anna Pink		50.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2003
8721	Península de Taitao - Fondeaderos en Bahía Anna Pink	Estero Clemente	10.000	Proyección Mercator – WGS-84	Sin información	2003
		Puerto Refugio	20.000			
8800	Bahía Anna Pink a Canal Messier		300.000	Proyección Mercator	Sin información	1949/ 1997 reimpresión
8810	Bahía Hoppner y Paso Holloway		50.000	Proyección Mercator – Datum Sudamericano 1969	Sin información	1994
8820	Bahía San Quintín		75.000	Sin información	Sin información	1952

Fuente: Adaptado de la publicación SHOA 3000.

Cabe mencionar que, según los alcances del proyecto y sus bases técnicas, se ha descartado la integración de otras fuentes de información batimétrica tales como IHO-DCDB (International Hydrographic Office-Data Centre for Digital Bathymetry) y GEBCO pues corresponden a bases de datos de gran escala y dado que el área cuenta con cobertura a menor escala, el uso de estos datos no es útil para los fines del proyecto.

## 5.2 OBJETIVO ESPECÍFICO N°2: REVISIÓN, ANÁLISIS Y NORMALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN BATIMÉTRICA EXISTENTE

En esta fase, la información batimétrica recopilada (proporcionada por el mandante) y disponible a la fecha fue normalizada mediante el uso de herramientas geomáticas y GIS (Geographic Information System), esta normalización tuvo como finalidad estandarizar la base de información, esto es, una única proyección y datum.

Las cartas entregadas por el mandante (en formato digital) fueron cargadas en el software Global Mapper, se seleccionó aquellas que entregasen información al área estudiada y posterior a esto, se comprobó el datum y proyección de cada carta utilizando la herramienta de proyección del software en cuestión. Debido a que todas las cartas presentaban el mismo datum (WGS-84) sólo se procedió a cambiar la proyección de dicha información a través del mismo software, estandarizando todo en proyección UTM (norte y este en [m]). Una vez realizados los cambios geodésicos se revisó la información de forma visual, esto es, continuidad de los datos y que las sondas no estuviesen sobre zonas terrestres (frontera horizontal visual definida en base a la línea de costa entregada por el mandante).

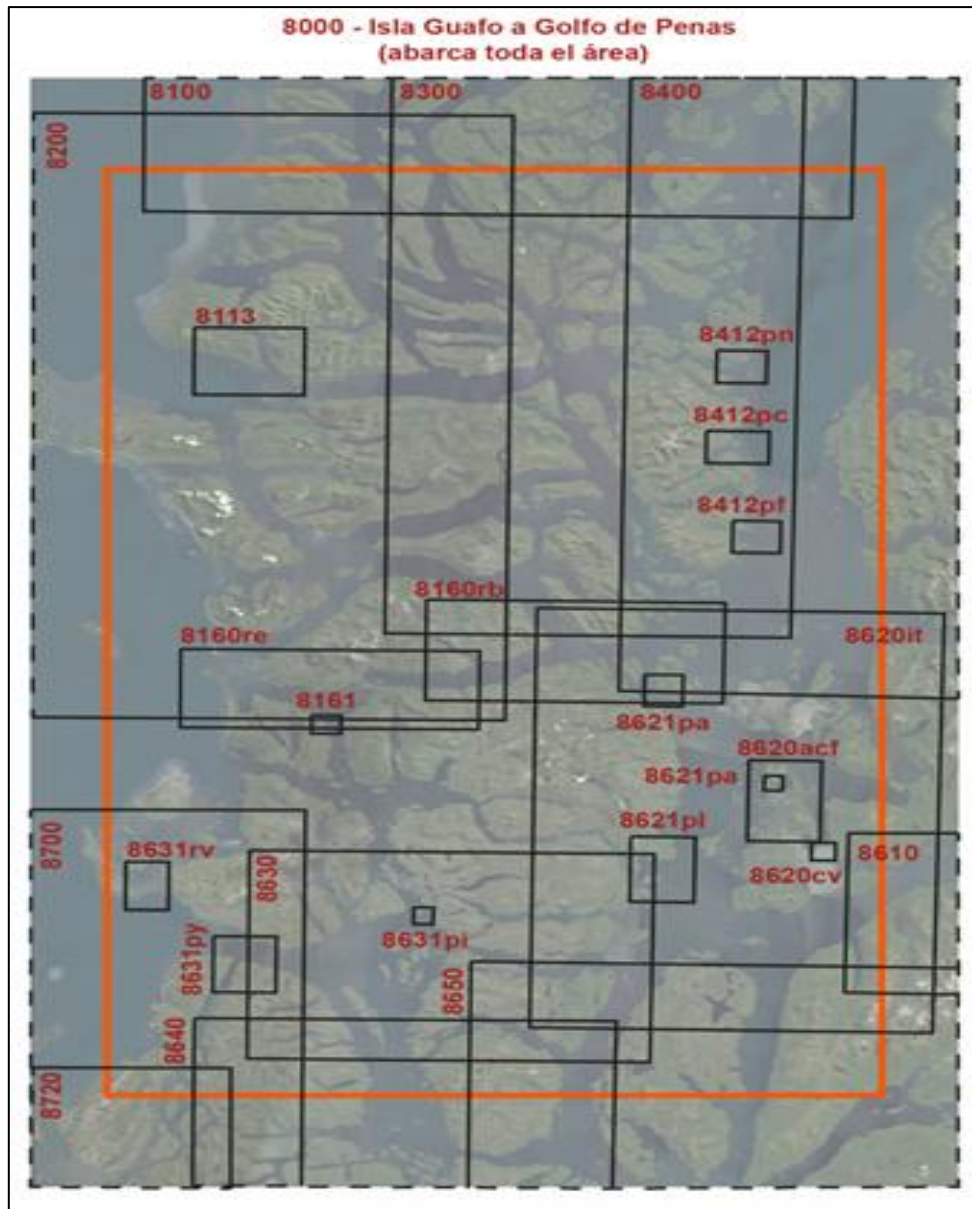
La Tabla 6 presenta siglas representativas para ciertas cartas por comodidad para la lectura y la Figura 9, la cobertura de cartas para la zona de estudio.

**Tabla 6: Abreviación nombre de cartas.**

N° Carta	Nombre	Sigla	
8160	Canal Ninualac	Rocas Blanco a Roca Engaño	rb
		Roca Engaño a Bahía Adventure	re
8161	Puerto María Isabel - Canal Ninualac	cn	
8620	Canal Moraleda. Isla Tuap a Isla Traiguén	it	
	Acceso canal Ferronave	acf	
8621	Puertos en Canal Moraleda	Puerto Lagunas	pl
		Puerto Americano	pa
		Puerto Aguirre	pag

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 9: Distribución espacial de las cartas disponibles



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Una vez definidas y estandarizadas las cartas a utilizar (Tabla 7), se realizó un análisis de la distribución de la información. Para ello, se revisó la zona de intersección de cartas y se evaluó las coincidencias en ubicación de sondas con valores de profundidad distinta. A tal efecto, se consideró la escala de las cartas y su cantidad de sondas por área [km<sup>2</sup>], como también ciertos factores morfológicos tal como valores de profundidad evidentemente anómalos o ubicados más allá de la línea de costa. No se consideró el método de adquisición empleado por falta de información en algunas cartas náuticas.

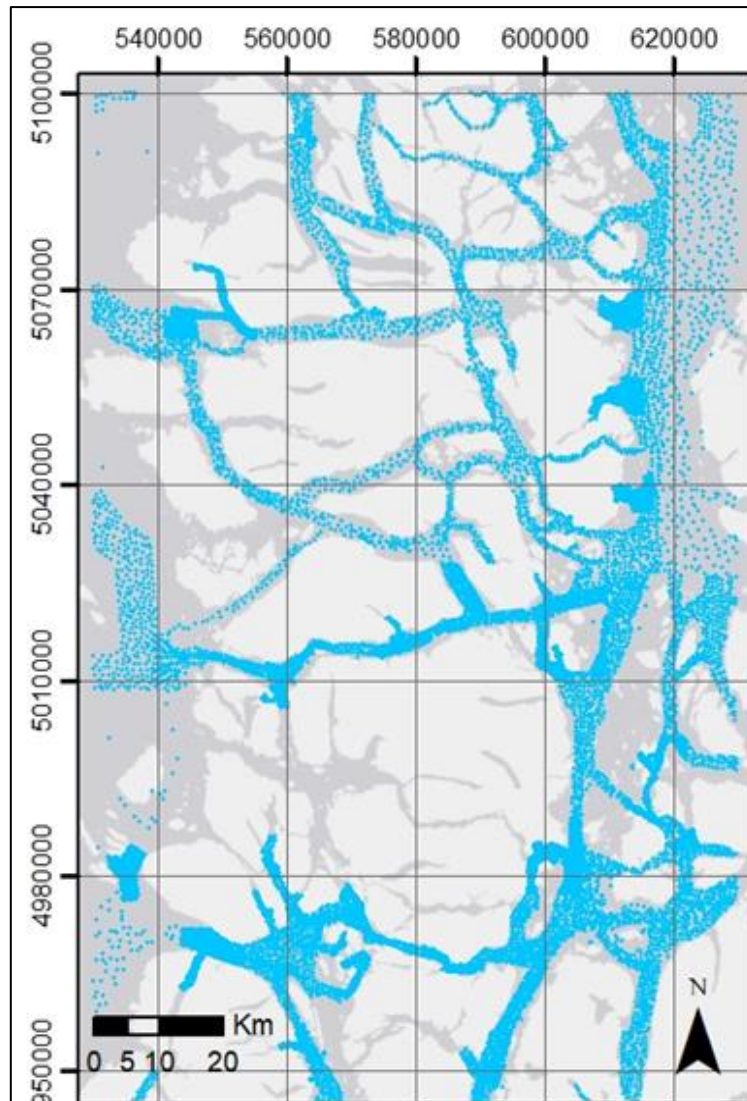
Se identificó sondas anómalas, entre ellas sondas de -730 [m] cercanas a la costa y no coincidentes con el perfil de sondas colindantes, sondas mal referenciadas ubicadas más allá del límite de la línea de costa y no coincidentes o que se alejaban demasiado del perfil batimétrico, fueron eliminadas del set de datos. Debido a la relación entre el total de las sondas (23578 datos) y las sondas descartadas (19), no se genera una distorsión en el modelo generado. La distribución final de sondas se muestra en la Figura 10 y la densidad de sondas por área en la Figura 11.

**Tabla 7: Carta utilizadas para la elaboración del modelo preliminar**

N° Carta	Nombre	Escala 1:	Proyección de la carta	Método de adquisición	Año Edición	
8000	Isla Guaefo a Golfo de Penas	500.000	Mercator	Sin información	2001/2010 reimpresión	
8113	Archipiélago de los Chonos. Puertos en los Canales Chaffers y King	Puerto May	15.000	Mercator - WGS-84	Multihaz y monohaz con DGPS (2004)	2009
		Puerto Llanos	20.000			
		Estero Level	25.000			
8160	Canal Ninualac	Rocas Blanco a Roca Engaño	50.000	Mercator - WGS-84	Sin información	1998/2009 reimpresión
		Roca Engaño a Bahía Adventure	50.000			
8161	Puerto María Isabel - Canal Ninualac	10.000			2000	
8200	Archipiélago Chonos - Canales Oceánicos	100.000		Multihaz y monohaz (1998 al 2009)	2011	
8300	Canales Pérez Norte y Sur	100.000				
8400	Canal Moraleda, Islas Guaitecas a Isla Tuap	150.000	Mercator			
8500	Canales Puyuguapi y Jacaf	100.000			2006	
	Puerto Cisnes	20.000	Sin información			
8620	Canal Moraleda - Islas Tuap a Isla Traiguén	70.000		Levantamiento SHOA Monohaz y Multihaz	2002	
	Acceso Canal Feronave	50.000				
	Caleta Vidal	20.000				
8621	Puertos en Canal Moraleda	Puerto Lagunas	20.000	Mercator - WGS-84	Sin información	
		Puerto Americano	20.000			
		Puerto Aguirre	10.000			
8630	Canal Darwin	50.000			2003	
8640	Canal Pulluche - Chacabuco y Adyacentes	50.000				
8650	Canales Errazuriz, Costa y Estero Elefantes	70.000			2004	
	Termas Quitralco	35.000				
	Puerto Bonito	30.000				

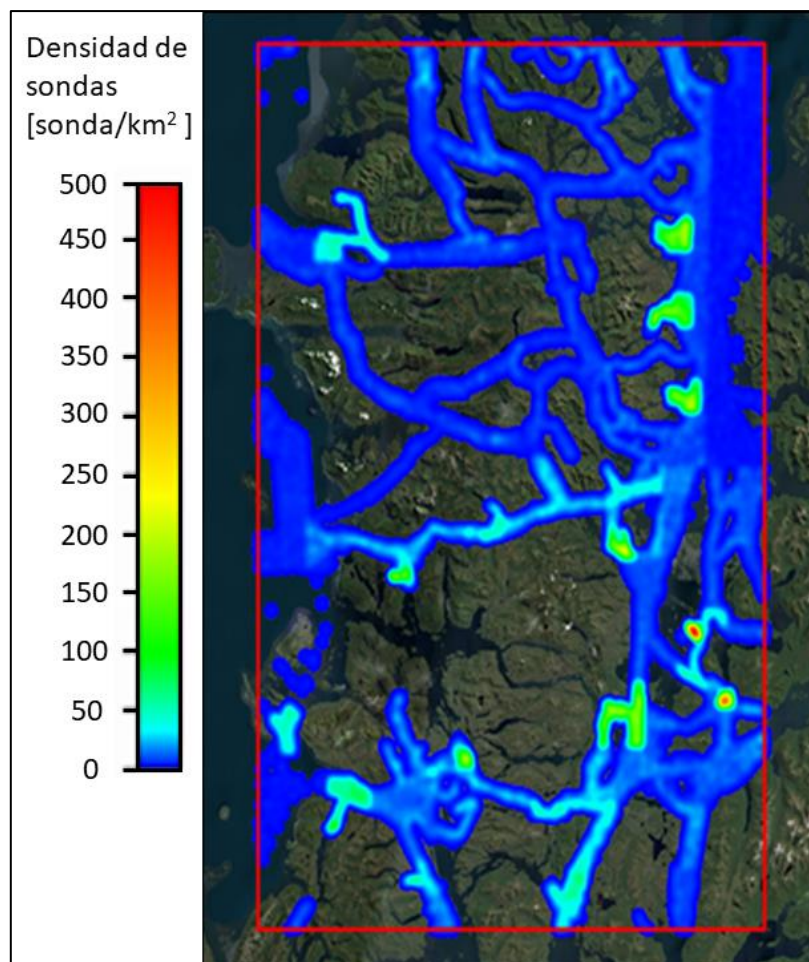
Fuente: Adaptado de la publicación SHOA 3000.

Figura 10: Distribución de sondas disponibles



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.



Figura 11: Densidad de sonda por km<sup>2</sup>

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Finalmente, se realizó la integración de la información de profundidades y de línea de costa con objeto de generar el archivo de dominio batimétrico para el desarrollo del posterior modelo preliminar, esto significó cargar el archivo \*.shp de línea de costa proporcionado por el mandante (el cual fue utilizado como referencia horizontal (frontera visual)) y las cartas náuticas en el software Global Mapper, generando así un archivo ASCII de puntos con tres columnas: coordenada este, coordenada norte y profundidad [m].

### 5.3 OBJETIVO ESPECÍFICO N°3: GENERAR Y EVALUAR UN MODELO BATIMÉTRICO PRELIMINAR EN BASE A DISTINTOS MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

Un modelo es considerado como una abstracción aproximada que busca la simplicidad de la realidad y se establece mediante la aplicación de unos supuestos, los cuales determinan qué tipo de propiedades son relevantes (Felicimo, 1994), que en el caso de los MDB (modelo digital batimétrico) es la profundidad. Esta variable continua, y distribuida espacialmente mediante un conjunto de datos, es la distancia que se encuentra entre un plano de referencia vertical (como por ejemplo del NRS) y el fondo acuático, que permite establecer la topografía y geomorfología de las profundidades marinas.

Este tipo de modelos se describen como una función bivariable continua  $P = f(x, y)$ , donde  $P$  es la profundidad en un punto de coordenadas  $(x, y)$ .

Con el fin de buscar la mejor representación de las condiciones batimétricas de la zona de estudio en función de la información disponible a la fecha, se implementaron diferentes métodos de predicción espacial (interpolación) de los datos con el fin de generar una malla regular. Los mismos son descritos a continuación.

#### 5.3.1 MÉTODO DE PONDERACIÓN DE LA DISTANCIA INVERSA (IDW)

Este método se basa en la asignación de peso a cada punto observado en función de la distancia del punto observado al punto a interpolar, es decir, mientras más cercano se encuentre el punto observado al interpolado, mayor peso le asignará el método. El algoritmo general es:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} z_i$$

Donde  $\hat{Z}_j$  es el valor estimado para el punto  $j$ ,  $n$  número de puntos para la interpolación,  $z_i$  valor en el punto  $i$ -ésimo y  $k_{ij}$  peso asignado al dato  $i$  en el cálculo del nodo  $j$ . La fórmula de peso se define  $k_{ij} = 1/d_{ij}^\beta$ , donde  $d$  es la distancia euclidiana entre el dato  $i$  y el nodo  $j$  y  $\beta$  un exponente de ponderación, quedando el algoritmo final (Álvarez et al., 2011).

$$\hat{Z}_j = \frac{\sum_i \frac{z_i}{d_{ij}^\beta}}{\sum_i \frac{1}{d_{ij}^\beta}}$$



### 5.3.2 MÉTODO DE KRIGING ORDINARIO

Este método utiliza modelos estadísticos que relacionan los puntos medios, ayudando a determinar el nivel de precisión con el cual se realizó la predicción, indica que entre la dirección y distancia entre los datos hay una correlación espacial, esto es, la altitud en un punto está determinada por los valores de los puntos más próximos distribuidos a distancias variables. Es un método insesgado, o sea, el valor esperado del error es cero y garantiza la mínima varianza de la estimación, es decir, reduce al mínimo la varianza del error de la estimación. El algoritmo utilizado es:

$$\hat{Z}_{x,y} = \sum_{i=1}^k \alpha_i z_i$$

Donde  $\hat{Z}_{x,y}$  valor estimado,  $k$  conjunto de datos en torno al punto interpolado,  $\alpha_i$  vector pesos asignado y  $z_i$  valor en el punto  $i$ -ésimo. El vector de pesos asignado se define como:

$$\gamma(h_{ij})\alpha_i = \gamma(h_{ip})$$

Donde  $\gamma(h_{ij})$  matriz de valores del semivariograma teórico que separa al punto muestra  $i$  del  $j$  y  $\gamma(h_{ip})$  vector de semivarianza teórica que separa el punto  $i$  del  $p$  de cálculo. (Álvarez et al., 2011)

### 5.3.3 MÉTODO DE SHEPARD

Utiliza el mismo método que el de ponderación de la distancia inversa, pero a través de mínimos cuadrados ponderados, eliminando los contornos generados por el modelo, su algoritmo es:

$$\hat{Z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} z_i$$

Donde  $\hat{Z}_j$  es el valor estimado para el punto  $j$ ,  $n$  número de puntos para la interpolación,  $z_i$  valor en el punto  $i$ -ésimo y  $k_{ij}$  peso asignado al dato  $i$  en el cálculo del nodo  $j$ . La fórmula de peso, está definida como:

$$k_{ij} = \frac{\left[\frac{(R - h_{ij})}{Rh_i}\right]^2}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{(R - h_{ij})}{Rh_i}\right]^2}$$

Donde  $h_{ij}$  distancia punto dispersión a punto interpolado,  $R$  distancia desde el punto de interpolación hasta el punto de dispersión más distante y  $h_i$ , variable altura, definida por:

$$h_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}$$

Con  $(x, y, z)$  coordenadas punto interpolación y  $(x_i, y_i, z_i)$  coordenadas punto de dispersión. (Álvarez et all., 2011).

#### 5.3.4 MÉTODO DE TRIANGULACIÓN CON INTERPOLACIÓN LINEAL

Utiliza la triangulación de Delaunay óptima, el algoritmo crea triángulos dibujando líneas entre los puntos. Los puntos originales están conectados de tal forma que ningún triángulo se intersecta con otro. El resultado que entrega es un mosaico de triángulos que cubren toda la malla.

Es un método interpolador exacto. Cada triángulo define un plano sobre los nodos de la malla que se encuentran dentro del triángulo, siendo la inclinación y elevación del triángulo determinada por los tres puntos originales que definen el triángulo. (Yang & Hotlet, 2013).

#### 5.3.5 MÉTODO VECINO NATURAL

Este método considera un conjunto de polígonos, agregando un nuevo punto al conjunto de datos ya existente y modificándolos, esta área asociada de dicho polígono al nuevo punto es denominada “área de búsqueda”.

El algoritmo de este método usa un promedio ponderado de las observaciones vecinas, donde los pesos asignados son proporcionales al “área de búsqueda” Este método no extrapola datos más allá de la ubicación del contorno de los polígonos. (Golden software, inc, 2002).

#### 5.3.6 MÉTODO VECINO MÁS CERCANO

Este método asigna el valor del punto más cercano a cada nodo de la malla. El método es útil cuando los datos ya están espaciados de manera uniforme. Cuando los datos están grillados, el método es efectivo completando con datos en lugares donde no los hay. (Golden software, inc, 2002).

El software empleado para la generación de cada modelo batimétrico fue SURFER, los parámetros de entrada de cada método y dominio de la grilla se presentan en la Tabla 8 y Tabla 9, respectivamente.

**Tabla 8: Parámetros de entrada métodos interpoladores.**

Método Interpolador	Parámetro o propiedad
Distancia Inversa Ponderada	Potencia = 2
Kriging	Ordinario, variograma lineal
Modificado de Shepard	Factor de suavizado = 0
Triangulación con Interpolación Lineal	Ajuste de proporción = 1
Vecino Más Cercano	Rango = 189
Vecino Natural	Ajuste de proporción = 1

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

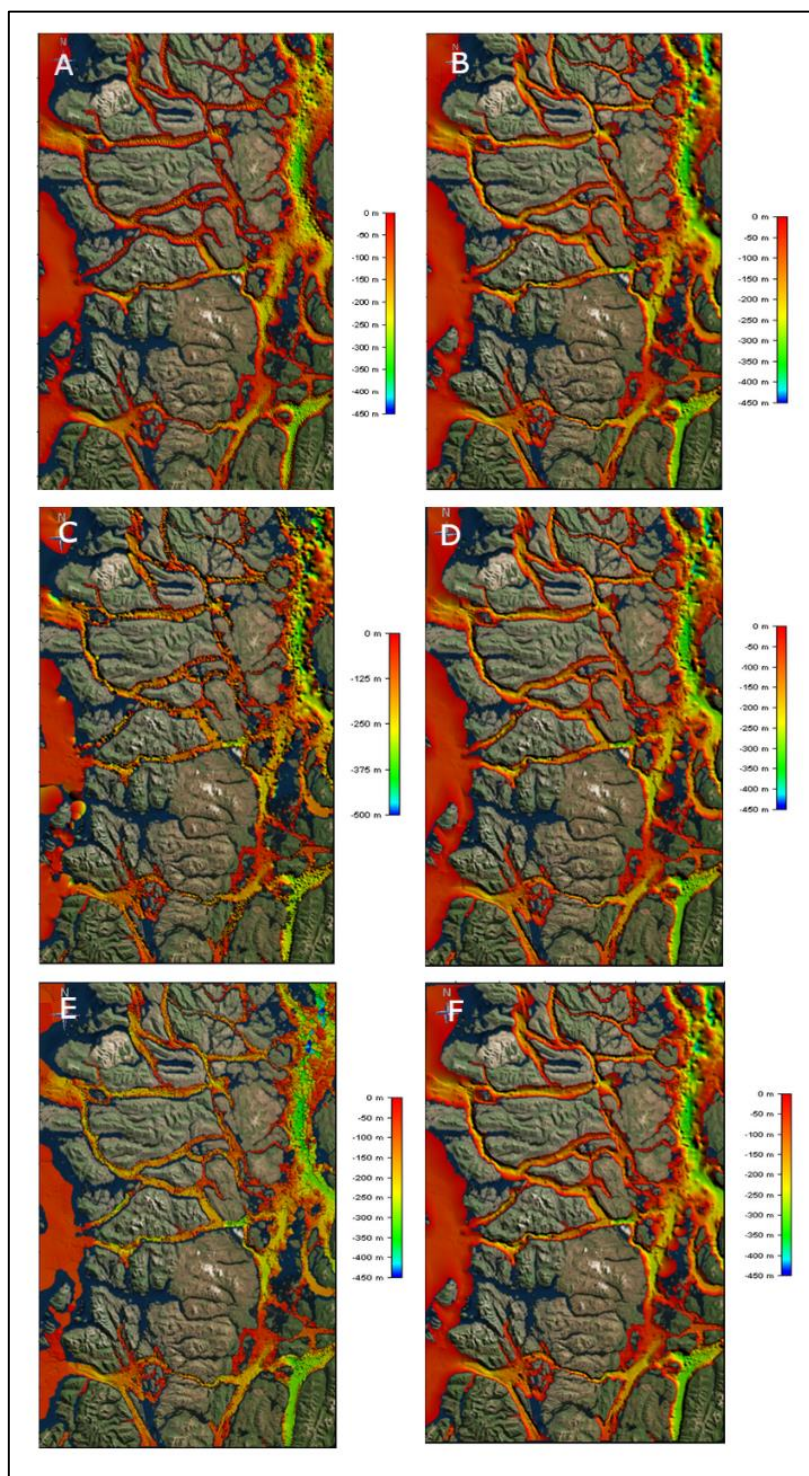
**Tabla 9. Dominio grilla batimétrica.**

Coordenadas UTM [m]				Resolución [m]	
Norte	Sur	Este	Oeste	dx	dy
5100000	4945000	630000	530000	100	100

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Posteriormente los modelos batimétricos resultantes y proyectados en una grilla regular de 100 [m], utilizando la proyección UTM, Datum WGS 84, fueron comparados entre sí, mediante un análisis estadístico de los resultados y análisis visual a partir de perfiles batimétricos.

Figura 12: Modelos preliminares. A: Distancia Inversa Ponderada, B: Kriging, C: Modificado de Shepard, D: Triangulación con Interpolación Lineal, E: Vecino Más Cercano, F: Vecino Natural



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 5.3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados de cada método de interpolación descritos, se realizó un análisis estadístico con objeto de evaluar el comportamiento de cada uno de los métodos implementados.

Para dicho análisis, se implementó el método de validación cruzada, que evalúa la calidad de un método de predicción espacial o mallado y sirve para efectos comparativos entre dos o más métodos. El método consiste en que conocido un set inicial con N cantidad de datos de una variable dependiente de su ubicación geográfica, calcula los errores entre el valor inicial del set de datos con el estimado para la misma ubicación por el método de predicción espacial seleccionado. (Error = Valor estimado – Valor original).

Con el set inicial y el algoritmo de predicción elegido, el método calcula el error de los N datos removiendo el primer dato del set y usando los restantes para calcular el nuevo valor (estimado) en la ubicación donde fue removido el primer dato. Luego, el primer dato removido es puesto de vuelta en su ubicación inicial y el siguiente es removido, utilizando los datos restantes (incluyendo el primero que antes había sido removido) calcula el estimado para la actual ubicación de donde se removió el segundo dato. El segundo dato es puesto de vuelta al set inicial y el tercero es removido para volver a realizar el mismo procedimiento anterior para los N datos.

La cantidad de datos utilizados para el proceso de validación cruzada fue de un 10% del total de datos brutos, debido a que el dominio batimétrico es muy amplio y con zonas de superficie significativa carente de información. El detalle se presenta a continuación en la Tabla 10.

**Tabla 10: Cantidad de datos utilizados**

Sector	N° datos brutos	N° datos utilizados
Región de Aysén	23578	2357

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 5.3.8 INDICADORES DE ERROR

Una vez realizado el proceso de validación cruzada se determinaron los estadísticos MAE, RMSE, ERM, Desviación Estándar y el coeficiente de correlación  $R^2$  entre los datos reales ( $R$ ) y estimados ( $E$ ), siendo  $N$  el número total de comparaciones. Además, se realizó un análisis de correlación lineal entre los valores reales y estimados, detalle en la tabla 11.

#### ERROR RELATIVO MEDIO (ERM)

$$ERM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{E_i - R_i}{R_i}$$

Mejor ajuste cuando es cercano a 0

#### ERROR ABSOLUTO MEDIO (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |E_i - R_i|$$

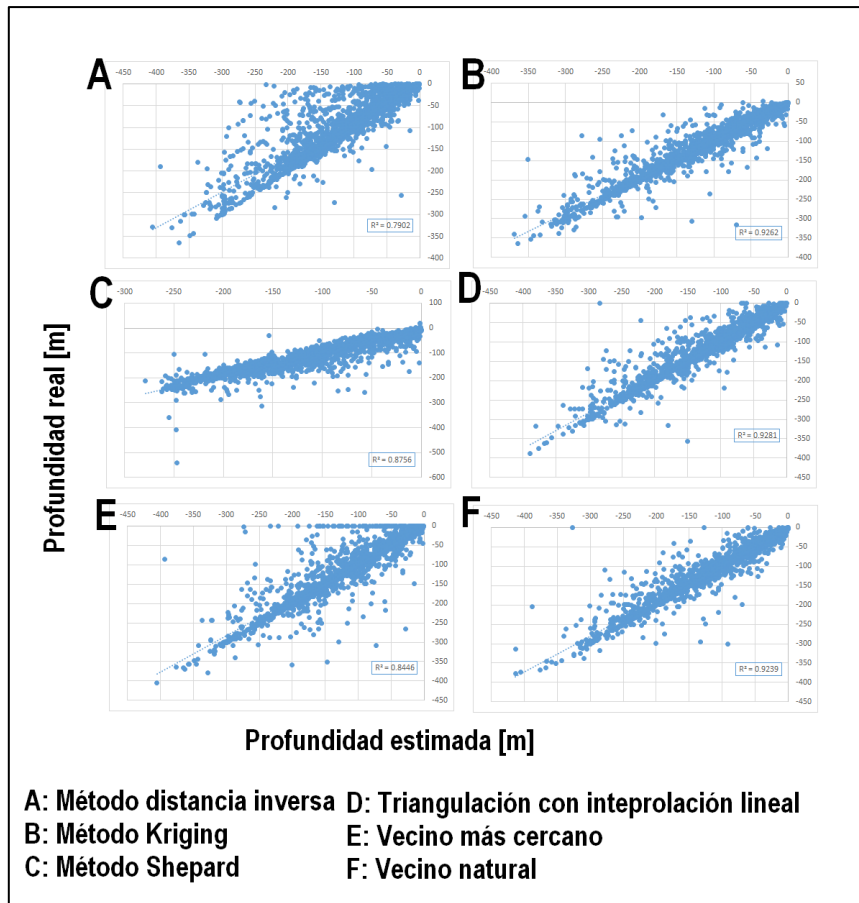
Mejor ajuste cuando es cercano a 0.

#### RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - R_i)^2}$$

Mejor ajuste cuando es cercano a 0.

**Figura 13: Análisis de correlación lineal entre métodos interpoladores**



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

**Tabla 11: Resumen estadístico métodos de interpolación**

Resumen estadístico para cada método interpolador					
Método	Estadístico				
	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	Des. Estándar	Error Relativo Medio
Distancia Inversa Ponderada	39,001	15,538	0,79	35,328	13,04%
Kriging	21,034	2,955	0,926	20,829	4,24%
Shepard	40,345	15,642	0,875	37,099	23,36%
Triangulación con interpolación lineal	20,978	3,803	0,927	20,634	1,38%
Vecino más cercano	31,717	5,188	0,844	31,297	2,98%
Vecino natural	20,722	3,596	0,923	20,463	3,13%

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

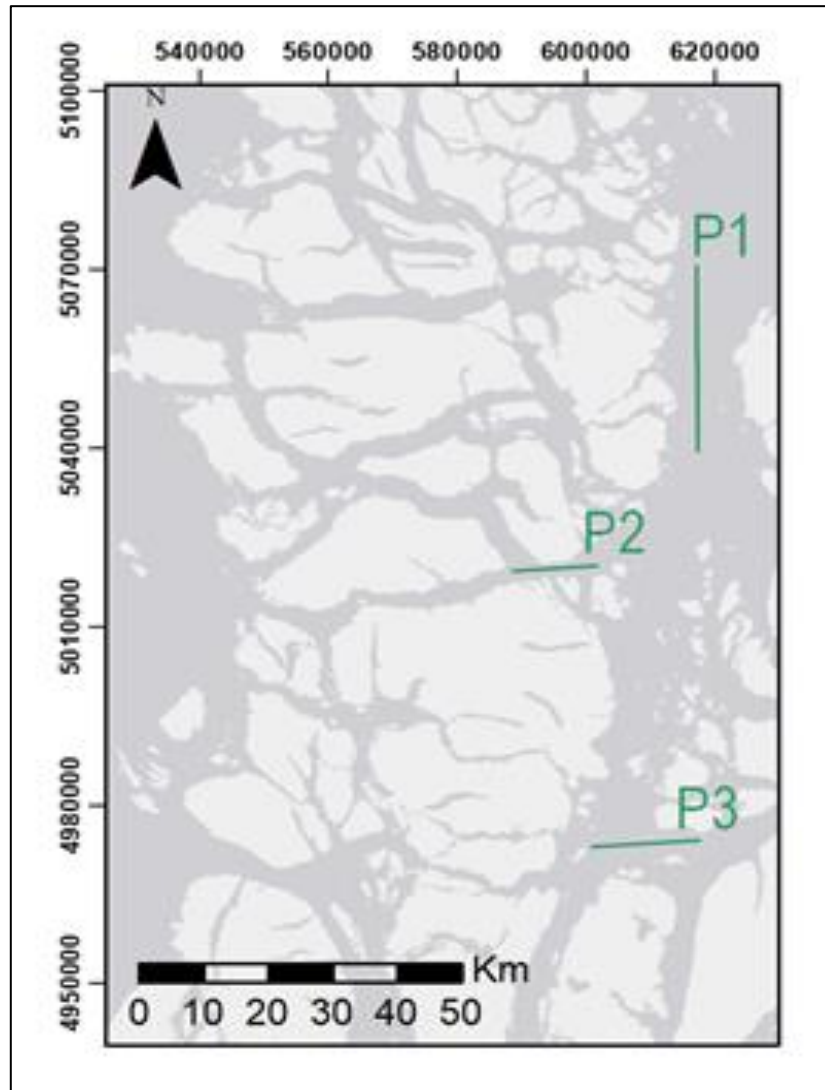
### 5.3.9 ANÁLISIS DE PERFILES BATIMÉTRICOS

Para evaluar la morfología del fondo marino, además del análisis estadístico, se desarrolló tres perfiles batimétricos con objeto de observar el comportamiento de cada método en su predicción de la profundidad. Para ello, se consideró el trazado de tres perfiles en áreas donde el método disponía de información para la grilla. El perfil 1 (P1) presenta una longitud horizontal de 32 [km], perfil 2 (P2), presenta una longitud de 11 [km] y perfil 3 (P3), una longitud de 13[km]. En los perfiles es posible comparar características como las irregularidades del fondo y la morfología pudiendo analizar cuales métodos cumplen con las características morfológicas esperadas para el área de estudio.

En la Figura 14 se esquematiza posición de los perfiles (líneas verdes) realizados y posteriormente la comparación de los seis métodos en cada perfil. Finalmente, al comparar los diversos parámetros analizados, tanto parámetros estadísticos y parámetros visuales el método seleccionado fue el de Kriging Ordinario debido a que presenta las mejores prestaciones a la hora de representar la batimetría del área analizada.

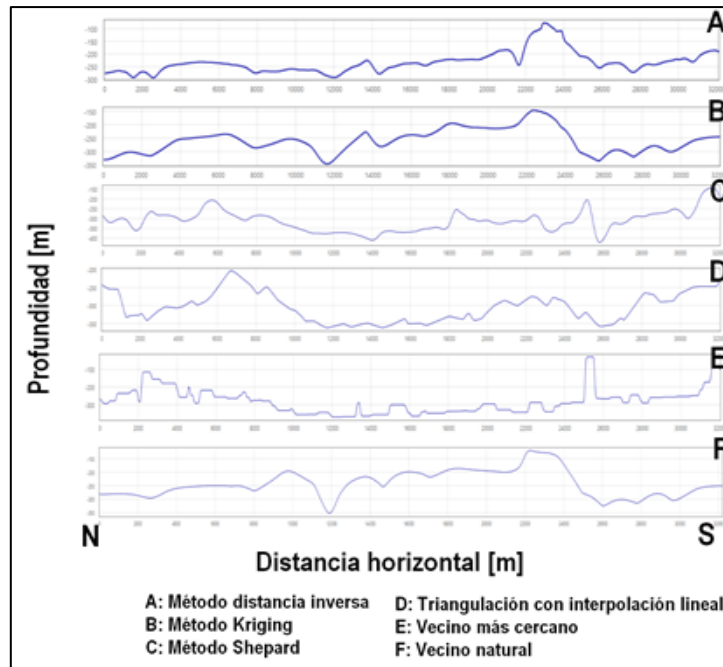


Figura 14: Ubicación de los perfiles batimétricos.



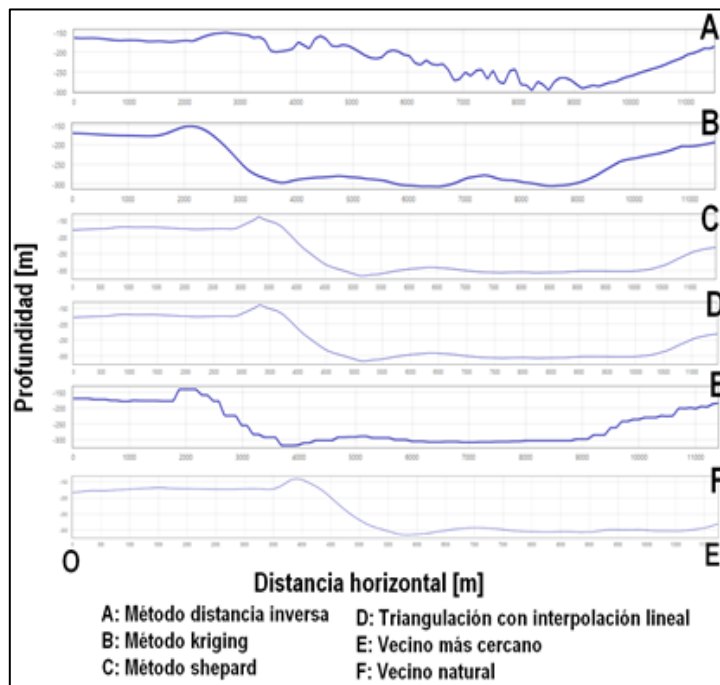
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 15: Comparación de métodos de interpolación para perfil 1



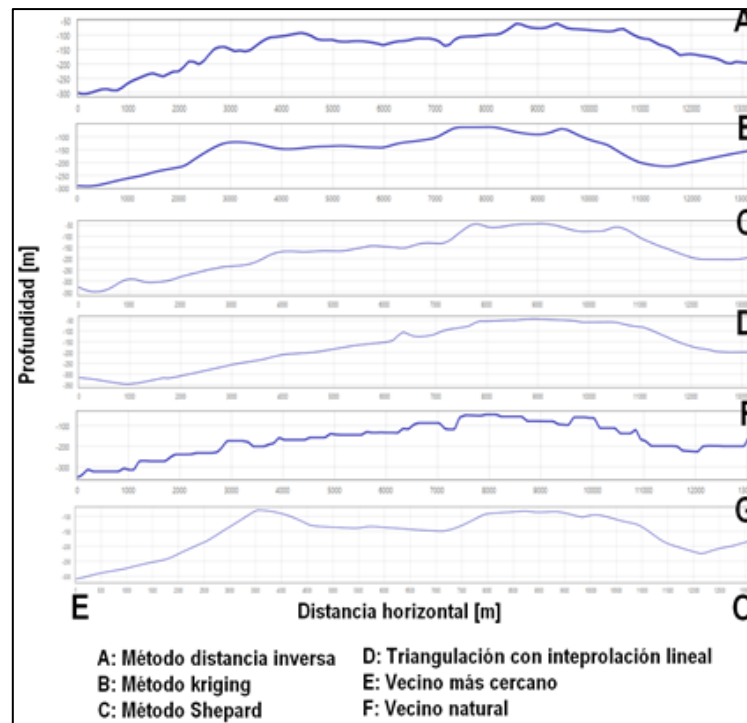
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 16: Comparación de métodos de interpolación para perfil 2



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 17: Comparación de métodos de interpolación para perfil 3



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 5.4 OBJETIVO ESPECÍFICO N°4: EFECTUAR UN LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO MULTHAZ IN SITU

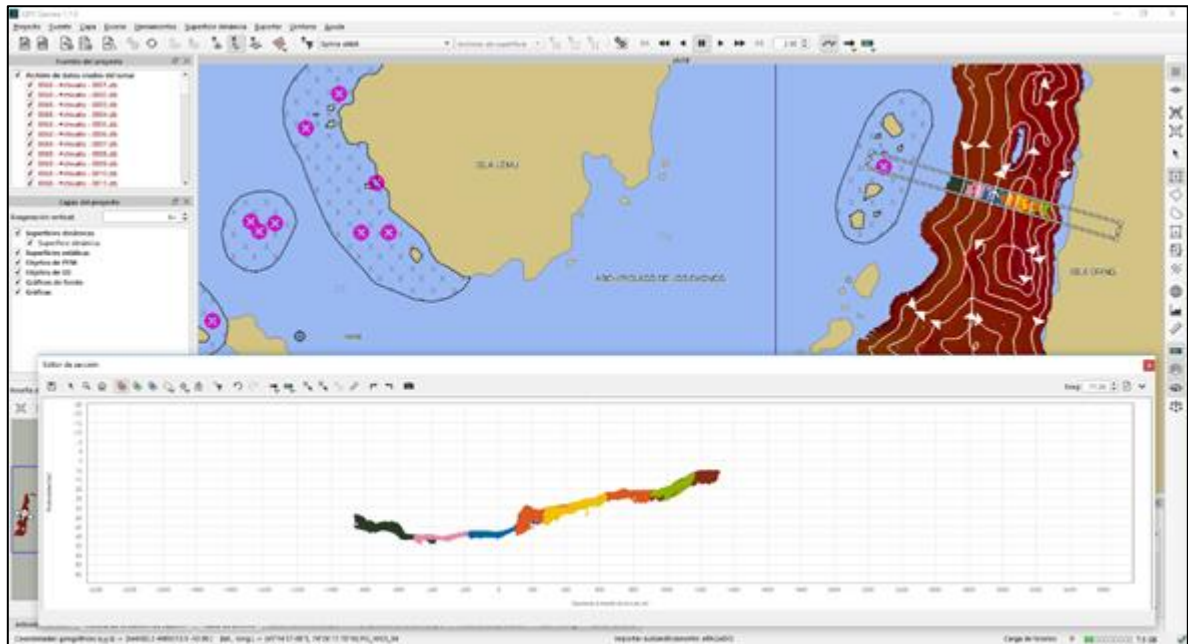
### 5.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS TRABAJOS DE SONDAJE

El levantamiento batimétrico se realizó con un traslape de 50%, con el objetivo de eliminar cualquier ambigüedad en las sondas encontrada. Para controlar la dirección de la navegación, distancia entre corridas y cobertura en el área de sondaje, se utilizó el software Qinsy, en dicho software se cargó la línea de costa del área de interés y luego con el sistema de apoyo de posicionamiento RTK, se procedió a navegar hasta obtener la cobertura requerida para el levantamiento hasta el veril de los 120 [m] de acuerdo a lo definido en conjunto con el mandante.

Los datos de velocidad del sonido y del nivel del mar fueron medidos en terreno al momento de efectuar la batimetría, de esta forma, todos los datos fueron corregidos en la etapa de post proceso. Durante la etapa de post proceso se cargó la información adquirida en el software Qimera (Figura 19), software especializado en proceso de datos hidrográficos, en este se integró los valores de Patch Test, velocidad del sonido y mareas, para posteriormente generar una superficie dinámica con un espaciamiento de 10 m. Los datos fueron procesados manualmente, es decir no se utilizó filtros automáticos, ya que de esta forma se discriminó la dispersión de los datos de manera más detallada y

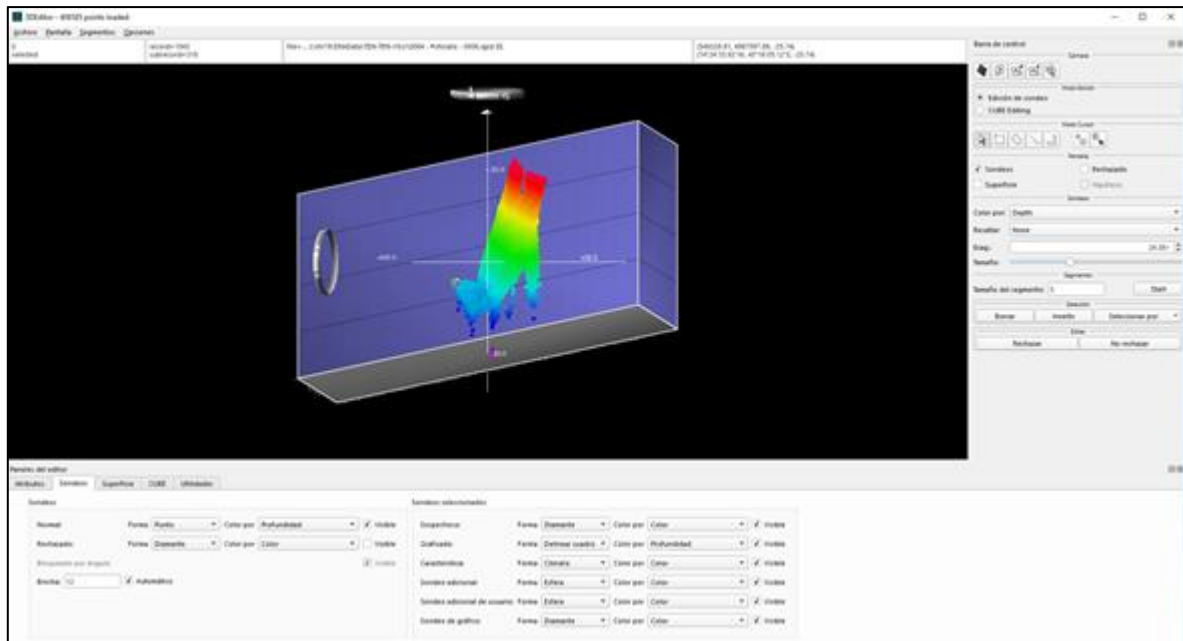
precisa. Una vez finalizada esta etapa de procesamiento en el software Qimera se obtuvieron grillas batimétricas con un espaciamiento de 10 m de las áreas prospectadas.

Figura 18: interfaz de trabajo Qimera.



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 19: interfaz 3D de trabajo Qimera.

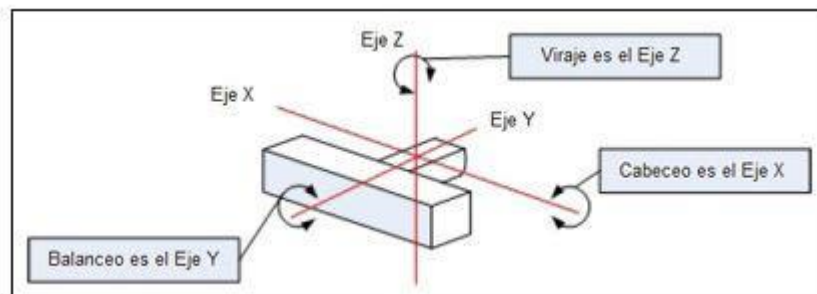


Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 5.4.2 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA MULTIHAZ

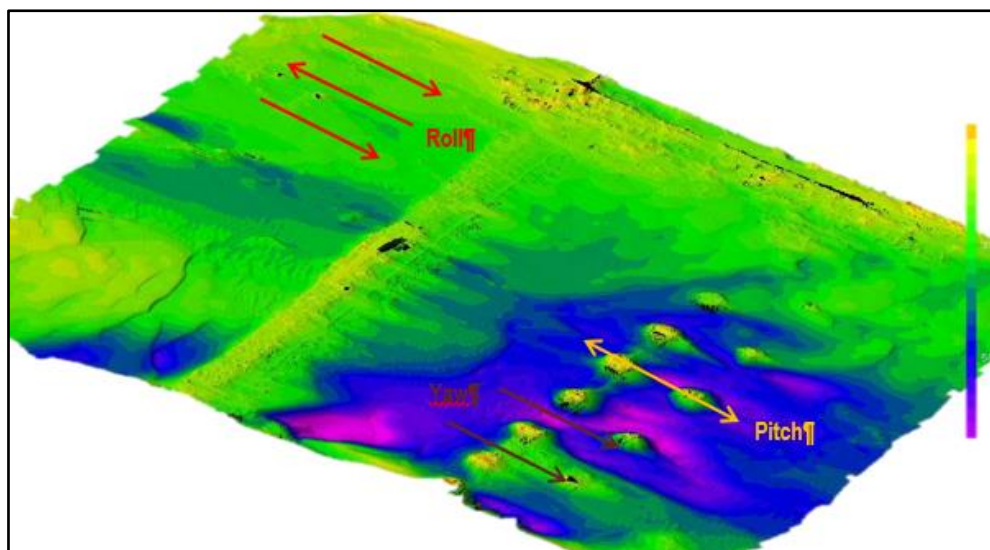
Para la corrección de la lectura de profundidades en función de los movimientos de la embarcación (Figura 20) y la disposición de los componentes del sistema multihaz en la misma, se realizaron las pruebas de calibración estándar definidas por el fabricante y especificadas en el software de sondaje en un área idónea (ver Figura 21). Las pruebas para obtener parámetros de calibración se denominan *Patch Test*, estas sirven para generar parámetros de corrección en función de los movimientos angulares de la nave en torno de los ejes principales de rotación definidos en el sistema de navegación inercial.

Figura 20: Principales movimientos angulares de la embarcación



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 21: Selección de áreas para pruebas de parche (Patch Test)



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Durante las distintas etapas de adquisición de datos se realizaron varios *Patch Test* (cada uno en el momento previo a una nueva etapa de adquisición batimétrica), dichos valores se ingresaron en la etapa de post proceso. La fecha de calibración y los valores obtenidos para cada uno de dichos *offsets* se presenta en la tabla 12.

Tabla 12: Valores resultantes del Patch Test

Fecha	Balanceo		Cabeceo	Rumbo
	H1	H2		
12-12-2018	0.402	0	-0.802	3.674
14-03-2019	0	-0.3	-4.996	1.2
02-05-2018	0	-0.357	-1.653	-0.406
16-06-2018	-0.406	0	-1.963	-1.2
03-07-2019	-1.57	0	1.35	1.554

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 5.4.3 LEVANTAMIENTO DE DATOS DE BACKSCATTER

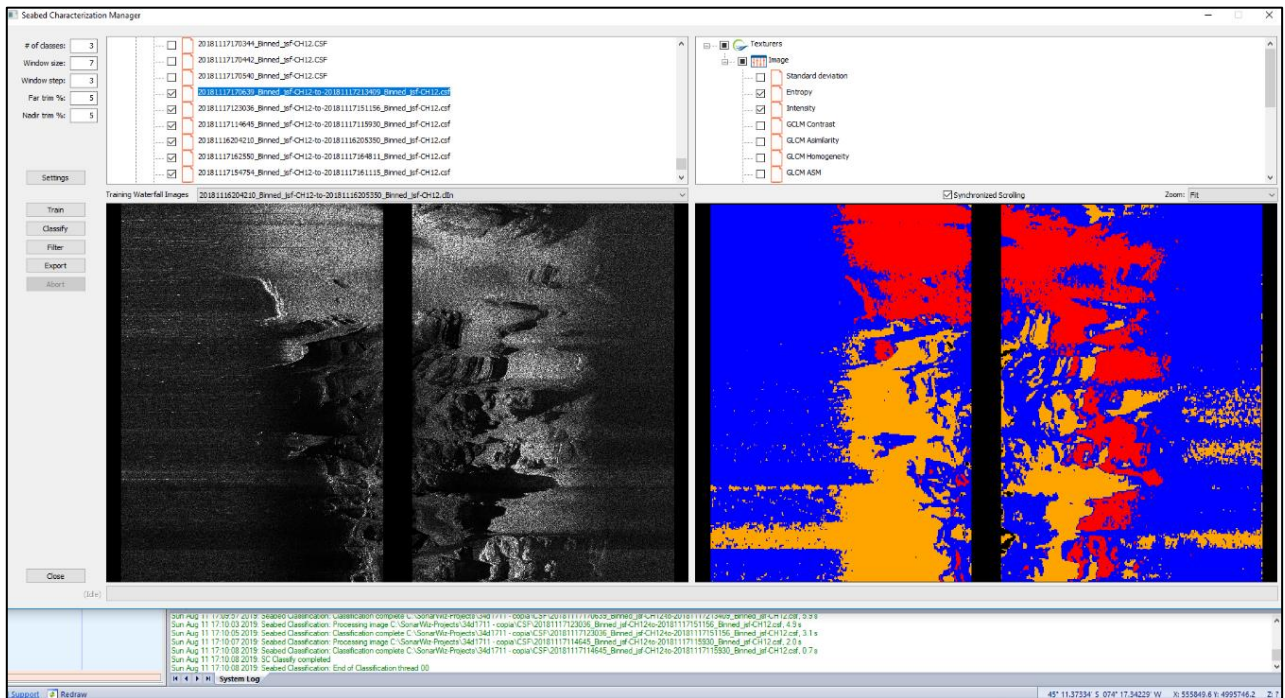
La retrodispersión (Backscatter) es un proceso físico en el cual producto de diversos factores como, la morfología local, rugosidad del fondo y propiedades del material las ondas emitidas se reflejan de regreso en dirección de donde fueron emitidas (transductor). Analizando la amplitud de la onda sonora que regresa es posible obtener información de la estructura del fondo marino en estudio. Una fuerte reflexión o señal de retorno indica una mayor densidad del sedimento, lo que implica mayor reflectividad, como es el caso de sedimentos gruesos (roca o grava), en cambio, una menor densidad, implica una menor reflectividad, sedimento fino, por ejemplo; limo.



El levantamiento de datos de backscatter para este estudio tiene por objetivo el reconocimiento de la superficie del fondo marino, la tecnología del sistema multihaz Edgetech 6205 permite la adquisición de información submarina en simultaneo a la información de profundidad. El objeto es complementar la información batimétrica con un registro de datos que permita una integración de la geomorfología preliminar del fondo marino en los sitios de estudio.

El software Sonarwiz7 dispone de un módulo de clasificación del fondo marino, el cual es un algoritmo que mediante una ventana cuadrada de prueba clasifica los pixeles (construidos en base a la amplitud) en dicha ventana midiendo la textura de dicho pixel y agrupándolos en clases poligonales de similar textura como se muestra en la Figura 22.

Figura 22: modulo software Sonarwiz de clasificación de fondo marino



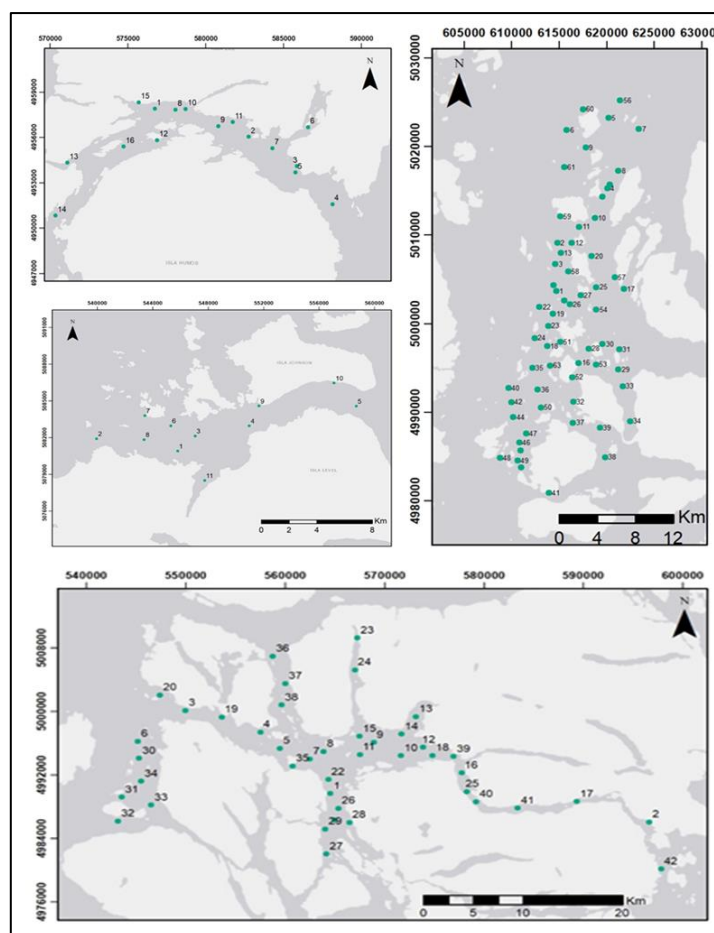
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 5.5 OBJETIVO ESPECÍFICO N°5: DESARROLLAR ESTUDIOS Y MEDICIONES HIDROGRÁFICAS Y GEODÉSICAS IN SITU PARA COMPATIBILIDAD DEL LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO

### 5.5.1 MEDICIONES DE VELOCIDAD DEL SONIDO Y CTD

Durante las campañas de prospección batimétrica fueron realizadas diversas mediciones de velocidad del sonido, presión, salinidad y temperatura en la columna de agua. Estas fueron realizadas a lo largo de toda el área estudiada con el fin de caracterizar el cambio de dicha variable a lo largo de los canales y, a la vez intentado mantener una malla de muestreo densa. El registro de datos se realizó hasta la profundidad máxima de sondaje siempre que las condiciones meteorológicas y de seguridad lo permitieran. La Figura 23 esquematiza la ubicación de cada estación de muestreo.

Figura 23: Ubicación zonas de muestreo perfiles velocidad del sonido.



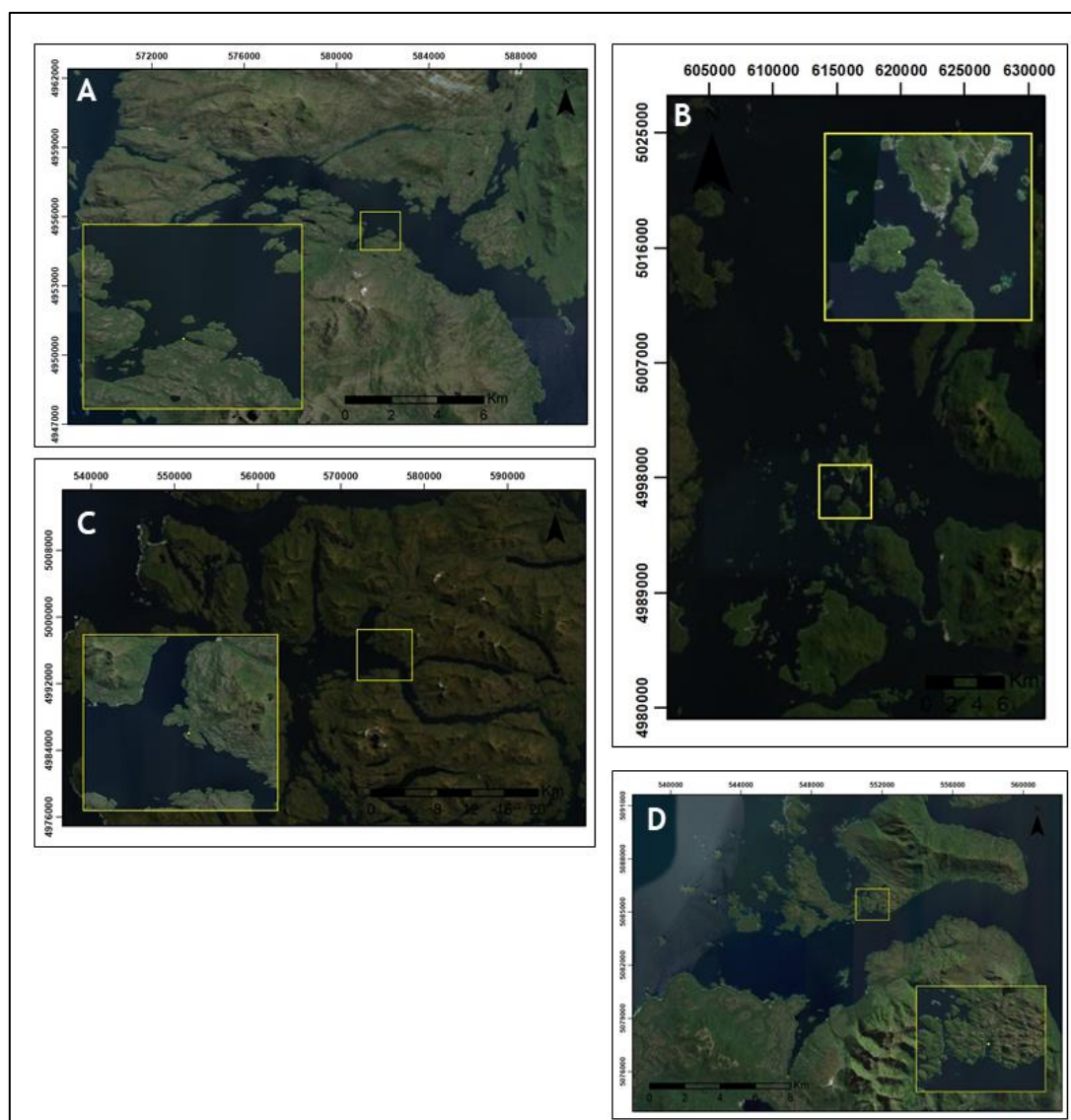
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.



## 5.5.2 MEDICIÓN DEL NIVEL DEL MAR

Para la obtención del plano vertical de referencia se determinó el nivel de reducción de sondas (NRS) y los planos mareales, para esto se instaló un sensor de presión por zona de prospección, estas mediciones se realizaron durante los periodos en que se adquirieron los datos batimétricos. El muestreo se realizó cada cinco minutos por un periodo de treinta días y, además, se materializaron cotas de marea para cada canal. La Figura 24 presenta la ubicación de dichos sensores (polígonos en amarillo), la Tabla 13 sus respectivas coordenadas y Tabla 14 las coordenadas de las cotas de marea.

Figura 24: Ubicación sensores de presión. A: Canal Vicuña, B: Canal Moraleda y Ferronave, C: Canal Carrera del Chivato, D: Canal Simpson



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

**Tabla 13: Coordenadas sensores de presión para las cuatro zonas estudiadas.**

Zona	Nombre zona	Coordenadas UTM [m]	
		Norte	Este
A	Canal Vicuña	4955207.88	581791.63
B	Canal Moraleda y Ferronave	4996777.07	615152.64
C	Canal Carrera del Chivato	4996499.99	574124.11
D	Canal Simpson	5085380.61	551712.17

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

**Tabla 14: Coordenadas cotas de marea para cada zona estudiada.**

Zona	Nombre zona	N° Cota fija	Coordenadas UTM [m]	
			Norte	Este
A	Canal Vicuña	1	4955242.36	581858.41
		2	4955231.68	581862.39
B	Canal Moraleda Y Ferronave	1	4996786.71	615145.1
		2	4996773.81	615141.1
C	Canal Carrera del Chivato	1	4996369.28	574162.3
		2	4996397.44	574160.22
D	Canal Simpson	1	5085496.5	551747.21

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Una vez extraídos los datos del sensor, estos fueron sometidos a un análisis armónico y no armónico, el primero, por medio de la rutina `t_tide` de matlab permite obtener los principales constituyentes armónicos de la onda de marea y de esta forma, representar la curva de marea lo más cercana a las variaciones reales obtenidas del nivel del mar. Con dichas constituyentes, el promedio de la serie del nivel registrada y mediante el método propuesto por SHOA, es posible obtener el NRS.

$$NRS = Z_0 - (H_{M2} + H_{S2} + H_{N2} + H_{K1} + H_{O1})$$

Donde:

$Z_0$ : Nivel medio del mar [m]

$H_{M2}$ : Amplitud constituyente lunar principal semidiurna.

$H_{S2}$ : Amplitud constituyente solar principal semidiurna.

$H_{N2}$ : Amplitud constituyente lunar eclíptica mayor semidiurna.

$H_{K1}$ : Amplitud constituyente lunisolar declinación diurna.

$H_{O1}$ : Amplitud constituyente lunar declinación diurna.

## Régimen de marea

Este coeficiente permite determinar el carácter de la marea en función de la importancia de los constituyentes armónicos significativos, se obtiene a través del coeficiente de Courtier (K).

$$K = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

Por otra parte, el análisis no armónico de la marea corresponde a un conjunto de valores que permiten describir el comportamiento de la marea en una cierta localidad. Este análisis es un estadístico de los promedios y diferencias del nivel del mar. Con dicho análisis es posible obtener los distintos niveles que puede alcanzar el nivel del mar para un cierto intervalo de tiempo y de esta forma poder referenciar las sondas.

## 5.6 OBJETIVO ESPECÍFICO N°6: GENERACIÓN DEL MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO

Una vez procesados los datos producto del levantamiento, estos fueron exportados en formato “\*xyz”, utilizando el software Matlab (debido a la gran densidad de datos) se integró toda la data en un sólo archivo \*xyz (datos levantados y datos provenientes de cartas SHOA). Este nuevo archivo fue importado en el software “Surfer 16” para así generar una grilla batimétrica de 50x50 [m] utilizando el método interpolador de Kriging Ordinario (método seleccionado en la etapa de información preliminar debido que presento buen ajuste), abarcando la totalidad del área solicitada por el mandante. Todos los datos utilizados y generados fueron presentados utilizando el datum WGS-84 y proyección UTM zona 18s.

Se utilizó la línea de costa proporcionada por SUBPESCA (en formato \*shp) para definir los límites laterales de las zonas terrestres (no fue utilizada como referencia 0 [m] en la vertical), y como referencia vertical el NRS obtenido a partir de los estudios de marea realizados previamente.

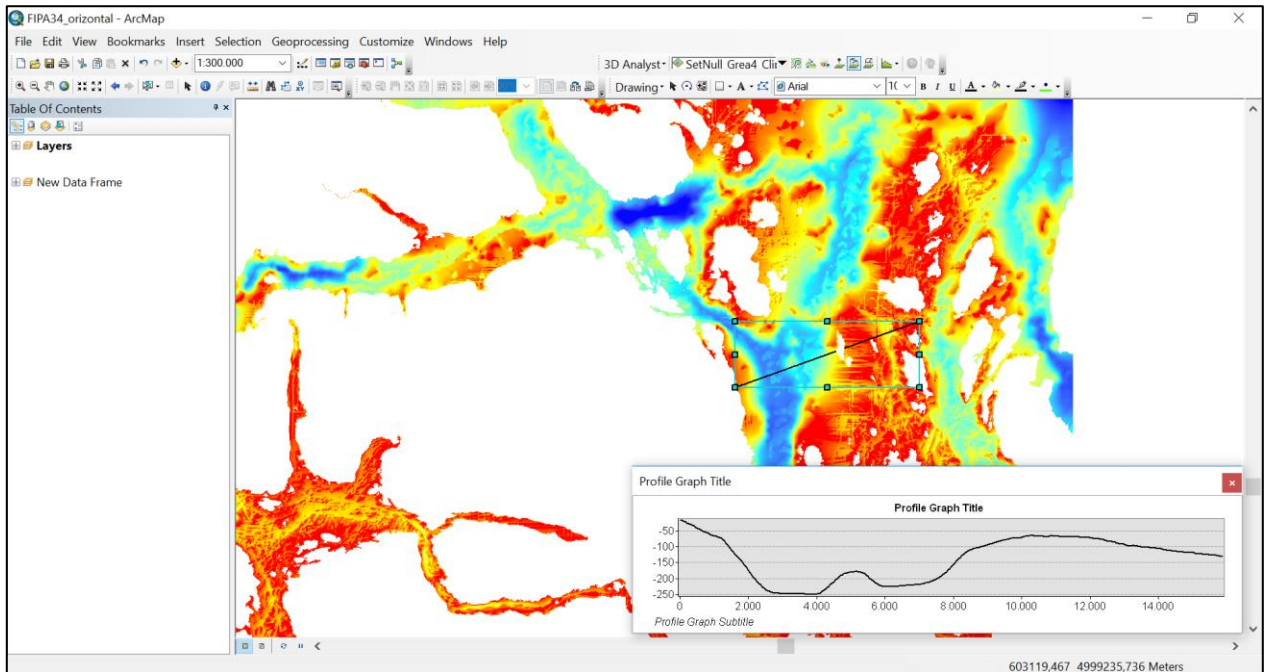
Posteriormente con la utilización del software Matlab se corrigieron los valores erróneos forzados por el método interpolador (aquellos donde no se disponía de información de sondas), obteniendo así una grilla final para el modelo batimétrico mejorado.

Finalmente, los datos fueron exportados al software Arcgis donde se creó mapas batimétricos y se generaron perfiles con el fin de comparar el modelo batimétrico mejorado con el modelo previo.

Por otra parte, en conjunto a la elaboración de un modelo batimétrico mejorado para toda el área de estudio, se generaron modelos en detalle de cada una de las cuatro canales en los que fueron levantados datos por el equipo de Geociencias (Canal Carrera del Chivato, Canal Simpson, Canal Vicuña y Canal Moraleta y Ferronave), utilizando solo

los datos adquiridos en terreno. Estos permitieron observar en detalle (utilizando una grilla de 10x10 m) el área cubierta en terreno.

Figura 25: Interfaz software ArcGIS, generación de perfiles batimétricos.



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

---

## 6 RESULTADOS

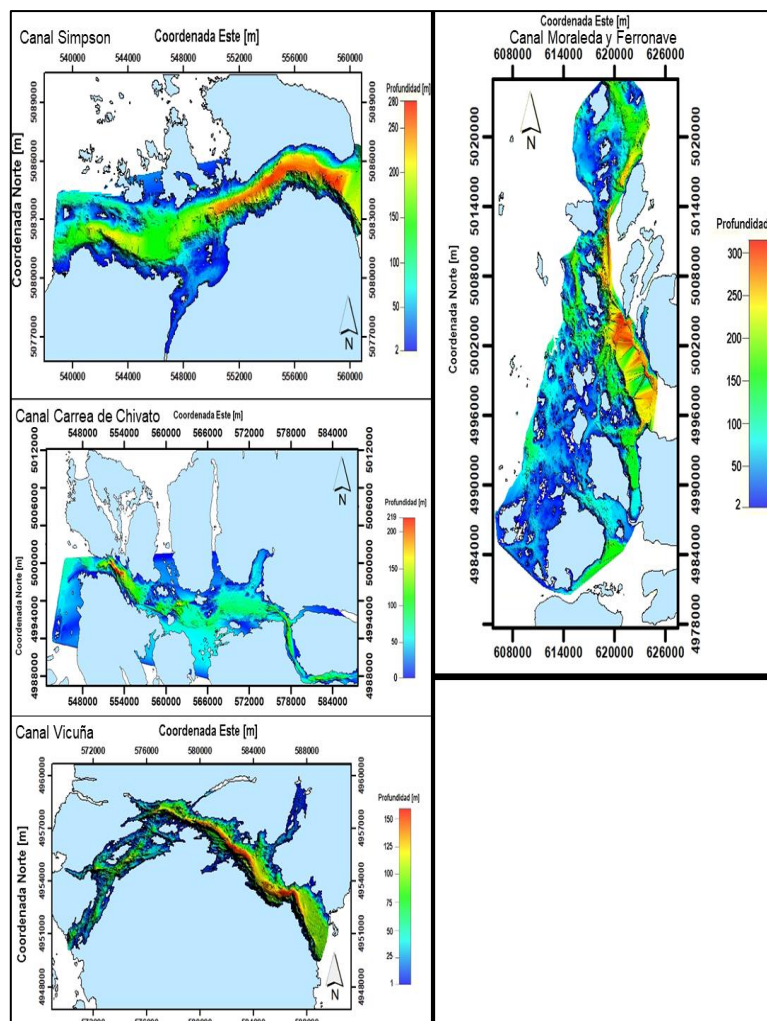
### 6.1 LEVANTAMIENTO BATIMÉTRICO IN SITU

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a partir de la adquisición de datos batimétricos, post proceso de esta e integración con la data batimétrica del modelo preliminar.

#### 6.1.1 COBERTURA DE INFORMACIÓN BATIMÉTRICA IN SITU

De la zonificación del área de estudio y de acuerdo a lo acordado con SUBPESCA, se realizó un levantamiento dividido en etapas, la primera de abril a junio del 2018, la segunda de octubre a noviembre del año 2018, la tercera en marzo del año 2019 (90 % del área total a levantar), y la última, entre junio y julio del mismo año. El resultado de dicho levantamiento arrojó como profundidades máximas para el Canal Simpson de 290 [m], Canal Moraleda de 194 [m], Carrera del Chivato de 210 [m] y Canal Vicuña de 158 [m], en la Figura 26 se presentan los planos batimétricos georreferenciados para cada sector.

Figura 26: Mapas batimétricos resultantes del levantamiento hidrográfico en cada uno de los canales.



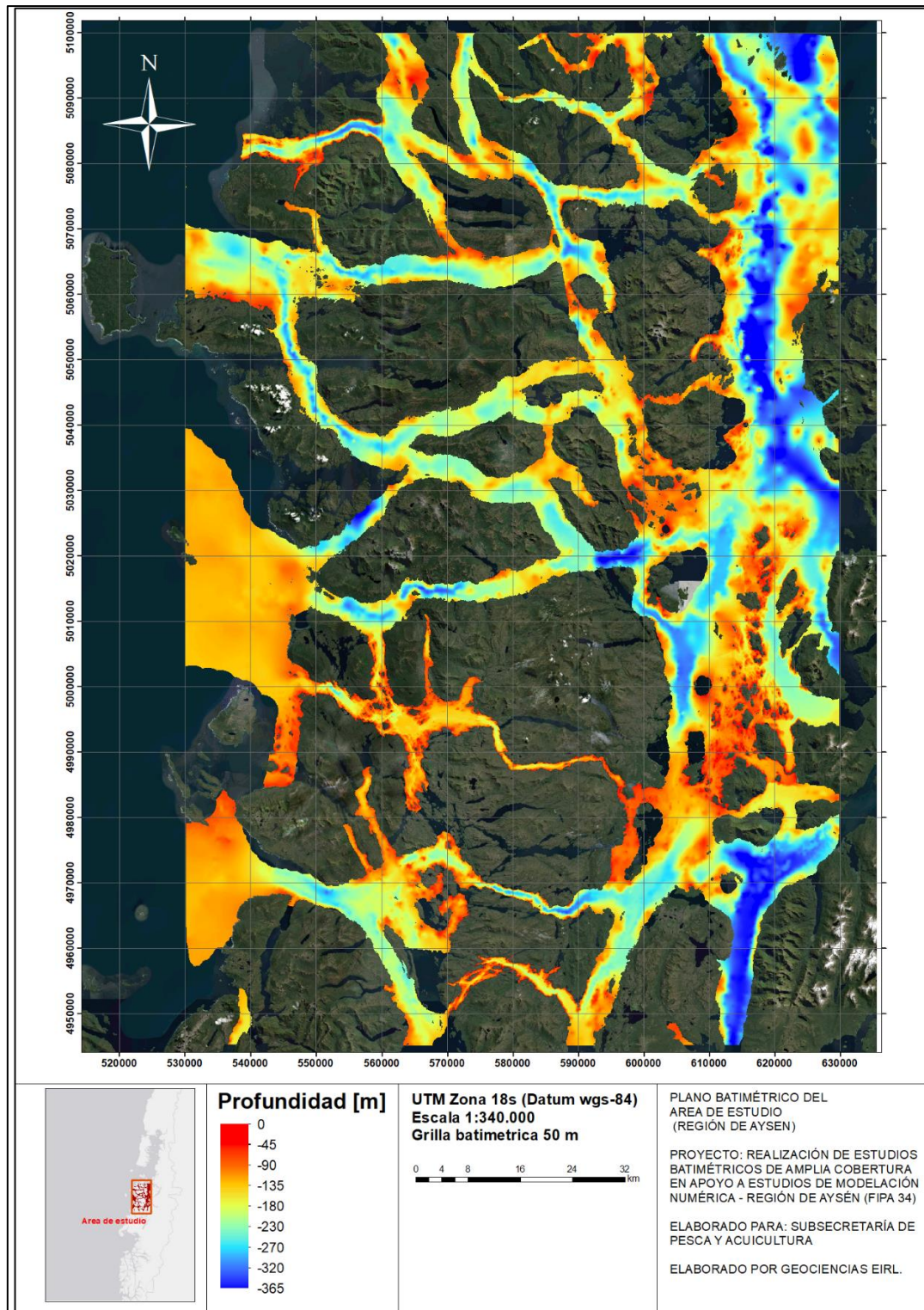
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 6.1.2 MODELO BATIMÉTRICO MEJORADO

Los resultados del modelo batimétrico mejorado se muestran en la Figura 27. Este modelo fue generado a partir de la integración de los datos obtenidos en las campañas de prospección batimétrica realizados por el equipo de Geociencias y datos de cartas batimétricas pertenecientes y proporcionadas por Subpesca. Una vez adquiridos y procesados se creó una grilla batimétrica de 50x50 [m] mediante el método de Kriging Ordinario con variograma lineal (método que en la etapa previa arroja los mejores resultados en base a estadísticas y perfiles batimétricos).



Figura 27: Plano batimétrico del área de estudio



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Una vez generada la grilla batimétrica se realizó un análisis de validación cruzada de un subconjunto de datos y de correlación lineal con el fin de cuantificar el comportamiento de dicho método predictivo en la creación de la grilla, de dichos resultados (Tabla 15), se aprecia que el método utilizado fue preciso en su predicción, coincidente con la etapa previa de análisis de información disponible.

**Tabla 15: Validación cruzada**

Estadístico	Valor
RMSE	1,077
MAE	0,585
Error relativo medio	0,279
Desviación estandar	1,076
R <sup>2</sup>	0,998

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

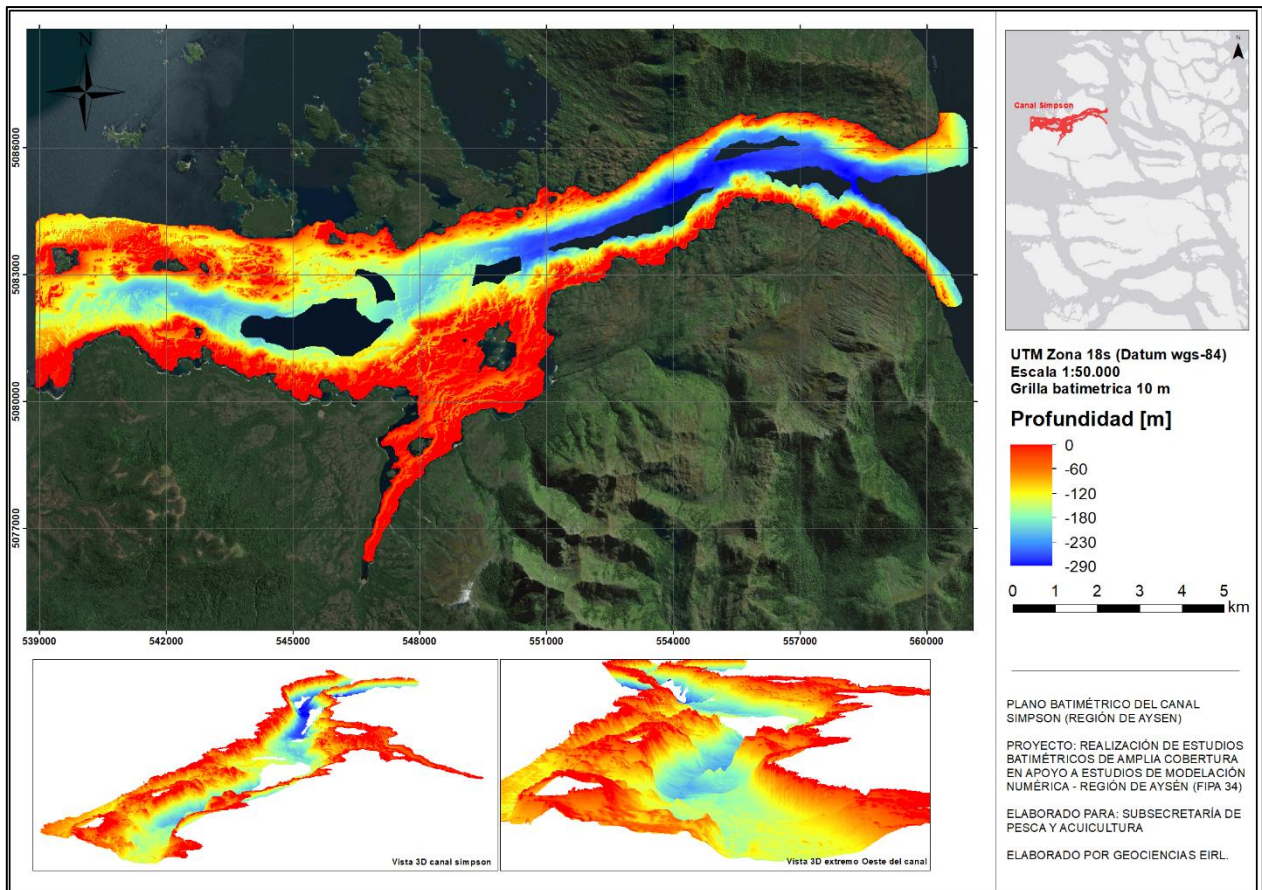
Por otra parte, en el plano batimétrico general (Figura 27) es posible observar profundidades que varían desde los 0 a los 350 [m] de profundidad. La batimetría es presentada en escala de colores (0 a 350 [m]), la parte terrestre sólo debe tomarse como referencia, debido a posibles desfases entre la imagen satelital y la línea de costa entregada por el mandate. Las áreas de mayor profundidad, representadas en color azul oscuro, se encuentran a lo largo de la parte central del canal Moraleda, este del Canal Simpson y en las secciones terminales de los fiordos y canales continentales.

Con el fin de presentar y analizar de mejor manera los datos obtenidos a partir de la adquisición de datos por parte del equipo de Geociencias, fueron generadas grillas batimétricas de 10 x 10 [m] para cada uno de los canales designados dentro de la zonificación del área de estudio (Figura 28 a Figura 31). Cabe destacar, que a diferencia del modelo batimétrico mejorado estos modelos presentan espacios sin datos, por ejemplo, en la zona central donde se excede el veril de los 120 [m], esto es debido a que estos modelos se remiten exclusivamente a las áreas donde se levantó datos.

El modelo batimétrico mejorado general presenta mayor continuidad en su superficie en comparación con los modelos por zona, esto es debido a las diferencias en la resolución entre ellos (50 x 50 [m] vs 10 x 10 [m]). Además, cabe considerar que no fueron removidas las áreas que fueron eliminadas en los modelos por zonas, esto es debido a que dichas áreas sin información presentan menor tamaño que el espaciamiento observado entre sondas pertenecientes a los datos de entrada de las cartas náuticas proporcionadas por el mandante.



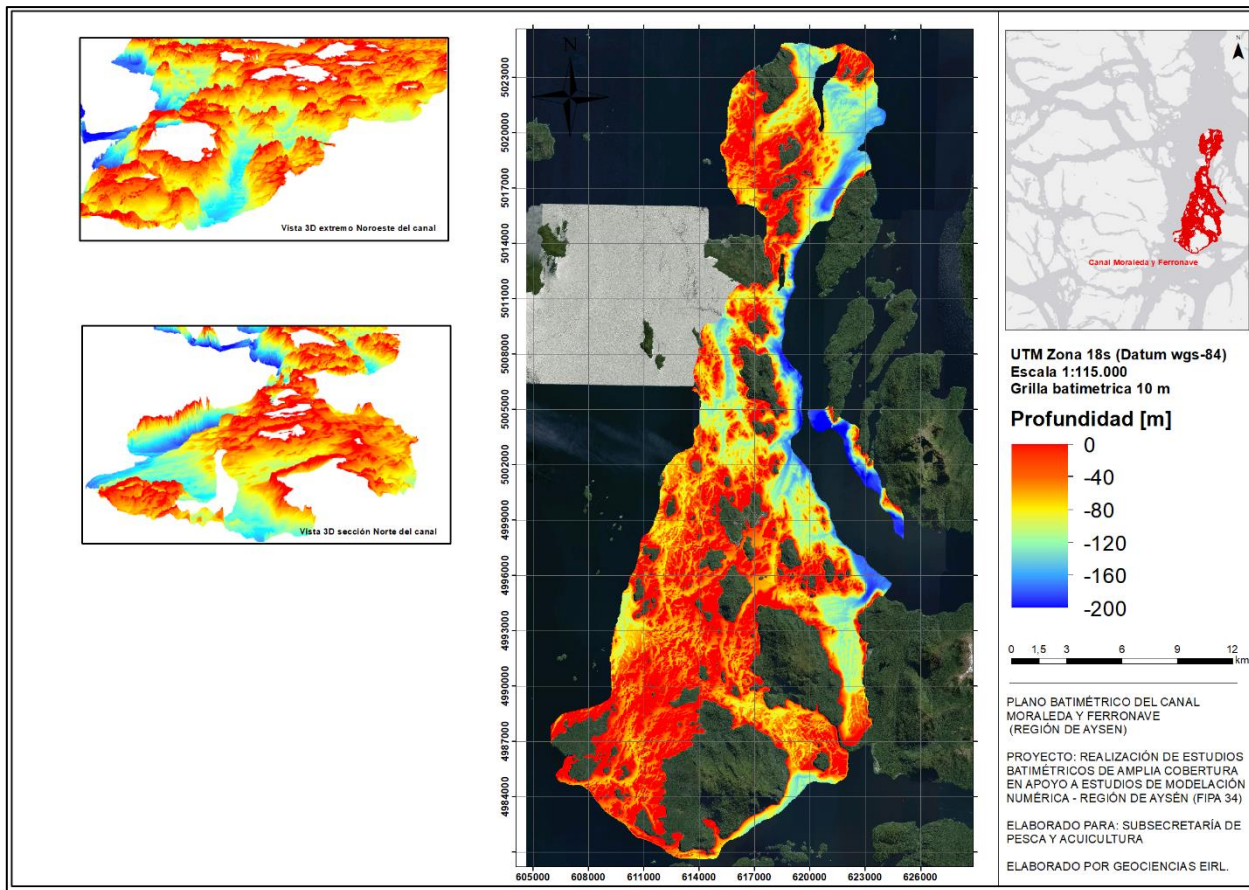
Figura 28: Plano batimétrico Canal Simpson



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

En el área del canal Simpson (Figura 28) las profundidades alcanzan profundidades máximas de 290 metros aproximadamente en su extremo Este (recuadro B). A lo largo del canal no se observan cambios de pendientes abruptos y en su extremo Oeste se observan depósitos con morfologías irregulares.

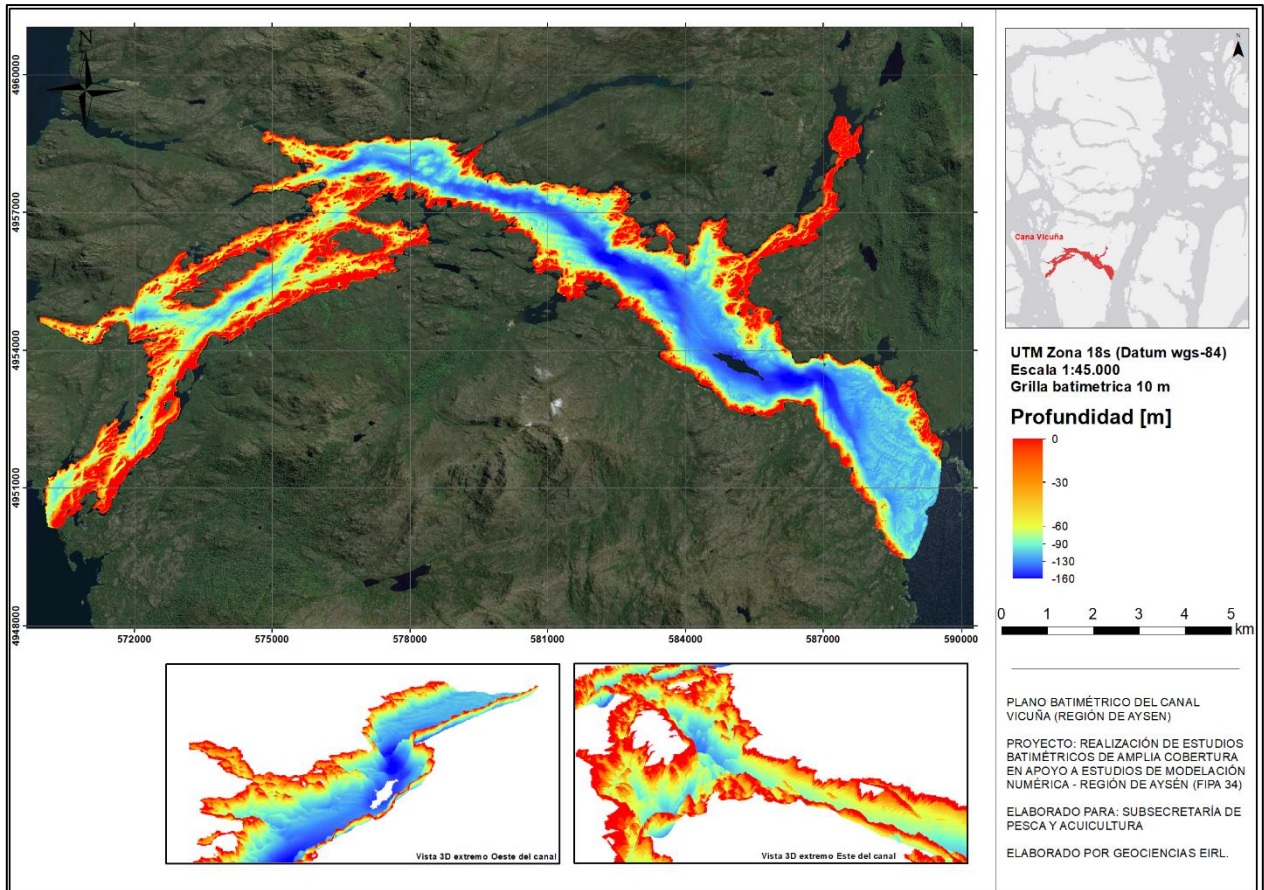
Figura 29: Plano batimétrico Canal Moraleda y Ferronave



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

El área analizada del canal Moraleda y Ferronave (Figura 29) presenta una dirección principal en sentido Norte-Sur aproximadamente, alcanzando sus profundidades máximas de cercanas a los 180 metros (recuadro B). Las mayores profundidades coinciden con la boca de los fiordos ubicados en esta zona.

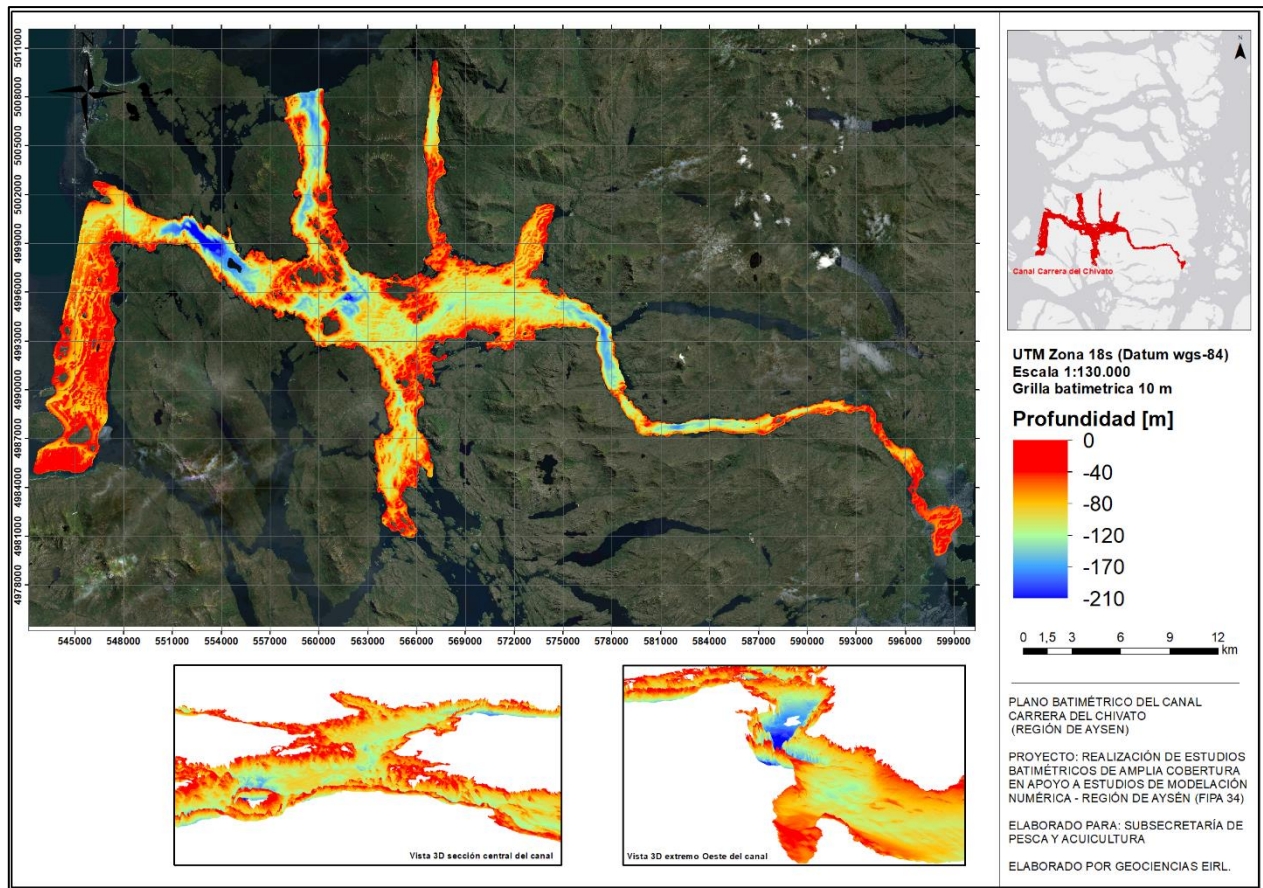
Figura 30: Plano batimétrico Canal Vicuña



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

El canal Vicuña (Figura 30) exhibe dos direcciones principales, SW-NE y NW-SE, sus profundidades máximas alcanzan los 160 metros (recuadro A). Su extremo Oeste muestra menores profundidades y mayor sinuosidad en el canal.



**Figura 31: Plano batimétrico Canal Carrera del Chivato**


Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

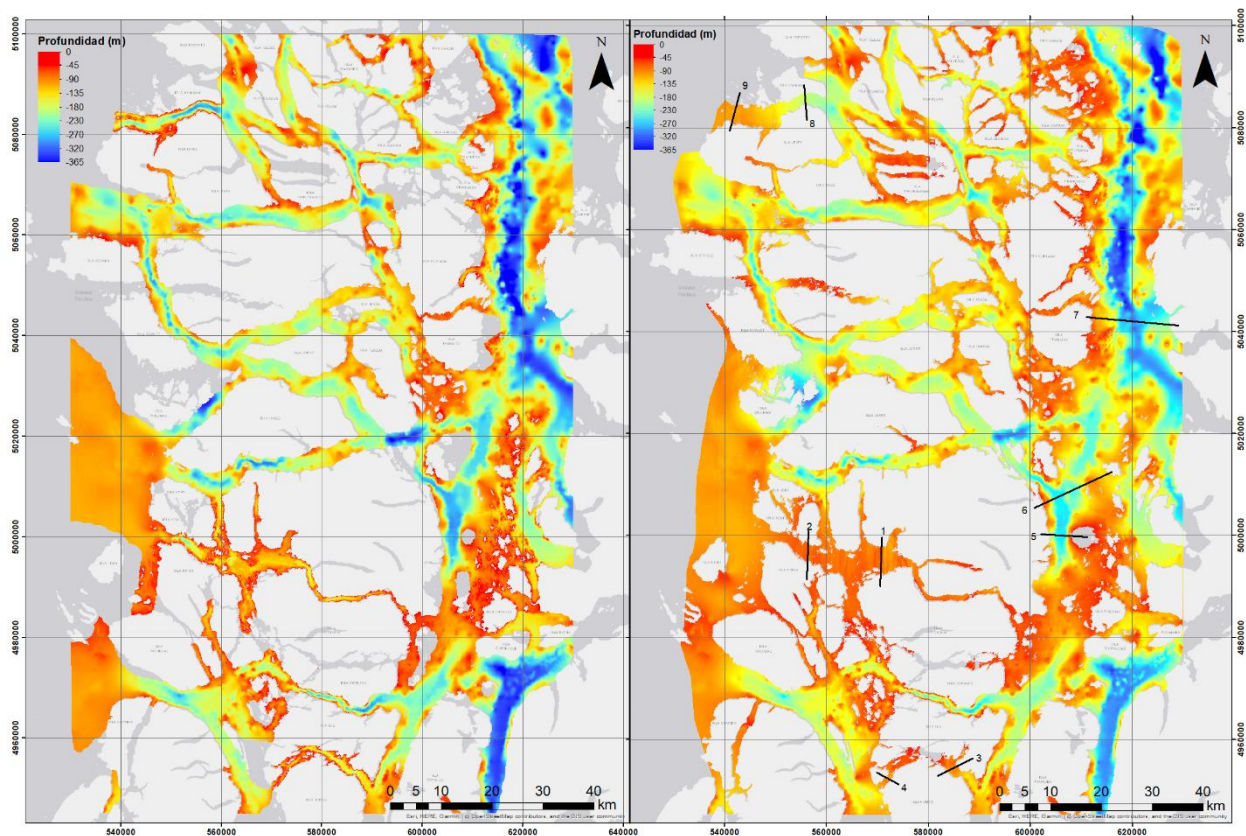
A lo largo del canal carrera del chivato (Figura 31) se observan grandes variaciones en batimetría alcanzando profundidades máximas de 210 metros (recuadro A). En este canal es posible observar gran cantidad de depósitos irregulares asociados a depósitos morrenicos, también es posible observar morfologías alargadas probablemente moldeadas por el paso de grandes masas glaciares en el pasado, lo que configura un ambiente glaciomarina para esta zona.

La zonificación del área de estudio permitió adquirir una batimetría en detalle de las áreas de interés generando así, modelos de alta resolución de dichas áreas, lo que hace posible la realización de diversos análisis en detalle para estos canales.

### 6.1.3 COMPARACION CON MODELOS PREVIOS

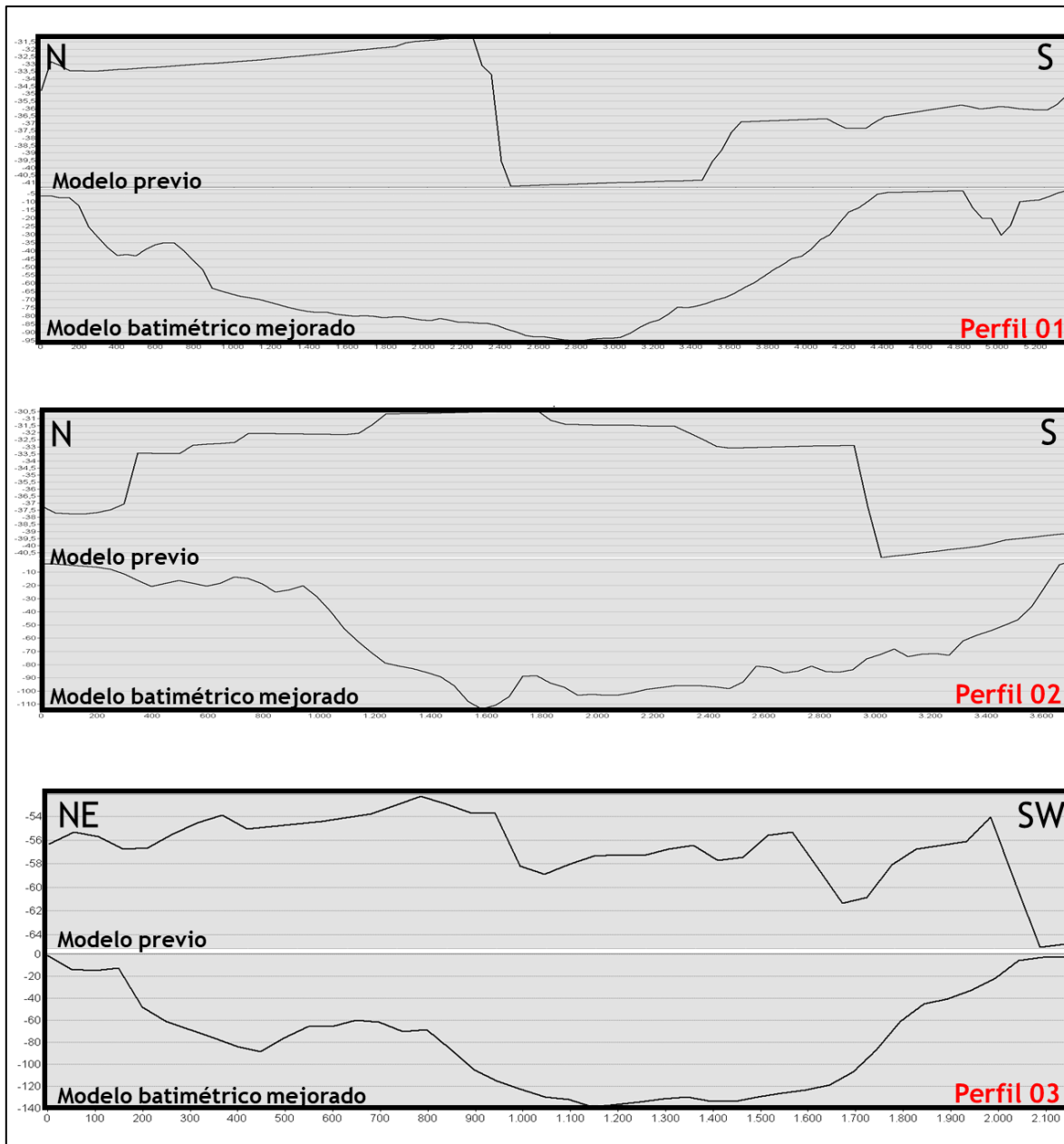
El modelo batimétrico mejorado fue comparado con los datos previamente existentes (cartas pertenecientes a SHOA) (Figura 32), mediante la generación de diversos perfiles de elevación (Figura 33 a Figura 35). Estos perfiles evidencian una clara mejora en la calidad y exactitud de los modelos batimétricos, permitiendo mayor detalle en la observación y análisis de la batimetría del área de estudio. A la vez se observa una clara diferencia entre las profundidades en ambos perfiles.

Figura 32: Comparación entre modelo batimétrico previo(derecha) y modelo batimétrico mejorado(izquierda). En el modelo batimétrico previo están identificados los perfiles de elevación que se muestran a continuación



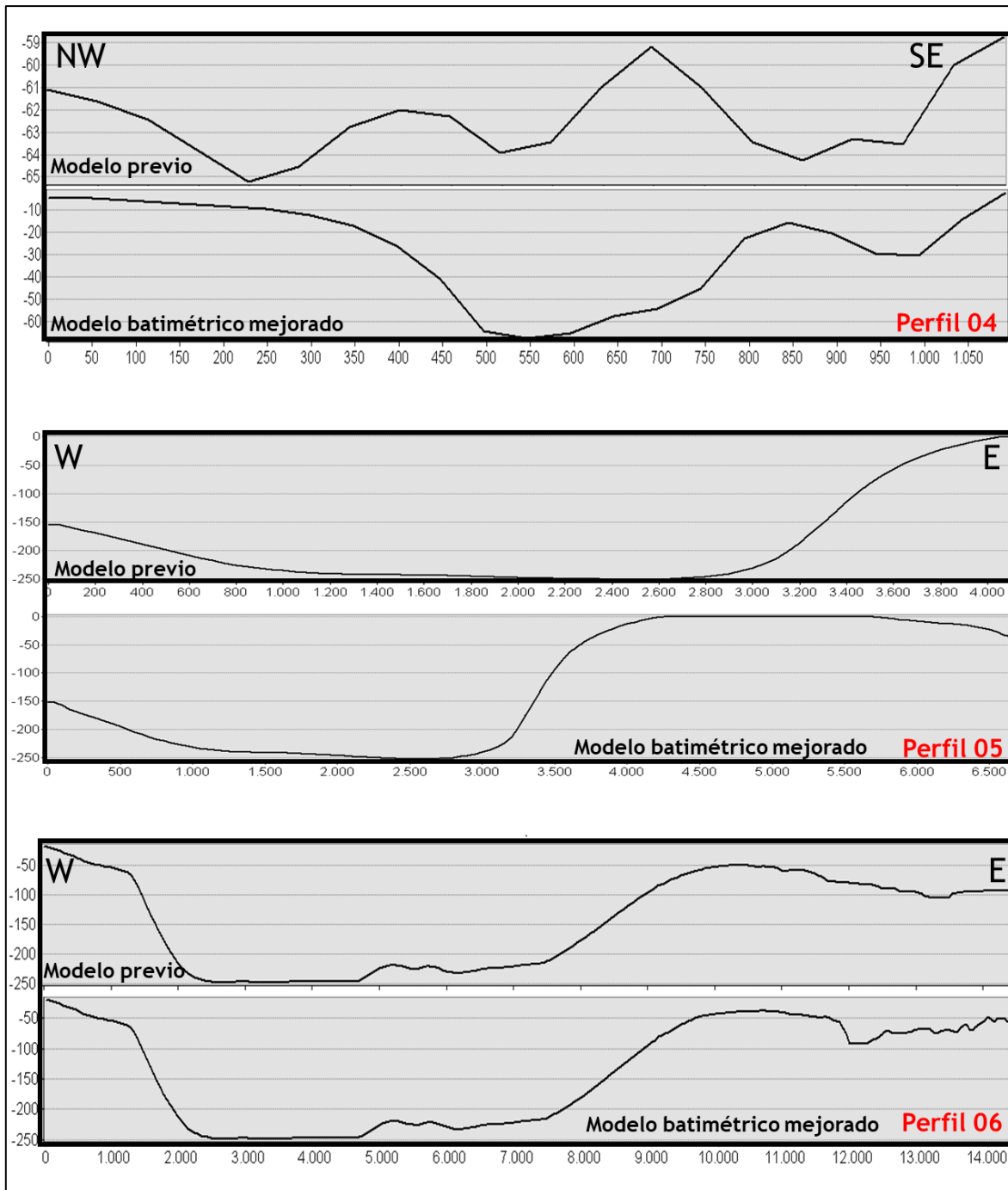
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 33: Perfiles batimétricos, se compara el modelos batimétrico mejorado con los modelos previos



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

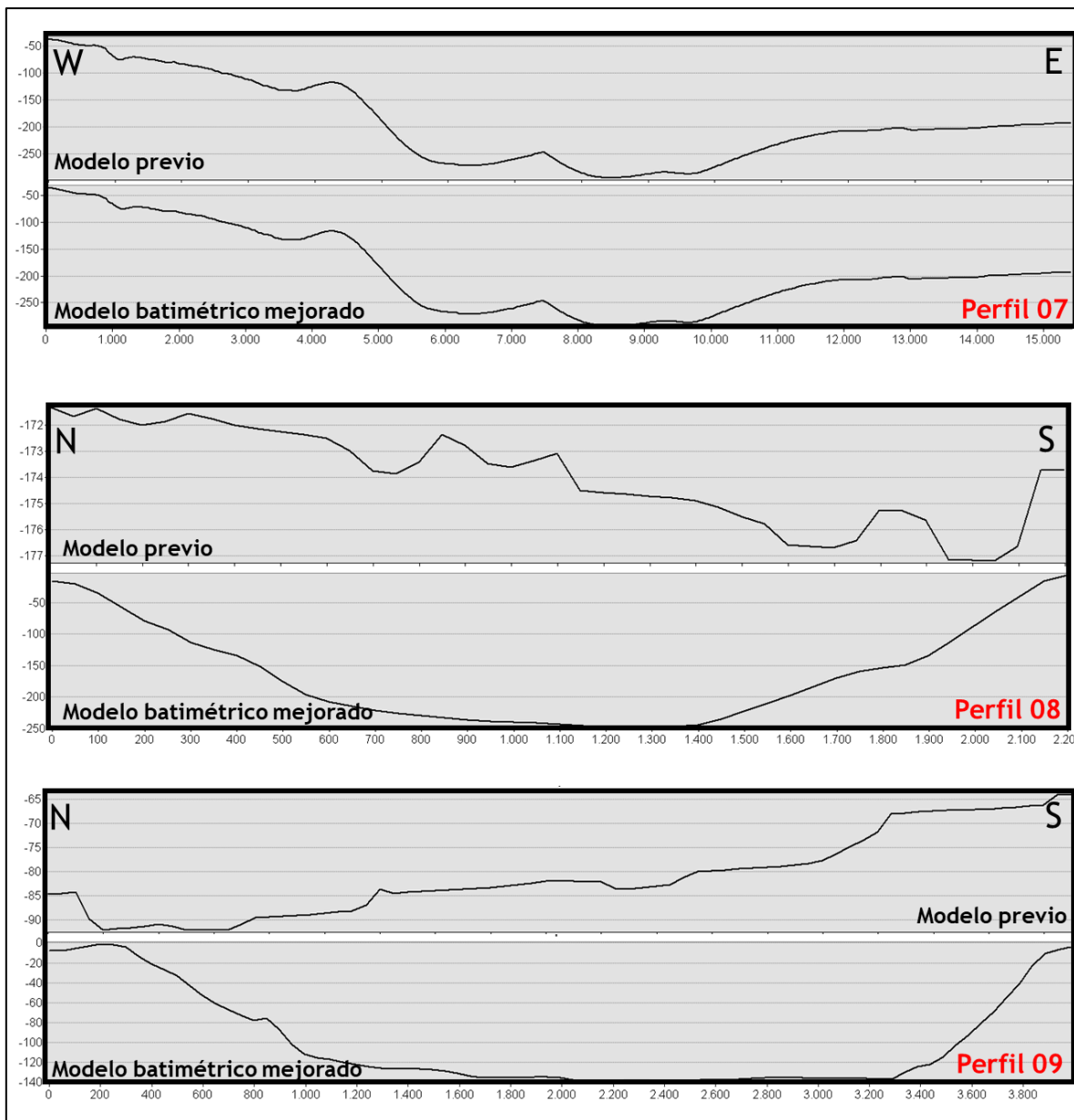
Figura 34: Perfiles batimétricos, se compara el modelos batimétrico mejorado con los modelos previos



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.



Figura 35: Perfiles batimétricos, se compara el modelos batimétrico mejorado con los modelos previos



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.



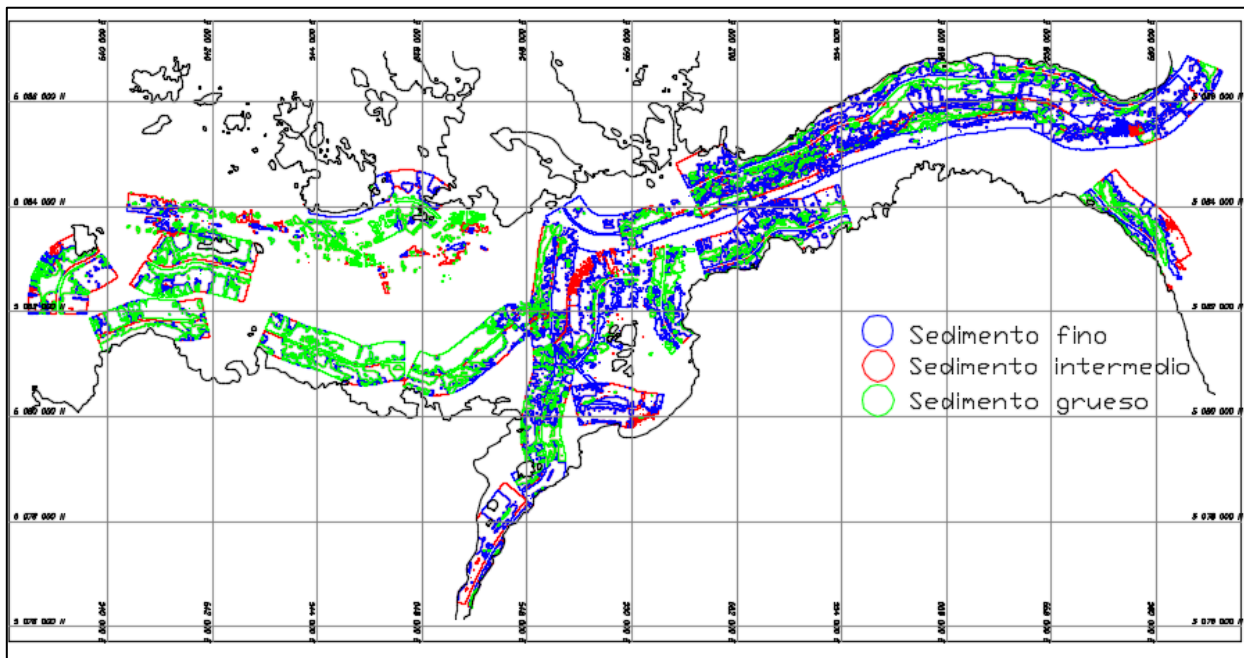
## 6.2 CLASIFICACIÓN DEL FONDO MARINO

Con objeto de complementar la información batimétrica, se procedió a efectuar una clasificación del fondo marino mediante el análisis de backscatter. Dicho análisis de la retro dispersión de la señal acústica, fue realizado mediante de un proceso estadístico de un módulo que dispone el software.

Debe considerarse que estas herramientas han sido desarrolladas para levantamientos sistemáticos, con líneas paralelas y áreas relativamente pequeñas y no para levantamientos exploratorios como los realizados en este estudio. En general, registros con gran cantidad de curvas o con poco traslape con líneas vecinas no constituyen registros ideales para ser sometidos a este proceso, sin embargo, se ha hecho el esfuerzo, seleccionando los registros más óptimos para tal fin. Estos modelos pueden servir de referencia a el tipo de fondo en cada zona estudiada, pero deben ser complementados con toma y análisis de muestras para correlacionar la información.

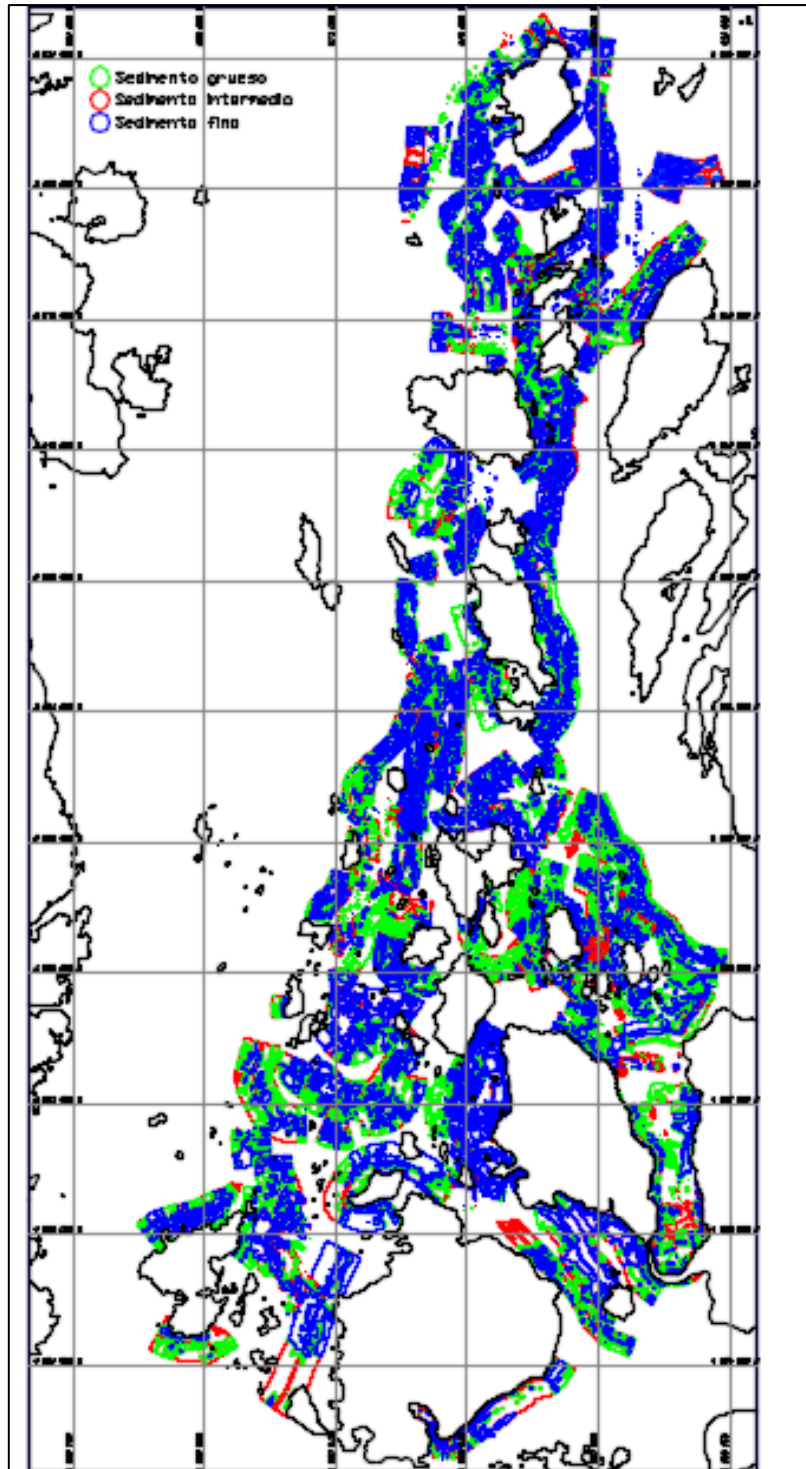
De acuerdo a las variaciones de la amplitud relativa de la señal, se identificó tres tipos de clases que van desde sedimentos finos (azul en modelo, menos reflectivo), clase intermedia y una de sedimentos gruesos (verde en modelo, más reflectivo) como se observa en las Figura 36 a Figura 39.

Figura 36: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Simpson).



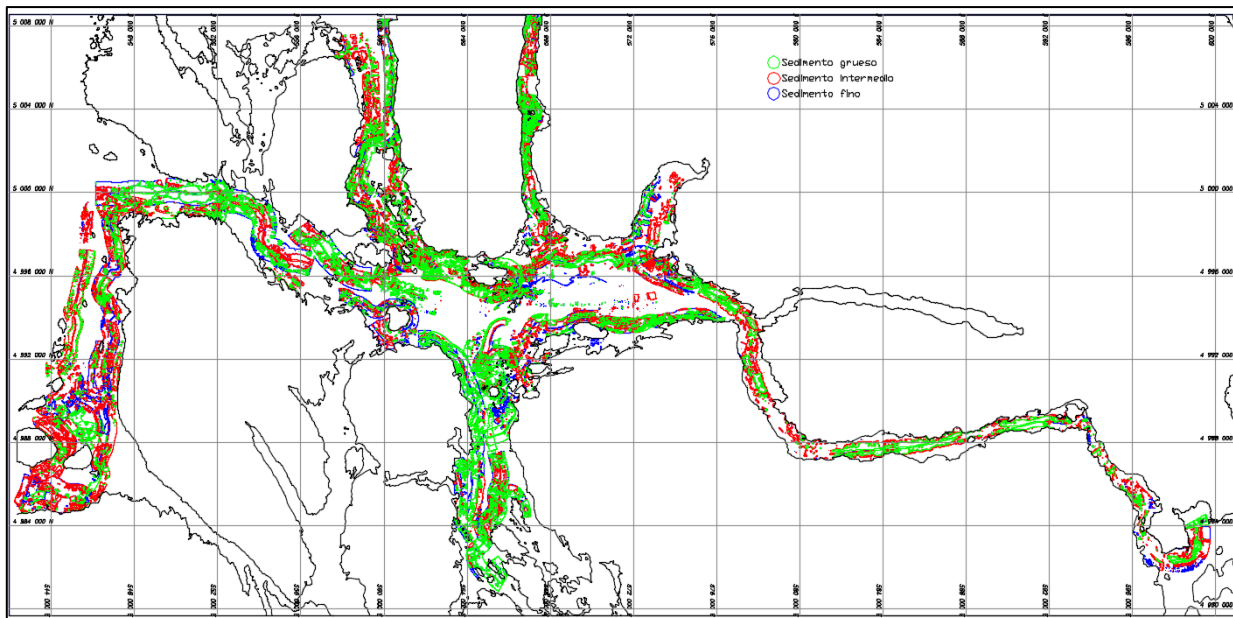
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 37: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Moraleda)



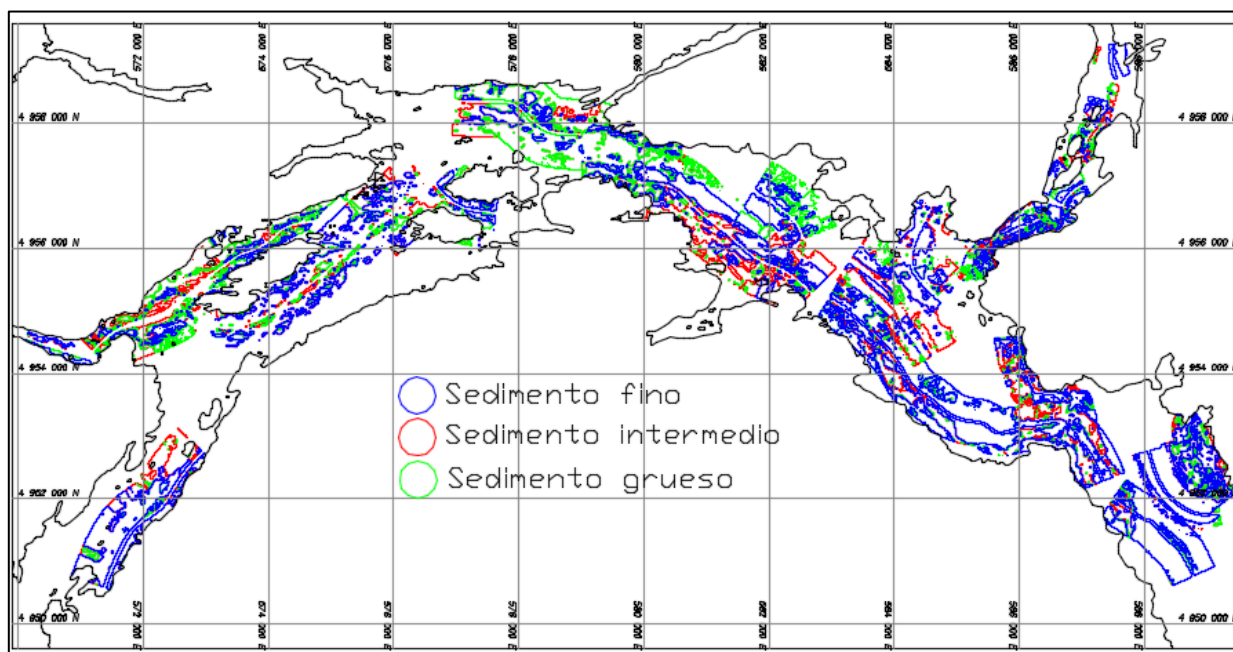
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 38: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Carrera del Chivato)



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Figura 39: Modelos de análisis de backscatter, clasificación relativa de tipo de sedimento (Canal Vicuña).



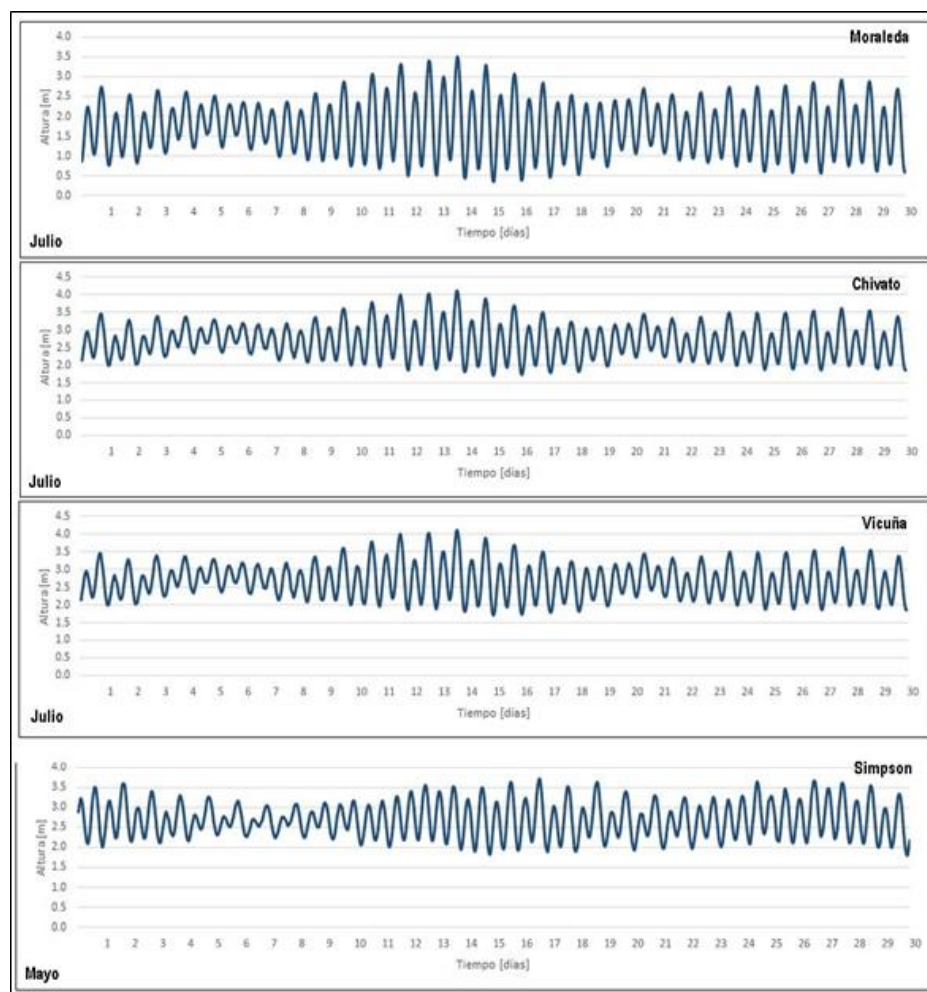
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

De dichos modelos se observa que la parte oeste del Canal Simpson arroja en su mayoría presencia de sedimentos gruesos a diferencia del extremo este que presenta un tipo de fondo más heterogéneo, el Canal Moraleda y Ferronave presenta en su mayoría sedimentos finos, el Canal Carrera del Chivato presenta en su mayoría sedimentos gruesos e intermedios, siendo estos últimos más recurrentes en la boca oeste del canal, la cual se conecta con mar abierto, finalmente el Canal vicuña presenta sedimentos más variados al igual que la zona este del Canal Simpson.

### 6.3 ESTUDIO DE MAREAS

Una vez obtenidos los datos brutos de los sensores, se graficó las series mensuales obtenidas de las mediciones en terreno, estas se muestran en la Figura 40.

Figura 40: Gráficos de series de marea



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 6.3.1 ANÁLISIS ARMÓNICO

Con la ayuda de la rutina T\_tide se obtuvo los principales constituyentes armónicos de la onda de marea, de dicho análisis se obtuvo que la principal constituyente y la que aporta mayor variabilidad a la componente astronómica de la marea es la semidiurna M2 para las cuatro zonas, la Tabla 16 detalla las constituyentes más representativas y su amplitud.

**Tabla 16: Principales constituyentes armónicos**

Característica	Constituyente	Sector	Amplitud [m]
Semidiurna	M2	Canal Simpson	0.504
		Canal Moraleda	0.806
		Canal Carrera del Chivato	0.561
		Canal Vicuña	0.757
	S2	Canal Simpson	0.178
		Canal Moraleda	0.218
		Canal Carrera del Chivato	0.154
		Canal Vicuña	0.203
	N2	Canal Simpson	0.114
		Canal Moraleda	0.224
		Canal Carrera del Chivato	0.160
		Canal Vicuña	0.208
Diurna	O1	Canal Simpson	0.120
		Canal Moraleda	0.132
		Canal Carrera del Chivato	0.126
		Canal Vicuña	0.133
	K1	Canal Simpson	0.193
		Canal Moraleda	0.253
		Canal Carrera del Chivato	0.237
		Canal Vicuña	0.254

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Con estas semi-amplitudes diurnas y semidiurnas, se determinó el coeficiente de Courtier (K) para cada zona, dicho valor osciló entre 0.38 para Canal Simpson y 0.51 para Canal Moraleda y Ferronave. Cuando el valor de K se encuentra entre 0.25 y 1.50, el régimen correspondiente es mixto predominantemente semidiurno. La Tabla 17 presenta los valores obtenidos de K para cada zona.

**Tabla 17: Valores de K para cada sector.**

Sector	Coficiente de courtier
Canal Simpson	0.38
Canal Moraleda	0.51

Canal Carrera del Chivato	0.40
Canal Vicuña	0.46

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

Con la metodología mencionada anteriormente y propuesta por SHOA se obtuvo el NRS respecto al cero instrumental para cada zona como se detalla en la Tabla 18.

**Tabla 18: NRS respecto al cero instrumental**

Sector	Nivel medio del mar [m]	NRS [m]
Canal Simpson	2.69	1.58
Canal Moraleda	1.73	0.10
Canal Carrera del Chivato	2.70	1.46
Canal Vicuña	2.41	0.86

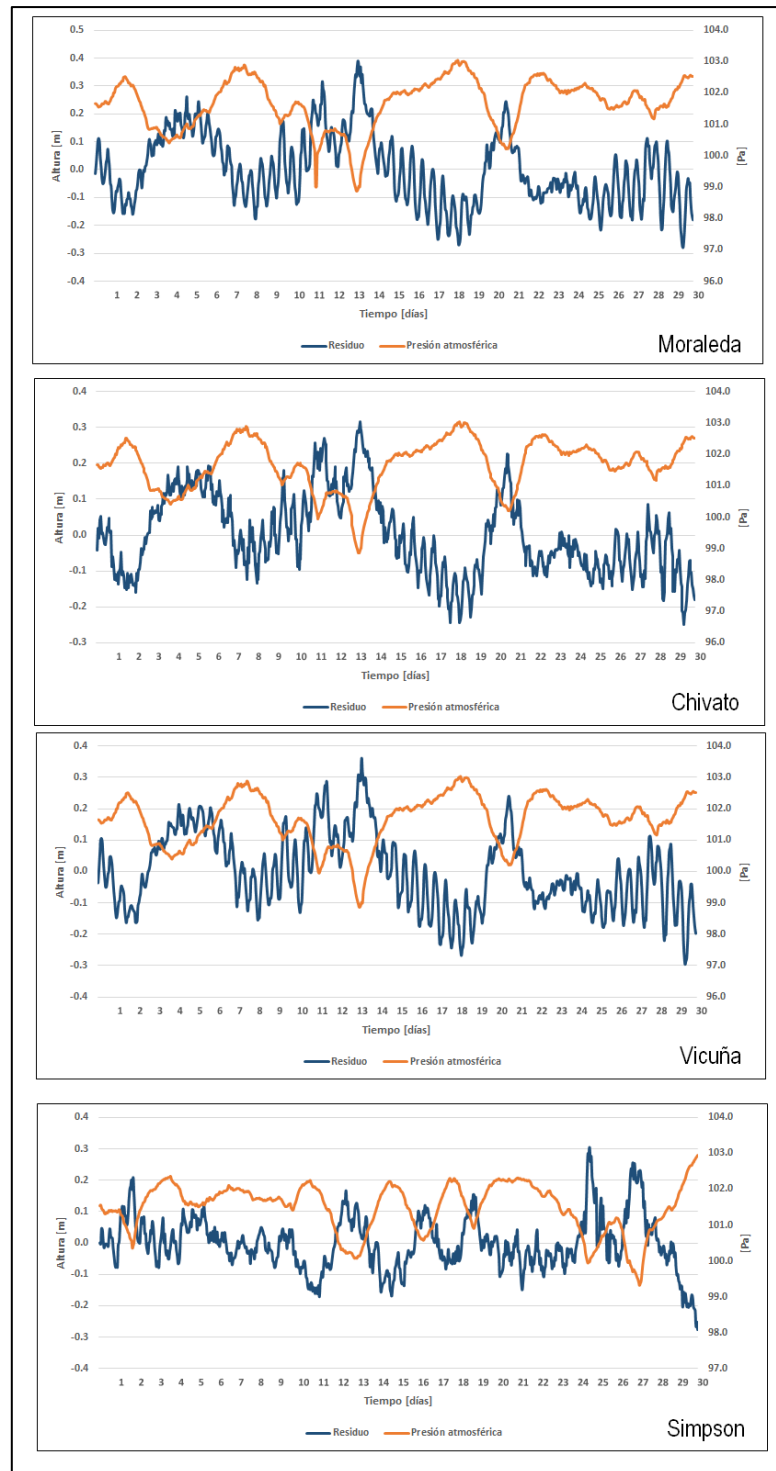
Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 6.3.2 RESIDUO O MAREA METEOROLÓGICA V/S PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Los factores meteorológicos también influyen en el nivel del mar promedio, existe una relación inversa entre el nivel del mar y la presión atmosférica, por ejemplo, un incremento en la presión atmosférica puede producir una disminución del nivel del mar. La Figura 41 presenta la serie de marea meteorológica v/s presión atmosférica para el intervalo de muestreo de las cuatro zonas, observándose una clara relación entre ambas variables.



Figura 41: Serie de marea meteorológica v/s presión atmosférica



Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

### 6.3.3 ANÁLISIS NO ARMÓNICO

Como se mencionó anteriormente, este análisis se realiza en base a estadísticos de la serie del nivel del mar para obtener los principales planos mareales, detalle de dichos planos referidos al NRS local para cada zona se muestran en la Tabla 19 a Tabla 22.

**Tabla 19: Planos mareales al NRS local, Canal Simpson**

Planos mareales	Altura respecto al NRS [m]
Pleamar máxima	2.12
Altura media de las pleamares superiores	1.81
Altura media de las pleamares	1.63
Nivel medio del mar	1.11
Altura media de las bajamares	0.56
Altura media de las bajamares inferiores	0.49
Bajamar mínima	0.22
Nivel de reducción de sondas (NRS)	1.58

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

**Tabla 20: Planos mareales al NRS local, Canal Moraleda y Ferronave**

Planos mareales	Altura respecto al NRS [m]
Pleamar máxima	3.42
Altura media de las pleamares superiores	2.67
Altura media de las pleamares	2.46
Nivel medio del mar	1.63
Altura media de las bajamares	0.78
Altura media de las bajamares inferiores	0.67
Bajamar mínima	0.27
Nivel de reducción de sondas (NRS)	0.10

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.



**Tabla 21: Planos mareales al NRS local, Canal Carrera del Chivato**

<b>Planos mareales</b>	<b>Altura respecto al NRS [m]</b>
Pleamar máxima	2.66
Altura media de las pleamares superiores	2.03
Altura media de las pleamares	1.83
Nivel medio del mar	1.24
Altura media de las bajamares	0.65
Altura media de las bajamares inferiores	0.56
Bajamar mínima	0.26
Nivel de reducción de sondas (NRS)	1.46

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

**Tabla 22: Planos mareales al NRS local, Canal Vicuña**

<b>Planos mareales</b>	<b>Altura respecto al NRS [m]</b>
Pleamar máxima	3.23
Altura media de las pleamares superiores	2.54
Altura media de las pleamares	2.33
Nivel medio del mar	1.55
Altura media de las bajamares	0.76
Altura media de las bajamares inferiores	0.65
Bajamar mínima	0.27
Nivel de reducción de sondas (NRS)	0.86

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.

## 7 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A grandes rasgos la morfología del área se caracteriza por la ocurrencia de una depresión principal con baja sinuosidad y sentido norte-sur (Canal Moraleda), a la vez se observan varios canales de menor tamaño con direcciones principales en sentido este-oeste (ej, Canal Simpson y Canal Carrera del Chivato). La morfología de los canales y fiordos del área se caracteriza por presentar forma de valle en “U”, típica de ambientes de predominio glacial, lo cual es observable tanto en los mapas batimétricos como en los perfiles perpendiculares a los canales analizados. En diversos canales y en las intersecciones entre canales y fiordos es posible observar depósitos irregulares, asociados a depósitos morrénicos, los cuales dan indicios de los avances y retrocesos los glaciares en el pasado (en Dowdeswell et al., 2016, se describe variedad de morfologías glaciares como las mencionadas anteriormente). Probablemente las direcciones de las principales depresiones en el área estén delimitados diversos factores como, las estructuras tectónicas presentes en el área como, por ejemplo, la falla Liquiñe-Ofqui (mapa geológico de Chile: versión digital escala 1:1.000.000, 2003) y por el avance de las masas de hielo durante el pasado.

El modelo backscatter clasifica tres tipos de sedimentos, finos, intermedio y grueso de acuerdo a las variaciones de amplitudes relativas de la señal, por lo que estos tipos de sedimentos solo son comparables entre ellos. En las áreas analizadas se observa una distribución mayormente heterogénea de los tamaños de sedimentos, esto probablemente se encuentra asociados a un ambiente fuertemente influenciado por glaciares en el pasado, lo pudo haber permitido la formación de depósitos gruesos (till glacial).

Respecto al estudio de mareas, las series pronosticadas se ajustan de buena forma, siendo la diferencia entre ambas series asociadas en parte a variaciones meteorológicas, este desfase, se debe en parte a que el método armónico no resuelve variaciones meteorológicas. Como se puede observar en los gráficos que relacionan las variaciones de la presión atmosférica con las variaciones en la serie de nivel del mar, disminuciones de la presión atmosférica, generan un aumento del nivel del mar en todos los sectores de estudio, siendo la Región de Aysén, una zona en constante exposición a eventos que generen grandes oscilaciones en el nivel promedio del mar.

Para la generación del modelo batimétrico mejorado se utilizó el método de interpolación de Kriging Ordinario. Este método se encuentra dentro de los que poseen una mayor certeza estadística y a la vez genera una superficie batimétrica suave en comparación a los otros métodos de interpolación disponibles, siendo este, el más idóneo para efectos de estudios de modelación hidrodinámica, oleaje, transporte de sedimentos entre otros procesos oceanográficos. Debido a que este método genera superficies suavizadas, podría no ser óptimo para otro tipo de estudio los cuales requieran mayor detalle de características como las rugosidades del fondo o morfologías de menor escala, por ejemplo, estudios morfológicos en detalle que impliquen la discriminación de eventos geofísicos y/o geomorfológicos significativos.

Otro punto que considerar con respecto a la utilización del método de Kriging Ordinario es la extrapolación de valores generados fuera del rango de valores de entrada, particularmente en los límites laterales del área interpolada, lo cual

implica que estos deben ser corregidos de manera manual posterior a la creación de la grilla. Esto se debe a que los métodos de interpolación “fuerzan” la generación de valores en las áreas en las que existe menor densidad de datos, lo que puede provocar sobre o subestimaciones en los valores generados, las cuales deben ser corregidas de manera posterior a la generación de la grilla batimétrica.

## 8 CONCLUSIONES

Se logró la generación de un modelo batimétrico mejorado, a partir de la integración de los datos obtenidos en las campañas de prospección realizadas por el equipo de Geociencias y los datos preexistentes en el área. Dicho modelo se validó mediante métodos cualitativos y a partir de métodos estadísticos. Los modelos generados son consistentes con los datos de fuentes oficiales y otras fuentes (como Rodrigo, 2006).

Los equipos y procedimientos utilizados cumplen con los requisitos para la elaboración de un modelo batimétrico según la normativa vigente y los requerimientos del mandante.

La zonificación del área de estudio permitió el análisis en detalle de ciertos canales de mayor interés y así la generación de modelos batimétricos de alta resolución y modelos de distribución de sedimento basados en la retrodispersión acústica en función de los sedimentos superficiales.

Las morfologías observadas y distribución de sedimentos sugieren que el área de estudio se encuentra en un ambiente glaciar y que este ha presentado etapas de mayor avance al actual en el pasado.

Se sugiere la prospección de nuevas áreas en la región de Aysén con el fin de mejorar la resolución y exactitud de los datos batimétricos de esta. También se sugiere la utilización de los datos nuevos como base para modelos de dispersión de sedimento y contaminantes en el área y generación de modelos paleo-ambientales.

---

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, D., Matiz, Jhon., Cárdenas, Andrés. (2011). *Modelos digitales batimétricos generados por métodos de interpolación IDW, Kriging, Shepard y B-Spline en el archipiélago de islas del Rosario*. Pp 3-14. Universidad Distrital.

Yang, X., Hodler, Thomas. (2013). *Visual and Statistial Comparisons of Surface modeling Techniques for point-based environmental data*. Pp 165-176 UK.

Golden Software, Inc. (2002). *Surfer User's Guide, Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers*. U.S.A.

Dowdeswell, J. A., Canals, M., Jakobsson, M., Todd, B. J., Dowdeswell, E. K. & Hogan, K. A. (eds) 2016, *Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient*. Geological Society, London, *Memoirs*, 46, 519– 552, <http://doi.org/10.1144/M46.183>

*Mapa geológico de Chile: versión digital escala 1:1.000.000*. 2003. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)

Rodrigo Cristián, 2006, *Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte*, Departamento Científico. Instituto Antártico Chileno

## 10 ANEXOS

Tabla 23: Anexos

ANEXO	NOMBRE DE ANEXO	DESCRIPCION ANEXO	CODIGOS
ANEXO A	Personal Participante	Equipo de trabajo	
ANEXO B	Resolución SHOA D.S. 711	Resolución SHOA D.S. 711	
ANEXO C	Modelo Batimétrico Preliminar	Datos entregados por el mandante y modelos generados a partir de los datos previos al levantamiento.	
ANEXO D	Modelo Batimétrico Mejorado	Datos en formato “.db”; Metadata; Modelo “.xyz”; grillas batimétricas en formato “.grd”; planos batimétricos sectorizados modelos batimétrico mejorado.	<b>DATOS BRUTOS:</b> Rotulo principal según canal + 6 dígitos correlativos. <b>ejemplo: CH000001.db</b>
ANEXO E	Modelo Backscatter	Modelos de Backscatter clasificación de fondo	
ANEXO F	Estudio de Mareas	Datos crudos (.hobo) e informe técnico	
ANEXO G	Fotografías	Material fotográfico asociados a los procesos de adquisición y procesamiento	Rotulo principal FG + 3 dígitos correlativos. <b>ejemplo: FG001</b>
ANEXO H	Referencias Bibliográficas	Referencias Bibliográficas utilizadas durante la elaboración de los informes	
ANEXO I	Especificaciones de los equipos utilizados	Especificaciones principales equipos utilizados PDF	
ANEXO J	Medición de velocidad del sonido y caracterización de la columna de agua.	Informe técnico (IT) Medición de velocidad del sonido y caracterización de la columna de agua; Datos crudos.	<b>DATOS SVP:</b> Rotulo principal según canal + dígitos correlativos. <b>ejemplo: AG10.txt</b>
ANEXO K	Informes previos	Informes técnicos entregados al mandante durante las diversas etapas del proyecto	
ANEXO L	Taller de difusión	Presentacion en formato PDF; asistentes al taller, Imágenes	

Fuente: Elaboración propia de Geociencias.