



## **INFORME FINAL**

Convenio de desempeño 2021:

Determinación de las escalas de intercambio de agua en  
fiordos y canales de la Patagonia chilena, 2021-2022

**SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / diciembre 2022**

## **INFORME FINAL**

Convenio de desempeño 2021:

Determinación de las escalas de intercambio de  
agua en fiordos y canales de la Patagonia chilena, 2021-2022  
**SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT /diciembre 2022**

### **REQUIRENTE**

**SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y  
EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO**

Subsecretaría de Economía y  
Empresas de Menor Tamaño  
**Javiera Petersen Muga**

### **EJECUTOR**

**INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP**

Director Ejecutivo  
**Gonzalo Pereira Puchy**

Jefe División Investigación en Acuicultura  
**Leonardo Guzmán Méndez**

### **JEFE PROYECTO**

Elías Pinilla Matamala

### **AUTORES**

Elías Pinilla Matamala  
Camila Soto Riquelme  
Javiera San Martín Parra  
Pedro Valdebenito Muñoz  
Gabriel Soto Soto  
Pablo Reche García

### **COLABORADORES**

Oliver Venegas Mella  
Patricio Salas Salas  
Javier Cortés Puebla  
Miguel Vergara Barria  
Marcela Arriagada Ortega

---

## RESUMEN EJECUTIVO

---

Los tiempos de renovación de aguas y su relación con variables como el oxígeno disuelto en zonas marinas utilizadas por la acuicultura es relevante pues, de acuerdo con amplia literatura, este tipo de parámetros, son útiles para la toma de decisiones pues facilitan la estimación de la capacidad de asimilación de estos ecosistemas para soportar actividades acuícolas. El siguiente documento conforma el informe final del proyecto: Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia chilena, 2021-2022. Aquí se describe principalmente la circulación marina, la estimación del intercambio de agua y dinámica de oxígeno disuelto en seno Skyring, región de Magallanes y de la Antártica Chilena, a través de una robusta cantidad de observaciones y el uso de múltiples modelos numéricos. La información aquí generada por medio de modelos numéricos es desplegada en la plataforma de información ambiental CHONOS ([chonos.ifop.cl](http://chonos.ifop.cl)), bajo la herramienta ATLAS.

Se implementó un sistema de modelación que incluyó: un modelo barotrópico de mareas, un modelo hidrológico (FLOW-IFOP) para estimar los caudales diarios agua dulce y un modelo meteorológico (WRF-IFOP) que suministró el forzamiento atmosférico, cada uno de estos componentes fue evaluado mediante diversas métricas con datos observacionales. Estos modelos proporcionaron la información de entrada para la inicialización del modelo hidrodinámico, que fue implementado para los años 2016, 2017 y 2018.

Seno Skyring es un sistema estuarino semi cerrado en la región de Magallanes, con una conexión limitada al océano costero y con características particulares que lo diferencian de la Patagonia norte (Lat. 41°S a 46°S). Una de sus tipologías es la conformación geológica intrincada que reduce el intercambio de agua con el océano exterior, limitando la propagación de la onda de marea, y el transporte de masas de agua de origen oceánico, aspectos que son muy relevantes en otros sistemas de la Patagonia Norte. En ausencia de la energía de las mareas, los patrones de viento en la región de Magallanes, reconocidos por su alta energía, emergen como uno de los principales forzantes en circulación de seno Skyring.

La salinidad en seno Skyring presentó una relativa baja variabilidad (rango de 15 a 20) en toda la columna de agua, mientras que la zona externa, fuera de las constricciones, exhibió valores superficiales relativamente bajos (~15), pero que se incrementaban en capas más profundas (>30), indicando una mayor influencia oceánica y con mayor tendencia a la estratificación que el propio seno Skyring. Por otra parte, se reveló una disminución de la amplitud del nivel del mar al interior del seno, que indica, una disipación importante de la energía de la onda de marea al encontrarse con los límites topográficos antes detallados. Uno de los efectos de la atenuación de la onda de marea al interior del seno Skyring es que las observaciones de corrientes realizadas entre el año 2021 y 2022, no registraron la señal de marea significativamente, la varianza explicada por la banda semidiurna y diurna en la corriente es < 6%, mientras que, la banda sinóptica (2 - 8 días) explicó entre el 25 y 50% de la varianza total de la corriente. Las corrientes (entre 7 m y 100 m.) dentro del Seno Skyring son relativamente lentas, con un promedio de 2 a 5 cm s<sup>-1</sup> y máximas velocidades que pueden alcanzar 20 cm s<sup>-1</sup>.

Seno Skyring presenta una componente estacional relevante y alta energía espectral en la banda sinóptica, entre 2 y 8 días, esto difiere en gran medida al comportamiento en la Patagonia norte, en donde la energía espectral se concentra fuertemente en la banda de 12 horas, asociada a la constituyente semidiurna (M2) de la marea. Esto indicaría que, en general, el seno Skyring está oscilando en frecuencias distintas y más bajas que la Patagonia Norte, probablemente asociado a la acción de los vientos. Esto se evidenció en diferentes variables; corriente, nivel del mar, temperatura, salinidad y oxígeno en toda la columna de agua. Sin embargo, hay oscilaciones en la corriente que responden a frecuencias distintas a las que oscila el viento, lo que se podría relacionar a la interacción del viento con la geometría de seno Skyring generando oscilaciones internas más complejas.

Las condiciones de viento modeladas por el modelo atmosférico WRF son consistentes con otras fuentes de información que fueron utilizadas para medir su desempeño, tales como una estación meteorológica y el producto grillado global CCMP. El viento simulado por WRF entre 2016, 2017 y 2018 revela un patrón estacional con una marcada componente de viento que sopla desde el oeste persistentemente durante todo el año, mientras que su intensidad es mayor durante la primavera y se debilita hacia los meses de otoño.

La simulación de descargas de agua dulce calculadas por el modelo FLOW-IFOP, muestra un adecuado ajuste con las observaciones fluviométricas de la DGA ( $r > 0.7$ ). De acuerdo con este modelo el promedio anual de todas las descargas de agua dulce que ingresan al seno Skyring es de  $138 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , lo que representa valores por debajo de otras cuencas de la Patagonia, tales como: río Puelo ( $\sim 645 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), Palena ( $\sim 812 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), Aysén ( $\sim 612 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) o Serrano ( $\sim 454 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), en la región de Magallanes. Los aportes de agua dulce en seno Skyring muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo, y mínimos durante la época de invierno.

La variabilidad interanual de las descargas de agua dulce al interior del seno muestra una tendencia positiva, es decir, los ríos estarían incrementando su descarga de agua dulce al sistema marino de seno Skyring basado en el periodo 1980-2018. La señal interanual muestra una variabilidad con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los  $160 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los  $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Cabe señalar que el modelo hidrodinámico simuló el año 2016, 2017, 2018 y que este coincide con un periodo de mínimos caudales (periodo 1980-2018).

El modelo hidrodinámico en el seno Skyring logra reproducir los principales atributos de este sistema marino. Por una parte, la hidrografía representada por los campos de temperatura y salinidad es bien definida, tanto espacial como temporalmente. Esto considerando que las observaciones de estaciones de CTD se realizaron en un período distinto de modelación. Por otra parte, los principales modos de variabilidad de la corriente son coincidentes entre el modelo y un perfilador de corrientes desplegado en el año 2021, años distintos, pero expresiones similares en su estructura. El análisis mediante EOF reveló que el modo 1 y que explica la mayor parte de la variabilidad, es coincidente con la señal del viento zonal, esto revela al viento como principal agente en la circulación en seno Skyring. La circulación superficial sigue un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oeste-este, de la misma forma en que se presenta la estructura espacial del viento, así durante la primavera al

registrarse la mayor energía del viento, también se produce la respuesta de las corrientes a incrementar su intensidad.

La edad del agua en seno Skyring presentó valores de ~15 años (~5500 días), estos son valores extraordinariamente altos comparados con estudios similares realizados en la Patagonia norte, si bien existe variabilidad a lo largo del año, y lugares con mejor renovación, estos valores de mantuvieron muy altos ~13.7 años (~5000 días). Este número representa cerca de 10 veces más tiempo de los estimado para la zona de mayores edades en la región de Aysén, específicamente en las cercanías del fiordo Cupquelán (~500 días).

Se implementó un modelo simple y semi empírico de oxígeno disuelto (OD) en Seno Skyring. Los resultados muestran consistencia entre los patrones espaciales de OD modelados y las observaciones obtenidas por IFOP, presentando los mayores niveles de OD en la capa superficial y en las cercanías de los campos de hielo y ríos. En las capas profundas, los valores de oxígeno disuelto no disminuyen significativamente, manteniendo una cota inferior de aproximadamente 6 mg L<sup>-1</sup>.

Tanto el modelo como las observaciones muestra a Seno Skyring como una zona de altos niveles de concentración de oxígeno disuelto (>6 mg L<sup>-1</sup>), con atenuada influencia de trazadores oceánicos, en cambio, la Patagonia Norte, se encuentra mayormente influenciada por el ESSW (Agua Ecuatorial subsuperficial) que transporta agua pobre en oxígeno (3 - 4.5 mg L<sup>-1</sup>) y que es una de las principales causas que contribuyen a aguas con bajo contenido de OD dentro de los fiordos de la zona norte.

## ÍNDICE GENERAL

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....             | <b>i</b>  |
| <b>ÍNDICE GENERAL</b> .....                | <b>iv</b> |
| <br>                                       |           |
| <b>1. ANTECEDENTES</b> .....               | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....                  | <b>4</b>  |
| 2.1 Objetivo general .....                 | 4         |
| 2.2 Objetivos específicos.....             | 4         |
| <b>3. METODOLOGÍA</b> .....                | <b>5</b>  |
| 3.1 Objetivo específico 2.2.1.....         | 5         |
| 3.2 Objetivo específico 2.2.2.....         | 18        |
| 3.3 Objetivo específico 2.2.3.....         | 19        |
| 3.4 Objetivo específico 2.2.4.....         | 21        |
| 3.5 Objetivo específico 2.2.5.....         | 21        |
| <br>                                       |           |
| <b>4. RESULTADOS</b> .....                 | <b>24</b> |
| 4.1 Objetivo específico 2.2.1 .....        | 24        |
| 4.2 Objetivo específico 2.2.2 .....        | 52        |
| 4.3 Objetivo específico 2.2.3 .....        | 55        |
| 4.3 Objetivo específico 2.2.4 .....        | 60        |
| 4.3 Objetivo específico 2.2.5 .....        | 61        |
| <br>                                       |           |
| <b>5. DISCUSIÓN</b> .....                  | <b>62</b> |
| <br>                                       |           |
| <b>6. CONCLUSIONES</b> .....               | <b>69</b> |
| <br>                                       |           |
| <b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> ..... | <b>71</b> |
| <br>                                       |           |
| <b>8. ANEXOS</b> .....                     | <b>77</b> |
| 8.1 ANEXO I: Base de datos.....            | 77        |
| 8.2 ANEXO II: Gestión del proyecto.....    | 79        |

## 1. ANTECEDENTES

---

### 1.1 Escalas de transporte temporal

Los océanos exhiben ecosistemas altamente diversos y variables que son gobernados por complicados conjuntos de interacciones físico-biogeoquímicas entre la atmósfera, la superficie del océano y su interior, en una variedad de escalas espaciales y temporales (Gregoire y Oguz, 2003). Las escalas temporales de transporte, en general, proporcionan una visión de los procesos de transporte advectivo y difusivo pudiendo ser usado para estimar la variabilidad en la distribución de importantes propiedades que son críticas para los ecosistemas marinos y el clima tales como temperatura, salinidad, clorofila, macro y micronutrientes, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> disueltos (Sandery y Kampf, 2007). Por ejemplo, la producción biológica marina es modificada mediante procesos físicos como la mezcla y arrastre de nutrientes desde capas inferiores de la columna de agua, penetración de luz, confinamiento de fitoplancton en la zona eufótica por estratificación y aporte de nutrientes por descargas de ríos (Gregoire y Oguz, 2003). De hecho, se ha sugerido que el tiempo de retención es un parámetro clave en el control del balance de nutrientes en los ecosistemas marinos (Boynton et al., 1995).

Las características de los procesos de transporte de una sustancia disuelta dependen principalmente del flujo residual de baja frecuencia que depende de las interacciones entre el campo de densidad, el flujo del río, el viento y la rectificación no lineal de las mareas periódicas en un estuario dado (Shen y Wan, 2007). Por lo tanto, es difícil separar y cuantificar las influencias de diferentes mecanismos en el transporte a largo plazo. Para entender la dinámica subyacente que contribuye en las propiedades de transporte de un estuario, se han utilizado escalas de tiempo de transporte, tales como "flushing time", tiempo de residencia o la edad del agua para cuantificar las condiciones dinámicas generales de un sistema marino. Existen muchos estudios en que se han utilizado estas escalas temporales de transporte para trazar la masa de agua y estimar ventilación en el océano (England, 1995; Karstensen y Tomczak, 1998; Hirst, 1999; Deleersnijder et al., 2002) o para investigar la circulación en sistemas marinos semi-cerrados, estuarios o fiordos (Oliviera y Baptista, 1997; Walker, 1999; Delhez y Deleersnijder, 2002; Monsen et al., 2002; Sandery y Kampf, 2007; Gustafsson y Bendtsen, 2007; Zhang et al 2010; Kawase y Bang, 2013; Hong y Shen, 2013; Bendtsen et al., 2014; Viero y Defina, 2016).

En estricto rigor, sólo dos escalas de tiempo son suficientes para trazar el movimiento del agua, estos son, la edad del agua y el tiempo de residencia. Zimmerman (1976) introdujo el concepto de "tiempo de residencia" como el tiempo que tarda una parcela de agua en abandonar el dominio de interés, mientras que la edad del agua es un complemento del tiempo de residencia y es definido como el tiempo transcurrido desde que la parcela de agua en consideración salió de la región en la que su edad se define como cero, o bien, el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua. (Bolin y Rodhe, 1973; Delhez et al., 1999; Monsen et al., 2002). La colocación de los límites para definir una región de interés es una

elección arbitraria, e influirá en los valores absolutos de las escalas de tiempo. Hasta cierto punto, las distribuciones de escala temporal en el sistema son relativas por naturaleza, por consecuencia los patrones similares serán vistos sin importar la localización del límite (Sandery y Kampf, 2007).

En la mayoría de los casos, no es posible estimar estas escalas de tiempo de manera exhaustiva mediante promedios de datos de campo. La ausencia de mediciones intensivas de temperatura y salinidad hacen dificultoso el cálculo de la mezcla vertical vía estos parámetros. Por otra parte, la evaluación del tiempo de descarga o “flushing time” como la razón entre el volumen del dominio de interés y un flujo saliente es una aproximación gruesa que es válida sólo para un flujo en estado estacionario en un dominio infinitamente bien mezclado (Deleersnijder, 2007). Así el enfoque de un sistema en estado estacionario no toma en cuenta las variaciones espaciales y temporales en un gran estuario, por tanto, es deseable conocer el patrón de distribución espacial del tiempo de residencia y su variación temporal (Shen y Wan, 2007). Por otra parte, las técnicas que implican modelos numéricos tienen la ventaja de proporcionar una visión cuantitativa directa de la dinámica y funcionamiento del sistema marino (Delhez et al., 2004). Esto resulta muy valioso en un medio ambiente interdisciplinario o en una perspectiva de gestión (Deleersnijder, 2007).

Los métodos mediante los cuales es posible calcular las escalas de tiempo en un modelo numérico pueden estar centrados desde una óptica lagrangiana o bien euleriana. Los modelos de transporte eulerianos son usualmente preferidos a sus homólogos lagrangianos (Deleersnijder, 2001). La necesidad de un gran número de partículas lagrangianas para producir mapas sinópticos y su consecuente alta demanda de tiempo de cómputo, como también, los problemas asociados con la modelación de la turbulencia en condiciones no homogéneas (Hunter et. al., 1993; Visser, 1997; Deleersnijder et al., 2001). En cambio, un enfoque euleriano permite que las masas de agua que interactúan sean modificadas por procesos advectivos y difusivos, (Delhez et al., 1999). Esto a su vez permite que la estimación del tiempo de transporte se presente como una variable espacial y revele información detallada del tiempo de tránsito en un estuario complejo (Shen y Wan 2007).

## **1.2 Oceanografía en la Patagonia de Chile**

La geografía patagónica es producto de la acción glacial acontecida principalmente en el cuaternario, estos eventos formaron una línea de costa desmembrada, caracterizada por fiordos profundos y canales que comunican numerosos cuerpos de agua (Araya-Vergara 1997, 1999 y 2006), particularmente la topografía submarina, se exhibe como irregular alternando conformaciones tipo cuencas explanadas de represamiento y cuencas explanadas tipo cubeta (Rodrigo, 2004).

Debido a que no existía un gran desarrollo de la información sobre estudios ambientales en los canales y fiordos australes, el comité oceanográfico nacional CONA, elaboró el año 1994 un programa denominado crucero CIMAR, para efectuar una serie de cruceros oceanográficos, con la finalidad de cubrir esta extensa área, siendo los 3 primeros de carácter exploratorio. Posteriormente sobre la base de estos cruceros, se realizó un número significativo de cruceros, con la finalidad de determinar y documentar procesos oceanográficos relevantes, considerando que en muchas de estas áreas existe

un fuerte desarrollo productivo acuícola (Silva y Palma, 2006). Esto permitió generar una base de datos y un conjunto de publicaciones científicas, además de generar líneas base de investigación para estas zonas (CONA, 2021). Dentro de los resultados destacables, se logró establecer patrones y procesos oceanográficos, identificándose y caracterizando las principales masas de agua presentes, no solo en la zona oceánica, sino que también los cuerpos de agua que se forman dentro de la zona de canales y fiordos, diseñando algunos esquemas de circulación (Silva et al., 1995). Las propiedades físicas (e.g), de los cuerpos de agua localizados dentro de estos sistemas está en gran medida determinada por las tipologías de las masas de agua del océano costero adyacentes (aguas oceánicas) y la mezcla que experimenta esta masa de agua con el agua dulce (aporte fluvial, nival, glacial y pluvial) (Silva et al., 1998), siendo esta mezcla proporcional a la distancia de la fuente de agua dulce (Carrasco y Silva, 2006). De esta forma las condiciones oceanográficas, producto de la interacción de agua oceánica y agua dulce, revela la presencia de una columna de agua estratificada, constituida en 2 capas: una superficial de profundidad variada, determinada por menor salinidad, menor densidad y mayor concentración de oxígeno disuelto, siendo esta capa superficial la que presenta mayor variabilidad espacial y temporal. Mientras que la segunda capa, es de mayor salinidad y densidad, menor concentración de oxígeno. Entre ambas capas se observa un intenso gradiente conformando una marcada haloclina, pycnoclina, oxiclina y nutriclina, esta estructura ha sido utilizada como trazador para realizar modelos esquemáticos de circulación horizontal, donde el agua dulce sale de los fiordos y canales (capa superficial), mezclándose con el agua oceánica que ingresa en dirección opuesta (capa profunda), Silva *et al.*, (1997 1998); Sievers *et al.*, 2002; Valdenegro y Silva, 2003).

En estas condiciones geográficas y oceanográficas se ha desarrollado la acuicultura en la zona sur Austral de Chile, centrada básicamente en Salmónidos, llevando a Chile a ser uno de los principales productores a nivel mundial, por lo que esta actividad ha sido considerada de gran importancia en la dinámica económica del país (Buschman *et al.*, 2009). No obstante, el desarrollo de la acuicultura no ha estado exento de problemas, a partir del 2007, la industria salmonicultora experimentó una fuerte crisis producto de problemas sanitarios relacionados con el virus ISA (Godoy *et al.*, 2008), lo que también trajo como consecuencia grandes pérdidas económicas, bajo estos antecedentes, la gestión de la acuicultura y su regulación por parte del estado de Chile se proyectaron como una actividad de alta complejidad (Bustos, 2012), por una parte, se debe promover el máximo nivel posible de crecimiento económico en el tiempo, pero en un marco de sustentabilidad ambiental. Si bien a partir del año 1991 se elaboran cambios en la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA) enfocados en acuicultura, sólo en 2003 se comienza a incluir los conceptos de sustentabilidad ambiental, mediante la Política Nacional de la Acuicultura (PNA) estableciendo un marco regulatorio para esta actividad. Sin embargo, debido a la insuficiencia de este marco regulatorio, evidenciado tras la crisis del salmón producto del Virus ISA, es que actualmente, La LGPA establece un marco de obtención de información científica en los cuales se debe sostener las decisiones de carácter público y sobre la base de esta información deberán ser desarrolladas los instrumentos de ordenamiento territorial, donde no solo estaría contenida la salmonicultura, sino todo los usuarios que ejerzan alguna actividad dentro del borde costero (Fuentes, 2014).

## **2. OBJETIVOS**

---

### **2.1 Objetivo general**

Determinar la variabilidad interanual de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia.

### **2.2. Objetivos específicos**

2.2.1 Modelar hidrodinámicamente la variabilidad interanual del sistema marino de seno Skyring, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

2.2.2 Calcular el intercambio de agua interanual mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico en Seno Skyring.

2.2.3 Implementar un modelo simple y semi-empírico de la dinámica de oxígeno disuelto en seno Skyring.

2.2.4 Generar mapas de tiempos de intercambio de agua y de variables oceanográficas modeladas para el seno Skyring acoplados a la plataforma de información oceanográfica Chonos.

2.2.5 Actualizar periodo modelación en los modelos hidrodinámicos ya implementados en la región de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para visualización en plataforma Chonos.

### 3. METODOLOGÍA

**3.1 Objetivo específico 2.2.1:** Modelar hidrodinámicamente la variabilidad interanual del sistema marino de seno Skyring, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena.

Este objetivo incluye una caracterización en base a datos in situ, para posteriormente integrar la información asociada a los modelos numéricos desarrollados.

#### 3.1.1 Mediciones in situ

Se realizaron mediciones de correntometría euleriana en la columna de agua dentro de Skyring, se analizó la corriente y marea de la zona en base a 2 ADCP y 4 mareógrafos. Los ADCP anclados a media agua con una frecuencia de medición de 1 hora, se utilizaron ADCP RDI 300kHz y ADCP ROWE 300kHz, la información detallada de los anclajes se encuentra en la **Tabla 1**.

Se realizó un análisis preliminar entre los cuatro transductores del ADCP, sólo se trabajó con los datos que obtuvieron 90% de correlación y se eliminó el nivel más cercano a la superficie, para eliminar el efecto de variación de nivel del mar. Posteriormente, se realizó la corrección magnética correspondiente a cada punto, de esta manera los datos fueron orientados al norte geográfico. Luego se calculó las componentes ortogonales de la corriente; U (este) y V (norte).

Se realizó un análisis espectral, en el dominio de la frecuencia, utilizando la técnica de autoespectro (Bendat y Piersol, 1986) para las componentes vectoriales (Mooers, 1973) para las componentes de la corriente del mar interior de Skyring, se efectuó el siguiente procedimiento; para una mayor significancia estadística, las series se dividieron en segmentos de igual tamaño, con cada segmento se calculó un espectro, el cual se promedió para cada frecuencia (Emery y Thomson, 1998). Puesto que cada estimación espectral posee una distribución  $X^2$  con dos grados de libertad, los grados de libertad del espectro promedio son dos veces el número de trozos (Bendat y Piersol, 1986). Se calculó el flujo residual de la corriente, aplicando un filtro de pasa-baja, coseno de Lanczos de 121 pesos y periodo de corte de 40 horas y se realizó un análisis EOF vertical de la corriente residual.

Se utilizaron 4 mareógrafos que midieron entre el año 2021 y 2022, en canal Gajardo, Ventisquero y 2 en canal Fitzroy. Se realizó un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar y se comparó la amplitud de los principales componentes de marea, se calculó el coeficiente de Courtier "F" (Boon, 2004), para caracterizar el régimen de marea presente en Skyring y se realizó un análisis espectral del nivel del mar.

$$F = \frac{K_1 + O_1}{S_2 + M_2} \quad (1)$$

Si  $0 < F < 0,25$ , el régimen de mareas se clasifica como semi-diurno; si  $0,25 < F < 1,50$ , el régimen de marea se clasifica como semi-diurno mixto con una marcada desigualdad diaria en las alturas de las

pleamares y bajamares, si  $1,50 < F < 3,00$ , el régimen de mareas se clasifica como diurno mixto y si  $F > 3,0$ , el régimen de mareas se clasifica como diurno.

Se analizó una estación meteorológica HOBO ubicada en Punta verde ( $52^{\circ}39'7.48''S - 71^{\circ}29'26.7''W$ ), la estación registro desde febrero 2021 a agosto 2022, variables como; magnitud de la velocidad del viento, dirección del viento, PAR, presión atmosférica y temperatura del aire. Se utilizó la serie de tiempo de magnitud y dirección del viento, para calcular las componentes ortogonales del viento; U (este) y V (norte).

**Tabla 1:** Información de instrumentación utilizada en mediciones seno Skyring 2021 - 2022.

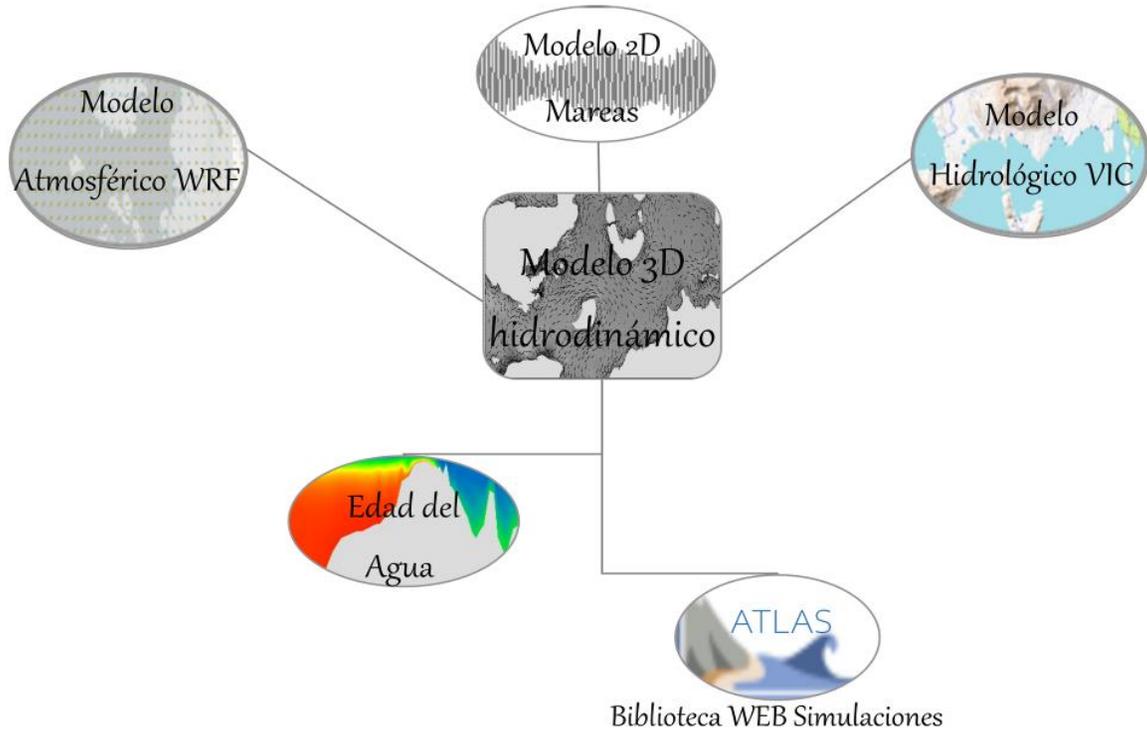
| Instrumento                    | Latitud (Sur) | Longitud (oeste) | Fecha inicio | Fecha final | Z (m)        |
|--------------------------------|---------------|------------------|--------------|-------------|--------------|
| Mareógrafo Canal Gajardo       | 52°50'59.38"  | 72°54'0"         | 27/11/2021   | 10/07/2022  | 8.3          |
| Mareógrafo Ventisquero         | 52°37'39.43"  | 72°51'55.29"     | 27/11/2021   | 10/07/2022  | 3.4          |
| Mareógrafo Canal Fitzroy norte | 52°40'15.56"  | 71°27'28.54"     | 27/11/2021   | 10/07/2022  | 8.5          |
| Mareógrafo Canal Fitzroy sur   | 52°47'30.80"  | 71°24'4.17"      | 27/11/2021   | 10/07/2022  | 3.8          |
| ADCP RDI Canal Gajardo         | 52°44'34.58"  | 72°44'23.20"     | 27/11/2021   | 10/07/2022  | 6.9 - 82.9   |
| ADCP ROWE Isla Escarpada       | 52°35'3.84"   | 72°19'9.11"      | 27/11/2021   | 10/07/2022  | 13.4 - 101.4 |

### 3.1.2 Modelos numéricos

Simular la hidrodinámica del seno Skyring requirió de información de aquellos forzantes que forman parte del balance dinámico de este lugar, tales como; las descargas de agua dulce, el viento, las mareas (**Fig. 1**), y la geometría del reservorio dada por la batimetría.

Para otorgar una mejor descripción de la fluctuación de estos forzantes, se implementaron una serie de modelos (con sus respectivas validaciones) con el fin de obtener la variabilidad espacial y temporal de estos forzantes. A continuación, se hace una descripción de cada uno de estos elementos que pueden sintetizarse en la **Fig. 1**. Este esquema, además de los modelos que otorgaron los forzantes,

incluyó la modelación de los tiempos de intercambio de agua, mediante el método de la edad del agua y la publicación de esta información en un portal WEB (chonos.ifop.cl), estos se detallan respectivamente en los objetivos 2 y 3 de este informe.



**Figura 1:** Esquema del sistema de modelación y distribución de información del estudio.

### 3.1.2.1 Modelo Atmosférico WRF:

La circulación marina en fiordos con entornos montañosos está fuertemente influenciada por el patrón de viento local, esto requiere de modelos atmosféricos con resolución suficientemente alta para resolver los impactos de la topografía en la circulación atmosférica (Myksovoll et al., 2012). Se modelaron las condiciones atmosféricas locales utilizando el modelo no hidrostático (WRF v. 3.5.1) (Skamarock et al., 2008), anidado dentro del sistema operacional NCEP con resolución espacial de 25 km (National Centers for Environmental Prediction, 2000). Para este caso se establecieron dos dominios (**Fig. 2**), siguiendo una relación de 1:3. El primero corresponde al padre y comprendió un área entre  $\sim 46 - 56.5^{\circ}\text{S}$  y  $\sim 65 - 81^{\circ}\text{W}$ , con resolución espacial de 9km. Y el segundo corresponde al

dominio hijo, alcanzando una resolución horizontal de 3 km y abarcando un área entre ~52.3 - 53°S y ~71 - 73°W.

Se han estimado los patrones de viento entre 2015-2017 con una resolución espacial de 3 km en el dominio seno Skyring. Por las características de la zona resultó complejo tener información observacional, lo cual, limita la validación del modelo, sin embargo, se cuenta con una estación meteorológica instalada por IFOP e información satelital que, aunque presenta un grado de incertidumbre, nos entrega información significativa de la variabilidad atmosférica en la región. La estación meteorológica, la cual se encuentra operando desde febrero de 2021, se encuentra ubicada en la localidad de río Verde al sur de seno Skyring (-52.64 °S -71.49 °O) y registra información de parámetros atmosféricos como presión, vientos, temperatura, entre otros cada 10 minutos (**Fig. 2**). La base de datos se encuentra disponible en la herramienta "Tiempo Real" dentro de la plataforma de información oceanográfica CHONOS ([www.ifop.cl/chonos](http://www.ifop.cl/chonos)). De forma complementaria se ha utilizado la base de datos CCMP Wind Vector Analysis Product (<https://www.remss.com/measurements/ccmp/>) el cual, es un producto grillado de vientos superficiales producido mediante una combinación satelital, boyas ancladas y viento modelado. Con una resolución espacial de 0.25° x 0.25° y una resolución temporal diaria para 2021 y campos de viento mensual para el periodo 2015-2017.

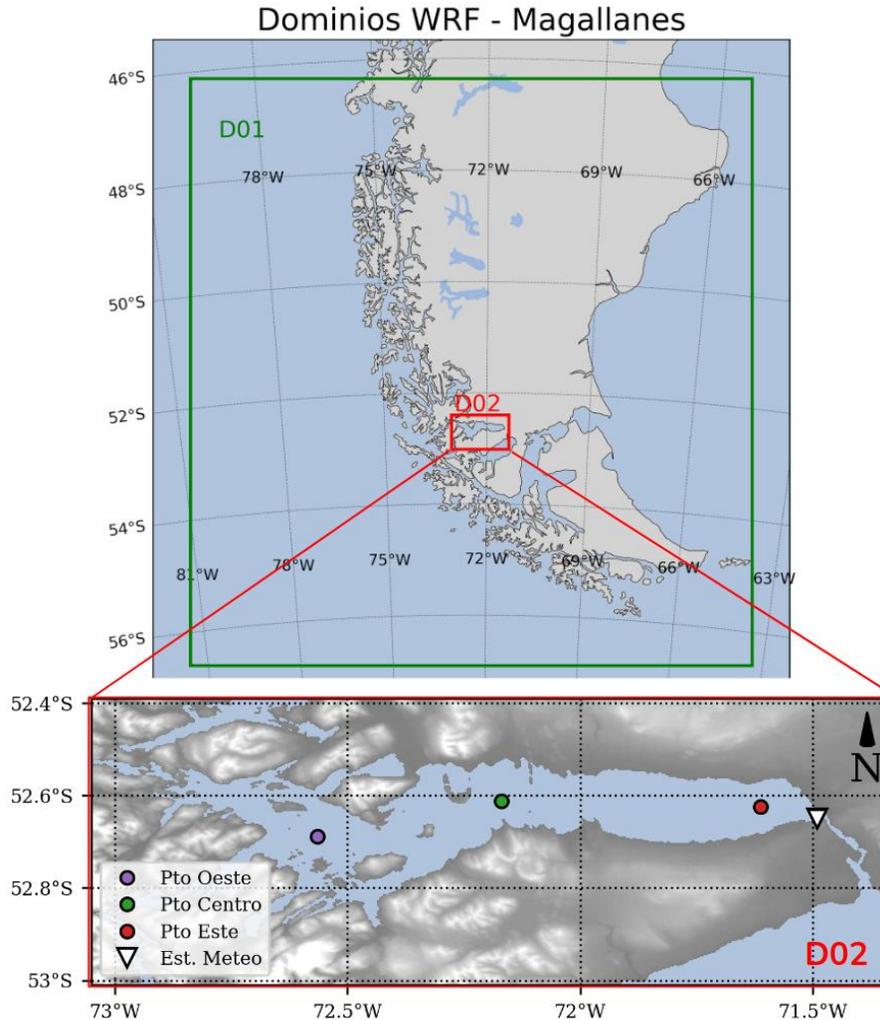
Para determinar la habilidad del forzante atmosférico en reproducir las componentes de los vientos se compararon las series de tiempo horarias de la estación meteorológica y CCMP con las estimaciones de WRF mediante gráficas de rosas de viento. El análisis se efectúa de manera estacional y de forma exploratoria debido a la escasa disponibilidad de los datos observacionales. Por otro lado, la magnitud del viento se evalúa mediante una comparación espacial entre la modelación atmosférica WRF y el producto CCMP. Para aquello se interpoló linealmente la grilla del producto CCMP al dominio WRF y se determinaron los campos estadísticos de correlación y raíz del error cuadrático medio. El primero nos permite determinar la relación lineal entre las bases de datos, mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r_{yx}$ ) el cual se define como el cociente entre la covarianza de lo modelado y observado y el producto de las desviaciones estándar, es decir:

$$r_{yx} = \frac{cov_{yx}}{S_y S_x} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}) \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})}$$

donde  $YY$  corresponde a la base de datos modelada y  $XX$  a la observada. El valor del coeficiente va desde -1 a 1, mientras más cercano a 1 la relación se ajusta linealmente, a 0 no existe relación y a -1 la relación se vuelve indirecta. El segundo estadístico nos da medida de la diferencia en promedio entre ambas bases de datos, matemáticamente se define como:

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

Donde  $YY$  y  $XX$  corresponden a cada una de las series de tiempo modelada y observada respectivamente y  $N$  al largo de las series. Cuanto menor es el valor RMSE, mejor es la capacidad predictiva de un modelo en términos de su desviación absoluta.



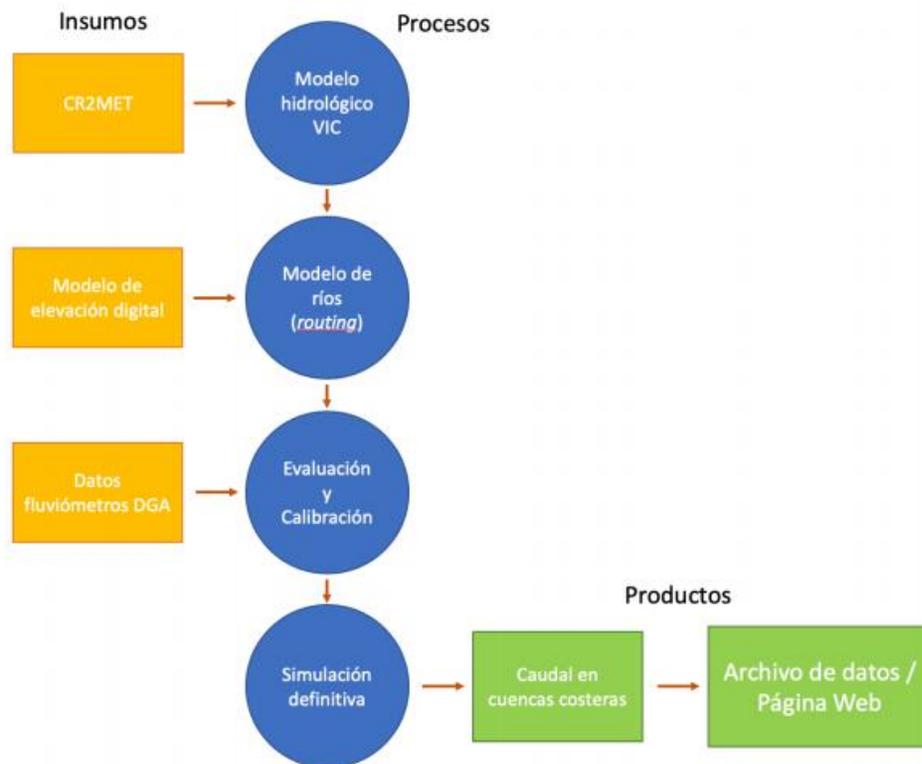
**Figura 2:** Dominios establecidos para la simulación atmosférica (WRF), con resolución espacial de 9km (D01) y 3 km (D02). Se muestran 3 posiciones (Pto. este, centro y oeste) para la descripción de los vientos a lo largo del seno Skyring. El triángulo blanco indica la posición de la estación meteorológica operada por IFOP.

### 3.1.2.2 Modelo hidrológico VIC:

La información de la Dirección General de Aguas (DGA) en esta zona es muy escasa, por lo cual, fue necesario utilizar información que permitiera una cobertura espacial y temporal sobre la descarga de agua dulce al sistema marino de seno Skyring.

Los caudales de ríos que desembocan en el sistema marino han sido simulados con el modelo hidrológico VIC (Liang et al., 1994) que es alimentado con series de precipitaciones y temperatura del producto grillado CR2MET (<http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>) de una resolución espacial de

5 x 5 km. Con esa información, VIC simula la escorrentía en intervalos horarios mediante la cual se calculan series diarias de caudales en una red hidrográfica sintética (obtenida a partir de información satelital) para el dominio de análisis. Luego de un proceso de calibración realizada con observaciones fluviométrica de la DGA, en la cual algunos parámetros del modelo VIC se ajustan para optimizar el desempeño del modelo determinado, el modelo es ejecutado para obtener estimaciones del caudal diario para el periodo 1980 a 2018, en todas las cuencas costeras del dominio espacial de la simulación. Toda la información de descargas en las cuencas marinas es desplegada en la plataforma Chonos de IFOP en <http://chonos.ifop.cl/aguadulce/visor>. El modelo VIC fue desarrollado para IFOP por la empresa consultora Meteodata Limitada. El sistema de modelación de agua dulce tiene varios componentes que se muestran en la **Fig. 3** y la **Tabla 2**.



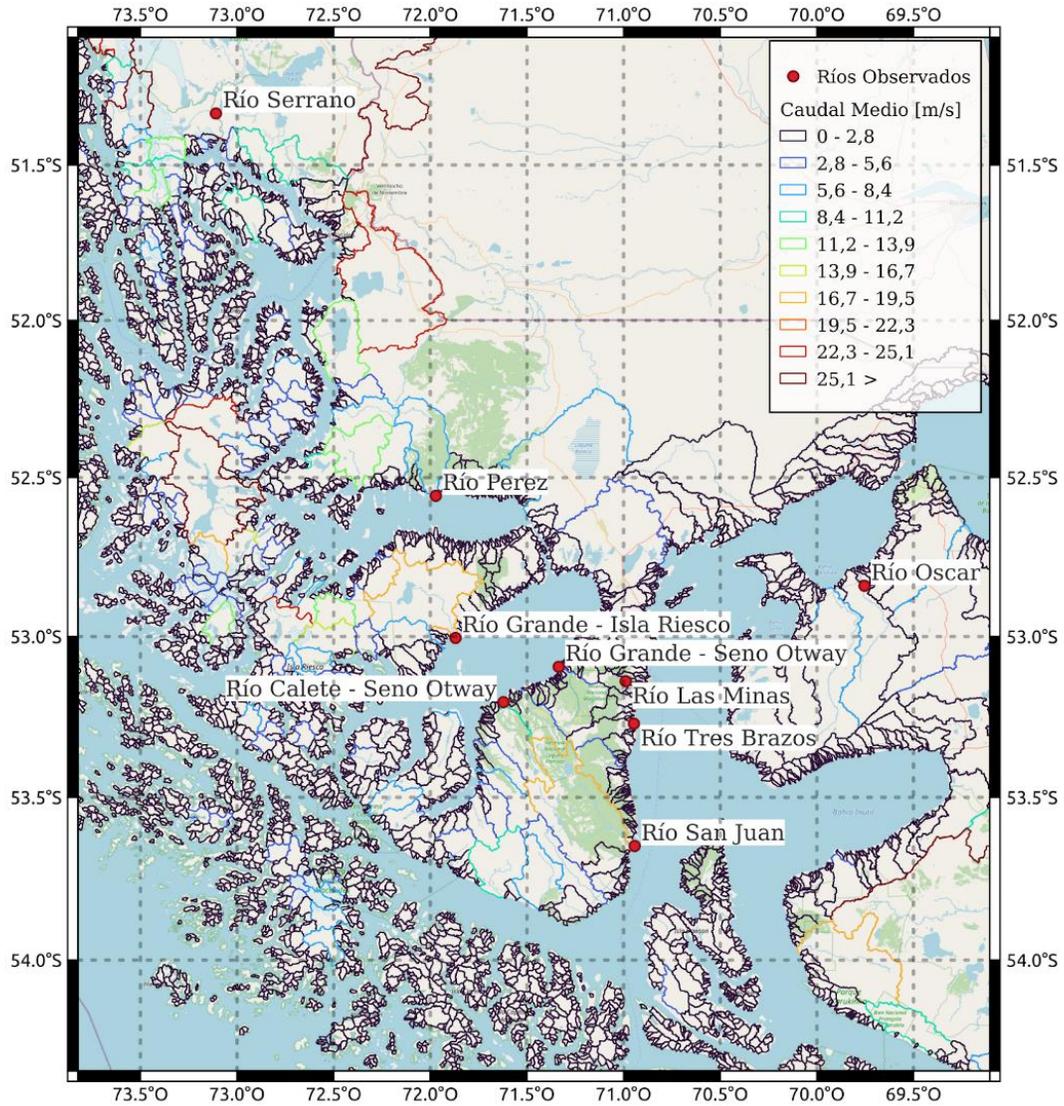
**Figura 3:** Esquema general del proceso de modelación y construcción de los productos del modelo hidrológico.

**Tabla 2:** Características del sistema de modelación

| Parámetros                   | Variable Infiltration Capacity (VIC)            |
|------------------------------|---|
| Resolución espacial          | 0.05° (aproximadamente 5 km)                    |
| Área de la simulación        | Territorio Chileno entre 41°S y 56°S            |
| Resolución temporal          | Diario  |
| Periodo de simulación        | 1980-2018                                       |
| Datos de entrada             | Base de datos CR2MET                            |
| Modelo terreno digital       | SRTM (90 metros de resolución)                  |
| Modelo para red hidrográfica | TauDEM  |
| Calibración y evaluación     | Datos fluviométricos de la DGA (~50 estaciones) |

La **Fig. 4** muestra la red de cuencas hidrográficas sintéticas estimada para el modelo VIC y las principales estaciones fluviométricas de la DGA en la región de Magallanes. Se utilizaron aquellas observaciones para determinar la habilidad del modelo en reproducir la variabilidad de los caudales en la región de Magallanes. Las series de tiempo fueron promediadas de manera mensual y comparadas con las simulaciones correspondientes a cada cuenca. Como forzante del modelo hidrodinámico se seleccionaron las 39 fuentes con mayor aporte de agua dulce en seno Skyring, las cuales representan según las estimaciones la mayor parte de la variabilidad en el sistema. De esta manera se utilizan los caudales estimados por el modelo VIC para caracterizar el forzante hidrológico de manera espacio-temporal y se exploraron las tendencias presentes en aproximadamente los 40 años de información simulada.

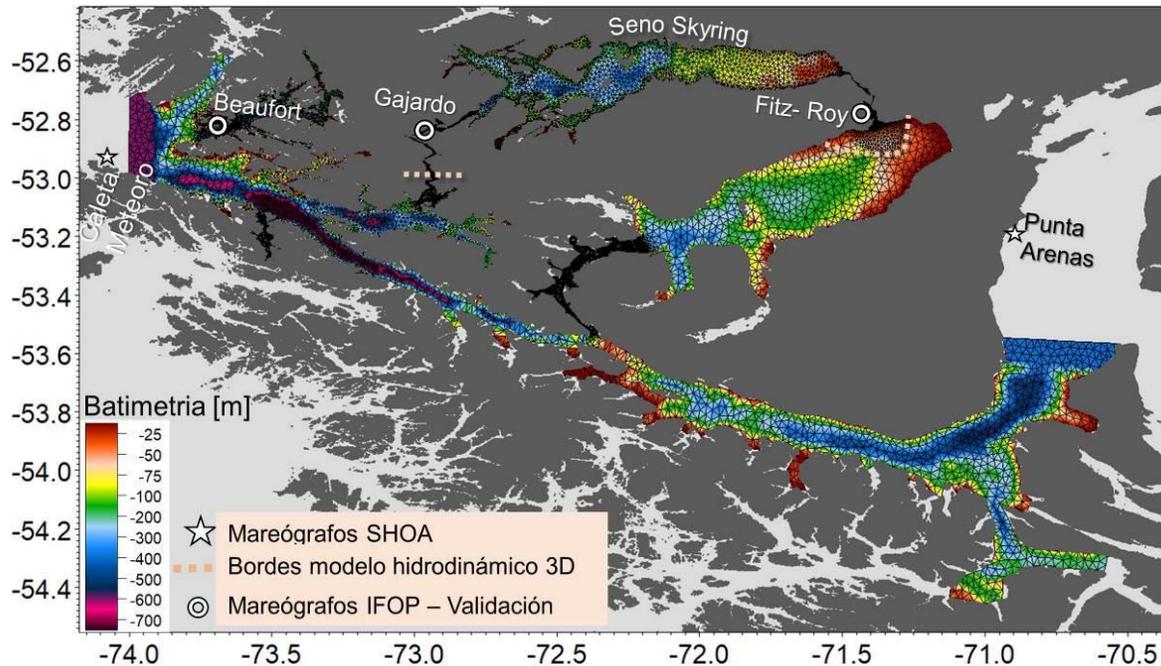
Para analizar las tendencias se aplicó el test de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975), método no paramétrico utilizado ampliamente para evaluar tendencias estadísticamente significativas en series de tiempo hidrológicas y climatológicas. Algunos ejemplos de trabajos en Chile donde se aplica el método son Pellicciotti, F. et al. (2007), Aguayo, R. et al. (2019), Medina y Muñoz (2020), Pérez, T. et al. (2018) y Sarricolea, P (2017). En este informe se consideran tendencias significativas aquellas que alcancen el nivel de confianza, 95% ( $p < 0.05$ ). Para estimar la magnitud de la tendencia se utilizó el método de la pendiente de Sen (Sen 1968). La pendiente de Sen es un método no paramétrico robusto que evalúa tendencias, con la ventaja de permitir la existencia de lagunas de datos y es altamente tolerable para valores escapados en la señal.



**Figura 4.** Estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) y cuencas hidrográficas sintéticas estimadas para la región de Magallanes.

### 3.1.2.3 Modelo 2D de mareas:

Para proveer condiciones de borde de nivel del mar, se implementó un modelo barotrópico (2D) con el fin de propagar la onda de marea desde el Estrecho de Magallanes, hacia la zona interior de seno Skyring, específicamente hasta los canales Gajardo y Fitz-Roy, sectores en donde están ubicados los bordes abiertos del modelo de alta resolución 3D hidrodinámico. El modelo barotrópico utiliza como condición de borde los constituyentes armónicos de los mareógrafos ubicados en Punta Arenas y caleta Meteoro (**Fig. 5**), bordes este y oeste respectivamente, cuya fuente pertenece al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).



**Figura 5:** Dominio y batimetría del modelo barotrópico, junto a puntos de observación del nivel del mar.

Para analizar y evaluar desempeño del modelo barotrópico se utilizan mediciones realizadas por IFOP durante el año 2012, en la bahía Beaufort y canales Gajardo (interior de seno Skyring) y Fitz-Roy (**Tabla 3**). Se realizó un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar en base a datos de estos mareógrafos (**Tabla 3**) y el modelo 2D. Los constituyentes obtenidos fueron utilizados para caracterizar el régimen de marea presente en el sistema Skyring mediante el coeficiente de Courtier "F" (ecuación 1) (Boon, 2004), el cual, se obtiene por la suma de las principales amplitudes diurnas dividido la suma de las principales amplitudes semidiurna.

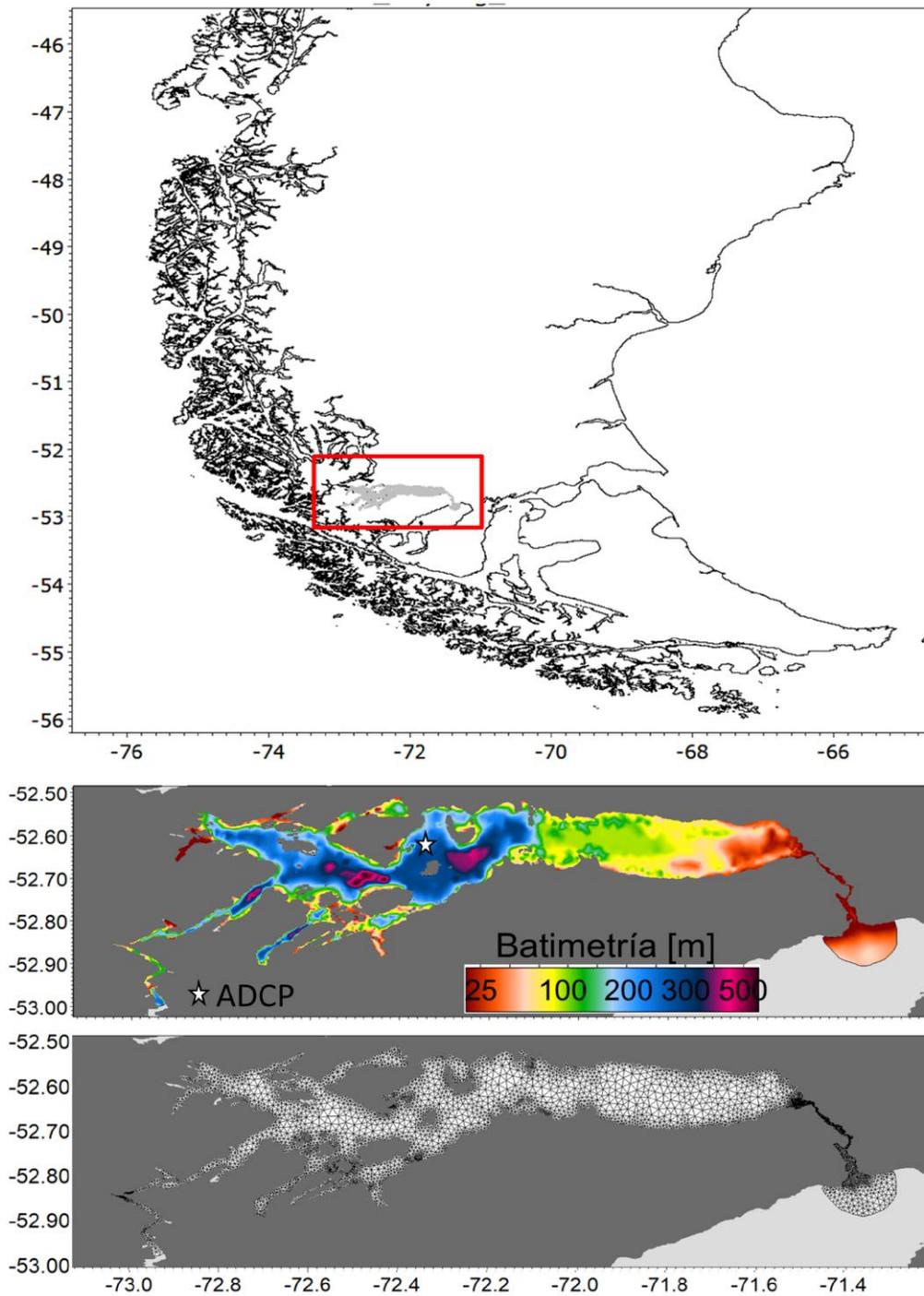
**Tabla 3.** Información de Mareógrafos instalados en la región

| Mareógrafo     | Latitud      | Longitud     | Intervalo de medición | Fecha<br>(inicio - final) |
|----------------|--------------|--------------|-----------------------|---------------------------|
| Bahía Beaufort | 52°47'22,5"S | 73°37'40,0"W | 10 min                | 20/10/2012 - 12/12/2012   |
| Canal Gajardo  | 52°49'30,4"S | 72°54'47,7"W | 10 min                | 27/10/2012 - 05/12/2012   |
| Canal FitzRoy  | 52°48'2,0"S  | 71°23'37,3"W | 10 min                | 29/04/2013 - 26/05/2013   |

### 3.1.2.4 Modelo hidrodinámico 3D (MIKE 3)

Se utilizó el modelo hidrodinámico 3D MIKE 3 FM (DHI, 2019) para el seno Skyring en la región de Magallanes. Este es un sistema de modelamiento en 3 dimensiones que considera la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Navier-Stokes utilizando el enfoque de Reynolds, los supuestos de Boussinesq y de presión hidrostática, por lo que el modelo consiste en las ecuaciones de conservación de masa y momentum, transporte de calor y de sal. Como algoritmo de solución de las ecuaciones indicadas, el modelo utiliza el método de volúmenes finitos centrados en cada celda. La estructura de discretización, triángulos de distintos tamaños (**Fig. 6**), permite un ajuste flexible de la resolución horizontal del modelo, por ejemplo, una alta definición del borde costero. Por esta razón, se considera que este tipo de solución es la adecuada para zonas de topografía compleja. En el plano vertical utiliza coordenadas sigma combinadas con rectangulares (denominadas Z), que permiten una mejor solución de la estratificación en las zonas con altos gradientes verticales de densidad (DHI, 2019).

El dominio del modelo está ubicado en un seno semicerrado de la región de Magallanes (**Fig. 6**), tiene 9927 elementos en la horizontal y se extiende desde el oeste por el canal Gajardo, incluyendo íntegramente el seno Skyring hasta el borde este que se encuentra a la salida del canal Fitz-Roy y el seno Otway (**Fig. 4**). La información batimétrica fue obtenida de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), reprocesadas e interpoladas linealmente mediante el método del vecino natural (Sibson, 1981). Se utilizan distintos tamaños de elementos de acuerdo con la geometría de la cuenca dejando aquellos lugares someros y estrechos con mayor resolución. Los sectores de menor resolución corresponden a las zonas más profundas (~500 m) del seno Skyring con una resolución aproximada de 1000 m, mientras que la mayor resolución (~100 m) se encuentra en los canales de conexión Skyring (**Fig. 4**). En la dimensión vertical el modelo está dividido en 45 capas combinadas sigma-cuadrangular, con mayor resolución en las capas superficiales, esto y algunos otros parámetros se pueden ver en la **Tabla 4**.



**Figura 6:** Ubicación del seno Skyring en la región de Magallanes, modelo digital de elevación basado en cartas náuticas SHOA y malla triangular con resolución variable. ☆ ADCP en isla Escarpada.

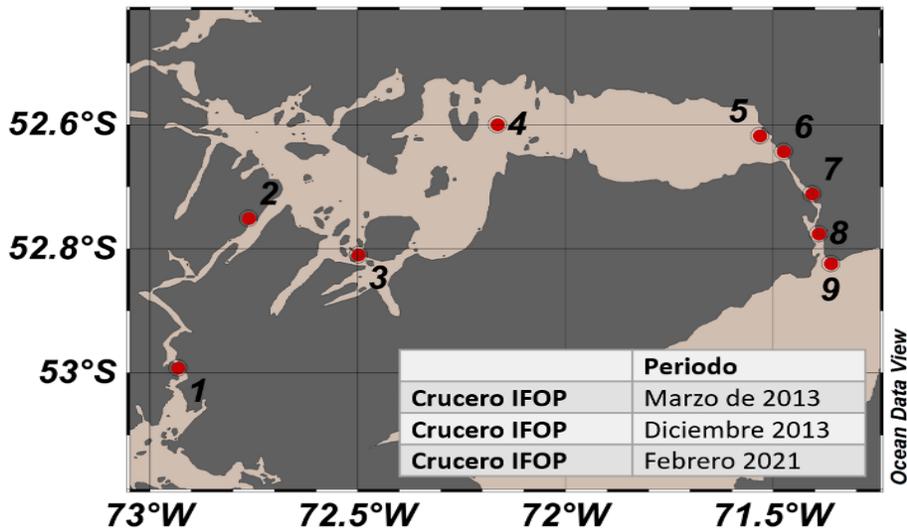
**Tabla 4:** Características de implementación del modelo hidrodinámico en seno Skyring

| Parámetros MIKE 3 FM  | Seno Skyring  |
|---|---|
| <i>Resolución espacial</i>  | <i>Variable ~100 a 1000 m</i>                           |
| <i>Resolución vertical</i>  | <i>45 capas sigma-Z / superficie ~1 m / fondo ~25 m</i> |
| <i>Resolución temporal</i>  | <i>300 s / (almacena datos horarios)</i>                |
| <i>Periodo de simulación</i>  | <i>01-07-2015: 31-12-2017 (2.5 años)</i>                |
| <i>Condiciones de borde</i>   | <i>Climatología CTD -IFOP</i>                           |
| <i>Forzante atmosférico</i>   | <i>WRF-IFOP 1 Km</i>                                    |
| <i>Ríos</i>   | <i>VIC-IFOP</i>   |
| <i>Modelo de turbulencia</i>  | <i>Esquema k-epsilon</i>                                |
| <i>Tiempo de cómputo para simular 1 año (servidor Intel-32 núcleos)</i> | <i>~22 días</i>   |
| <i>Periodo de estabilización (spin up)</i>                              | <i>8 años</i>   |

Las condiciones de borde de nivel del mar, en los canales de conexión fueron extraídas de modelo barotrópico, detallado en el punto 3.1.2.3. En cuanto a los bordes de temperatura y salinidad fueron utilizados observaciones provenientes de perfiles de CTD realizados en campaña oceanográfica por IFOP, durante el año 2012 (Pinilla et al., 2013) en aquella zona, esta condición de borde es variable en el tiempo. Para las condiciones iniciales referidas a temperatura y salinidad fueron utilizadas el paso de tiempo final del periodo de estabilización del modelo (spin-up), este periodo de estabilización tomó un tiempo de 8 años, para el periodo 2016-2017 se realizó una simulación en bucle hasta alcanzar el periodo de equilibrio.

### 3.1.2.5 Evaluación modelo hidrodinámico:

Para la evaluación de las propiedades físicas (salinidad y temperatura) del modelo se utilizaron diferentes mediciones de CTD realizadas por IFOP en años anteriores (Pinilla et al., 2015), las cuales, permitieron caracterizar la hidrografía del sistema marino de Skyring y su entorno. Además, se extrajo información específica de estaciones oceanográficas (**Fig. 7**) para realizar una comparación con los datos extraídos del modelo, a través de diagramas TS, los cuales fueron elaborados mediante el software ODV (Schlitzer 2017).



**Figura 7:** Puntos de estaciones oceanográficas realizadas en los años 2013 y 2021.

Para cuantificar los grados de mezcla o estratificación vertical, basados en la salinidad, se utilizó el parámetro de estratificación  $\eta_s$ , siguiendo los procedimientos detallados en (Haralambidou *et al.*, 2010), posteriormente se seleccionaron estaciones determinadas, con mediciones de CTD en las diferentes campañas IFOP y se compararon con estaciones extraídas del modelo. El parámetro se obtiene de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\eta_s = \frac{(S_f - S_s)}{(S_f - S_s) * 0.5}$$

Donde  $S_f$ : salinidad de fondo,  $S_s$ : salinidad superficial. El valor del parámetro considera que cuando  $\eta_s < 0.1$  la columna de agua se encuentra completamente mezclada,  $\eta_s > 0.1$  indica que en la columna de agua se produce una mezcla parcial,  $\eta_s > 1$  la columna de agua está bien estratificada.

Finalmente, la capacidad del modelo hidrodinámico de reproducir los principales procesos que modulan la estructura temporal y espacial de las corrientes al interior del seno Skyring fue evaluada mediante un análisis de Función Ortogonal Empírica (EOF) (Thomson y Emery, 2014), contrastando las corrientes submareales modeladas y las provistas por un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante el año 2021, por un periodo ~ 7 meses, en el sector de isla Escarpada (-Lat. -52,60°, Long. -72,35°) (**Fig. 6**). El periodo de medición no coincide con el de modelación, sin embargo, el análisis de EOF permitió comparar la estructura vertical y temporal de las corrientes en ese sector. Se obtuvieron las corrientes submareales aplicando un filtro coseno de Lanczos con una potencia media de 40 h.

**3.2 Objetivo específico 2.2.2:** Calcular el intercambio de agua interanual mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico en Seno Skyring.

Durante la etapa anterior de este proyecto (2020-2021), se implementó un modelo para estimar el intercambio de agua en seno Skyring con la extensión de 1 ciclo anual, para esta etapa se extendió temporalmente la modelación para incluir la variabilidad interanual otorgado principalmente por el forzamiento atmosférico y de descargas de agua dulce.

El método de la edad del agua utilizado en este estudio forma parte de una completa teoría que ha sido desarrollada en los últimos 20 años a través de teoría de la edad y tiempo de residencia orientada a los constituyentes, CART (Delhez et al., 1999, Deleersnijder et al., 2001). Para calcular la distribución de la edad del agua, se resuelven las ecuaciones de transporte para un trazador conservativo y para la concentración de la edad de acuerdo con la ecuación 1 y 2 (Delhez et al., 1999). Aquí la edad del agua se define como el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua, aquí el límite se refiere al borde abierto del modelo hidrodinámico, pero también a las entradas de agua dulce, entonces las cuencas interiores son renovadas por aguas de origen oceánico que penetran a través de los canales de conexión Gajardo y Fitz Roy y por los ríos. Como resultado, se deduce que las áreas con valores más altos de edad del agua son aquellas donde la parcela de agua ha estado dentro del sistema durante más tiempo. Este método ya ha sido utilizado en otros fiordos patagónicos (Pinilla et al., 2020a).

$$\frac{\partial c(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(u c(t, \vec{x}) - K \nabla c(t, \vec{x})) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(u \alpha(t, \vec{x}) - K \nabla \alpha(t, \vec{x})) = c(t, \vec{x}) \quad (2)$$

Donde,  $c$  es la concentración del trazador,  $\alpha$  es la concentración de la edad,  $u$  es el campo de velocidad,  $K$  es el tensor de difusividad,  $t$  es el tiempo y  $x$  la posición. La edad media “ $a$ ” entonces puede calculada como:

$$a(t, \vec{x}) = \frac{\alpha(t, \vec{x})}{c(t, \vec{x})} \quad (3)$$

En este estudio, la edad del agua está implementada en el módulo Ecolab, este es un sistema de modelación numérico que se acopla al modelo hidrodinámico MIKE 3 FM ya implementado. El trazador pasivo que ingresa por los ríos y por los bordes abiertos, o sea el agua nueva, tiene una concentración de 1 y una edad de 0 y va aumentando a medida que esa parcela de agua permanece al interior del sistema. Las condiciones iniciales para  $c$  se igualan a cero.

**3.3 Objetivo específico 2.2.3:** Implementar un modelo simple y semi-empírico de la dinámica de oxígeno disuelto en seno Skyring.

Se implementó un modelo simple de oxígeno disuelto (OD) basado en el trabajo realizado por Hong y Shen (2013) en la bahía de Chesapeake, Estados Unidos. Este modelo fue acoplado al modelo hidrodinámico MIKE 3 FM y su dinámica está controlada mediante el transporte neto de OD (advección-difusión), el consumo de oxígeno biogeoquímico tanto en la columna de agua como en sedimentos, y la re-aireación, que es ingreso de OD por la superficie marina en función de la intensidad del viento. Los procesos acotados involucrados en la dinámica del OD en este modelo se pueden describir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial O}{\partial t} + u \frac{\partial O}{\partial x} + v \frac{\partial O}{\partial y} + w \frac{\partial O}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} A_v \frac{\partial O}{\partial z} - B_c \quad (4)$$

Donde  $O$  es la concentración de OD en la columna de agua;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  son los componentes horizontales y vertical de la corriente respectivamente;  $A_v$  es la difusividad turbulenta, todas estas expresiones calculadas por el modelo hidrodinámico; y  $B_c$  es la tasa de consumo de oxígeno del carbono orgánico y otros procesos en la columna de agua. Esta tasa será utilizada para tener en cuenta el oxígeno neto perdido en la columna de agua. Cabe señalar, que no se simula la dinámica del fitoplancton, importante en la generación de OD en la columna de agua.

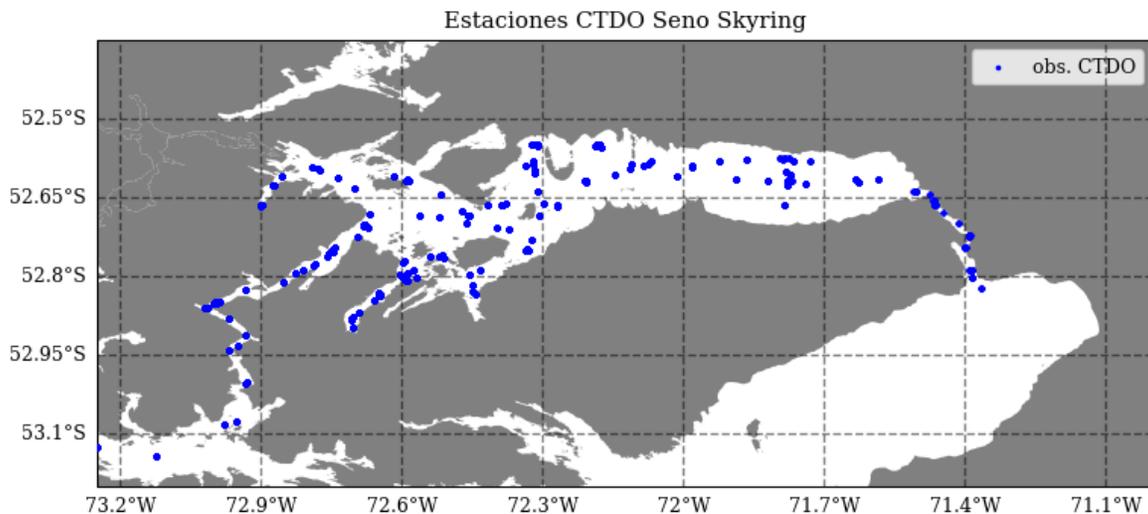
En la superficie del agua ( $z = 0$ ),  $A_v \frac{\partial o}{\partial z} = \theta_s$  ,

donde  $\theta_s$  es el flujo de oxígeno en la superficie (re-aireación).

En la interfaz agua-sedimento ( $z = H$ ),  $A_v \frac{\partial o}{\partial z} = SOD$

Donde SOD es la demanda de oxígeno del sedimento. Tanto  $B_c$  como SOD, fueron parámetros que fueron calibrados a partir de los valores obtenidos por Hong y Shen (2013) en la bahía de Chesapeake. Para esta primera etapa de simulación, se consideró un valor de  $B_c$  igual a  $0.014 \text{ gm}^{-3}\text{d}^{-1}$ , mientras que la demanda de oxígeno del sedimento SOD fue prescrita a  $1.5 \text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ .

Tanto para las condiciones de borde como para las condiciones iniciales del modelo, se realizó una interpolación bidimensional para cada capa de profundidad dentro del dominio de Skyring, lo cual fue llevado a cabo a partir de los datos obtenidos de campañas realizadas por IFOP en los periodos 2012, 2021, y 2022 (**Fig. 8**). De esta manera, se generaron condiciones iniciales robustas que facilitan al sistema llegar a una estabilización. Se consideraron fuentes de ingreso de OD que corresponden a la concentración proveniente de los ríos con un valor constante de  $15 \text{ mg L}^{-1}$ , basado en los mismos datos históricos mencionados anteriormente. Además, se realizaron 4 ciclos de simulaciones para el periodo 2016, con el fin de que el sistema lograra alcanzar un equilibrio otorgado por las condiciones de bordes, condiciones iniciales y descarga de ríos.



**Figura 8.** Estaciones CTDO en Seno Skyring, periodos 2012, 2021 y 2022.

El uso de este modelo de OD simplificado no tiene el propósito de predecir el OD en función de la entrada de nutrientes y la dinámica del fitoplancton, sino de capturar las variaciones de OD en función de procesos biológicos acotados y de parámetros observados, lo que permite realizar un diagnóstico de la influencia de los procesos físicos en la dinámica de OD en los fiordos de la Patagonia, si el modelo no responde adecuadamente bajo estos supuestos, entonces la dinámica responde a otro tipo de procesos ya sean biológicos y/o químicos más complejos, sobre los cuales es necesario complejizar el modelo utilizado.

**3.4 Objetivo específico 2.2.4:** Generar mapas de tiempos de intercambio de agua y de variables oceanográficas modeladas para el seno Skyring acoplados a la plataforma de información oceanográfica Chonos.

Para montar la información generada por este estudio a una plataforma de información geográfica, se utilizó el sistema de información oceanográfica CHONOS ([www.ifop.cl/chonos](http://www.ifop.cl/chonos)), creada como parte de un sistema de distribución de información derivada de estudios oceanográficos llevados a cabo por el grupo de Oceanografía y Clima de la División de Investigación en Acuicultura de IFOP con asiento en Castro, Chiloé. Este sistema, de acceso libre, integra diferentes productos, especialmente aquellos derivados de modelos numéricos. La plataforma está dividida en distintas herramientas con resultados directos de modelos de pronósticos oceanográficos (MOSA-ROMS), visualizador interactivo de dispersión de partículas (Parti-MOSA) y una herramienta para calcular conectividad hidrodinámica entre diferentes regiones en base escenarios de riesgo (CLIC).

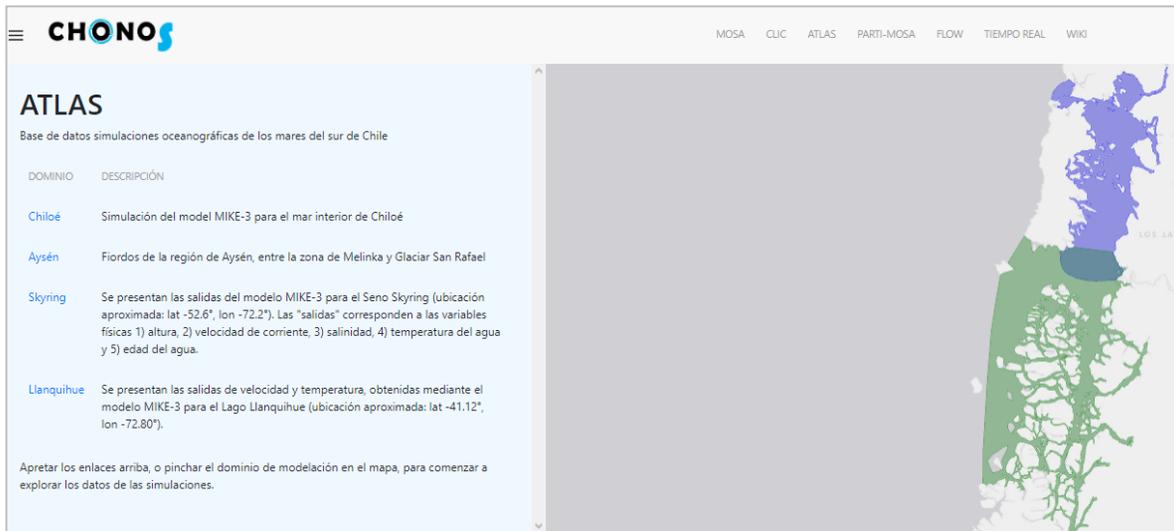
Para el caso de los resultados de este proyecto, se diseñó la herramienta ATLAS específicamente para distribuir la información de este tipo.

**3.5 Objetivo específico 2.2.5:** Actualizar periodo modelación en los modelos hidrodinámicos ya implementados en la región de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para visualización en plataforma Chonos.

La herramienta ATLAS dentro la plataforma Chonos cuenta con información de modelos hidrodinámicos generados para los mares interiores de la X y XI regiones (**Fig. 9**). Estos se encuentran disponibles para el periodo 2015-2018 y su configuración puede verse en detalle en la **Tabla 5**. Resultados y análisis pueden verse en Pinilla et al. 2020b.

Se realizó una actualización del periodo de modelación hasta diciembre 2021, manteniendo la misma configuración detallada en la **Tabla 5**. Para esto fue necesario actualizar toda la base de datos de forzantes que utiliza el modelo hidrodinámico, principalmente sobre el modelo hidrológico FLOW-IFOP y sobre el modelo atmosférico WRF-IFOP. Este objetivo no buscó realizar análisis oceanográfico alguno sobre el nuevo periodo de modelación, sino más bien, poner a disposición de distintos usuarios la base de datos actualizada como una herramienta operacional. Cabe resaltar que el uso de esta

información se ha ido incrementando en el tiempo tanto por investigadores, estudiantes y tomadores de decisiones.



**Figura 9.** Vista general de la interfaz de ATLAS dentro de la plataforma Chonos. Las zonas achuradas representan la cobertura con modelos hidrodinámicos disponibles.

**Tabla 5:** Características de implementación de modelos hidrodinámicos para la X y XI regiones.

| <i>Parámetros MIKE 3 FM</i>   | <i>R1-Chiloé</i>   | <i>R2-Aysén</i>  |
|---|--|--|
| <i>Resolución espacial</i>  | <i>Variable ~200 a 1300 m</i>                                | <i>Variable ~200 a 1000 m</i>                                |
| <i>Resolución vertical</i>  | <i>55 capas sigma-Z<br/>superficie ~1 m,<br/>fondo ~20 m</i> | <i>40 capas sigma-Z<br/>superficie ~1 m,<br/>fondo ~25 m</i> |
| <i>Resolución temporal</i>  | <i>600 s<br/>(almacena datos horarios)</i>                   | <i>300 s<br/>(almacena datos horarios)</i>                   |
| <i>Periodo de simulación</i>  | <i>01-10-2015: 31-12-2018 (3 años)</i>                       | <i>01-01-2017: 31-12-2018 (2 años)</i>                       |
| <i>Condiciones de borde</i>   | <i>Climatología CTD -Cimar</i>                               | <i>Climatología CTD -Cimar</i>                               |
| <i>Forzante atmosférico</i>   | <i>WRF-IFOP 3 Km</i>   | <i>WRF-IFOP 3 Km</i>   |
| <i>Ríos</i>   | <i>VIC-IFOP</i>  | <i>VIC-IFOP</i>  |
| <i>Modelo de turbulencia</i>  | <i>Esquema k-epsilon</i>                                     | <i>Esquema k-epsilon</i>                                     |
| <i>Tiempo de cómputo para<br/>simular 1 año<br/>(servidor Intel-32 núcleos)</i> | <i>~12 días</i>  | <i>~22 días</i>  |
| <i>Periodo de estabilización<br/>(spin up)</i>                                  | <i>3 años</i>  | <i>4 años</i>  |

## 4. RESULTADOS

---

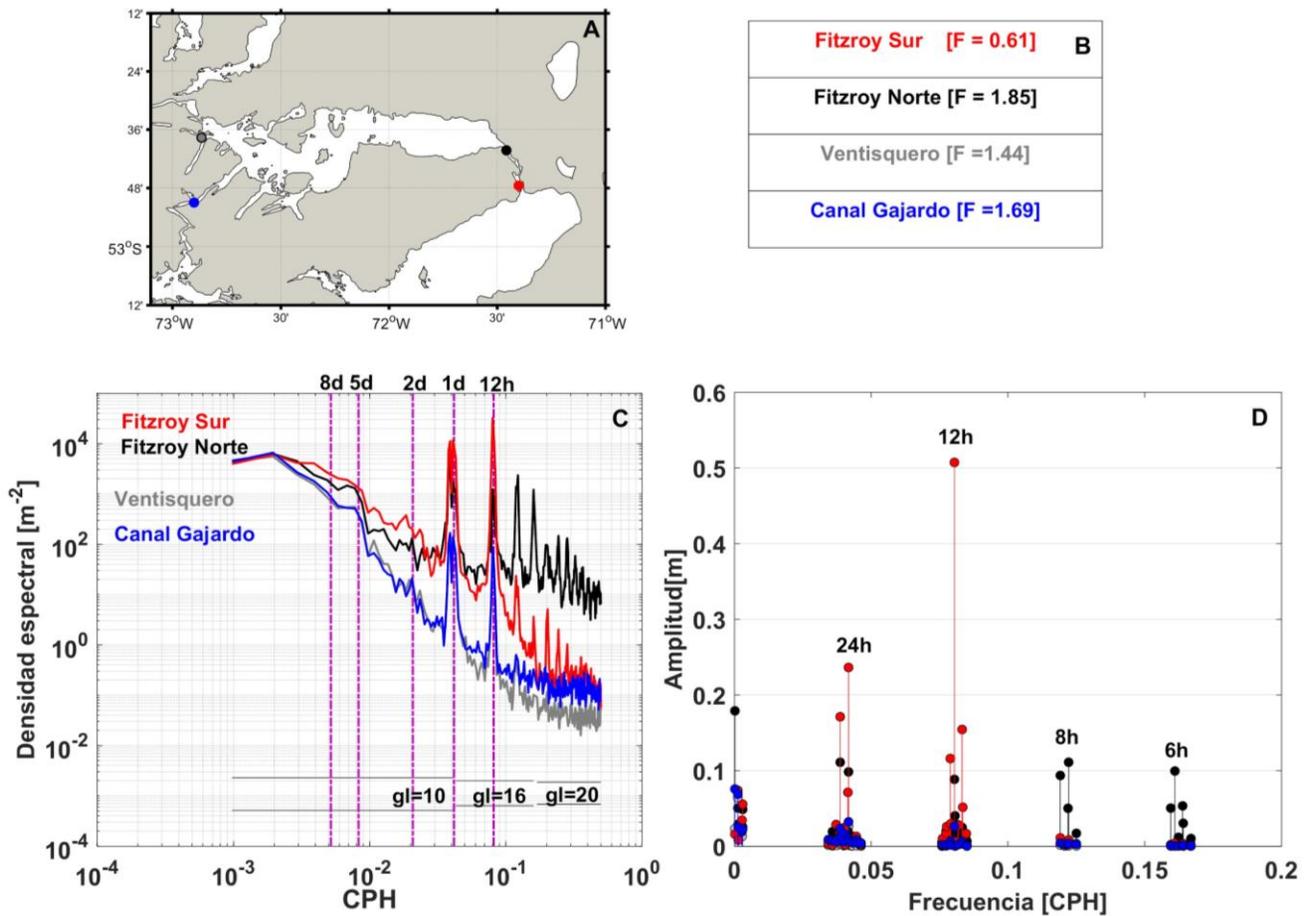
**4.1 Objetivo 2.2.1:** *Modelar hidrodinámicamente la variabilidad interanual del sistema marino de seno Skyring, Región de Magallanes y de la Antártica.*

A continuación, se presenta una caracterización con las mediciones realizadas durante 2021 y 2022 en Seno Skyring para proseguir con los resultados del modelo hidrodinámico.

### 4.1.1 Mediciones

#### 4.1.1.1 Mareas

La onda de marea que ingresa al sistema Skyring se propaga desde el Estrecho de Magallanes hasta las conexiones de canal Gajardo y canal Fitzroy. En ambos canales existen constricciones que alcanzan los 10 m (Fitzroy) y < 5 m (canal Gajardo, en algunos sectores alcanza la superficie). Los mareógrafos se desplegaron (**Fig. 10.a**) al norte de la constricción en Gajardo, en la entrada y salida de Fitzroy (la constricción en este canal es en el centro) y dentro del seno Skyring (Ventisquero). De acuerdo con el análisis Armónico y el coeficiente de Courtier " $F$ " (**Fig. 10.b**), el régimen de marea es semidiurno mixto ( $F = 0.61$ ) al ingresar por el sur al canal Fitzroy con una amplitud de 0.50 m para el constituyente  $M_2$  (**Fig. 10.d**), luego de la constricción, en Fitzroy norte, el régimen de marea es diurno mixto ( $F = 1.85$ ) pero con una amplitud más reducida (0.08 m) para el constituyente  $M_2$ . En el sector de Ventisquero (**Fig. 10.a**) el régimen de marea es semidiurno mixto ( $F = 1.44$ ) con amplitud aún más reducida (0.02 m) para el constituyente  $M_2$ . Mientras que, en el Canal Gajardo posterior a la constricción, el régimen de marea es diurno mixto ( $F = 1.69$ ) con amplitud de 0.02 m para el constituyente  $M_2$ . El análisis espectral del nivel del mar (**Fig. 10.c**) indicó alta varianza explicada por la señal diurna y semidiurna de la marea, además la varianza explicada por la señal mareal disminuyó posterior a las constricciones. Comparativamente, la energía de la señal de marea que ingresó por canal Gajardo es menor a la que ingresó por Canal Fitzroy.



**Figura 10:** Mareógrafos seno Skyring. a) mapa ubicación de mareógrafos, b) tabla de coeficiente de Courtyer "F", c) espectro de mareógrafos, d) Espectro de Amplitud de marea de mareógrafos de Fitzroy sur (rojo), Fitzroy norte (negro), Ventisquero (gris) y canal Gajardo (azul).

#### 4.1.1.2 Condiciones Meteorológicas

Las condiciones meteorológicas están dominadas por patrones regionales, en la **Fig. 11** se observó que el viento del oeste dominó a lo largo del año. En verano dominó viento del oeste de alta velocidad (> 10m/s) con recurrentes eventos de velocidad > 20 m/s, en otoño dominó viento del oeste y noroeste disminuyendo la velocidad comparativamente con verano, también se registraron vientos desde el noreste de baja velocidad (< 6 m/s), en invierno dominó viento del noroeste de baja velocidad (< 10 m/s), pero se registraron eventos esporádicos de alta velocidad (>10 m/s), en primavera dominó viento del oeste y noroeste de alta velocidad (< 10 m/s). El espectro de la velocidad del viento (**Fig. 12**) indicó

que la mayor energía espectral se concentró en la componente oeste-este del viento con un máximo significativo en la alta frecuencia a las 24 horas correspondiente al periodo diurno, también se observó un máximo dentro de la banda sinóptica; en 8 días.

En la **Fig. 13** se observó el promedio anual de la temperatura atmosférica y la radiación, componentes relevantes en estas latitudes por la inferencia en la precipitación líquida y sólida que ingresa a la zona, y la relación con en el régimen e ingreso de agua dulce al sistema, en Seno Skyring los aportes de agua dulce son de origen glaciar. La **Fig. 13.a** se observó el promedio anual de la temperatura atmosférica, donde la máxima temperatura se alcanzó en los meses de primavera/verano, en promedio las mayores temperaturas son en el periodo diciembre a febrero (11°C), en enero se registraron máximas de 24 °C, durante otoño e invierno la temperatura disminuyó con un promedio de 5 a 8 °C, registrando mínimas en julio, con un promedio de 2°C, la mínima temperatura registrada en julio (2022) alcanzó -11.29 °C. Durante periodos prolongados de temperaturas bajo cero combinado con las bajas salinidades presentes en Skyring elevan el punto de fusión del agua de mar y favorece la formación de hielo marino en fiordos, como se registró en julio del 2022; entre el 3 y 16 de julio se registraron temperaturas negativas, con una mínima de -11.29 °C y en contexto de crucero oceanográfico se registró hielo marino el día 8 de julio en fiordo Navarro, en el mismo periodo se constató ríos congelados y precipitación sólida. En la **Fig. 13.b** se observa el promedio anual de la radiación, esta es máxima en primavera/verano (octubre a marzo), con valores máximos alcanzados en noviembre y diciembre (2500 uE) y mínimas en invierno. Este ciclo anual se relaciona con los mayores ingresos de agua dulce al sistema por derretimiento de hielo.

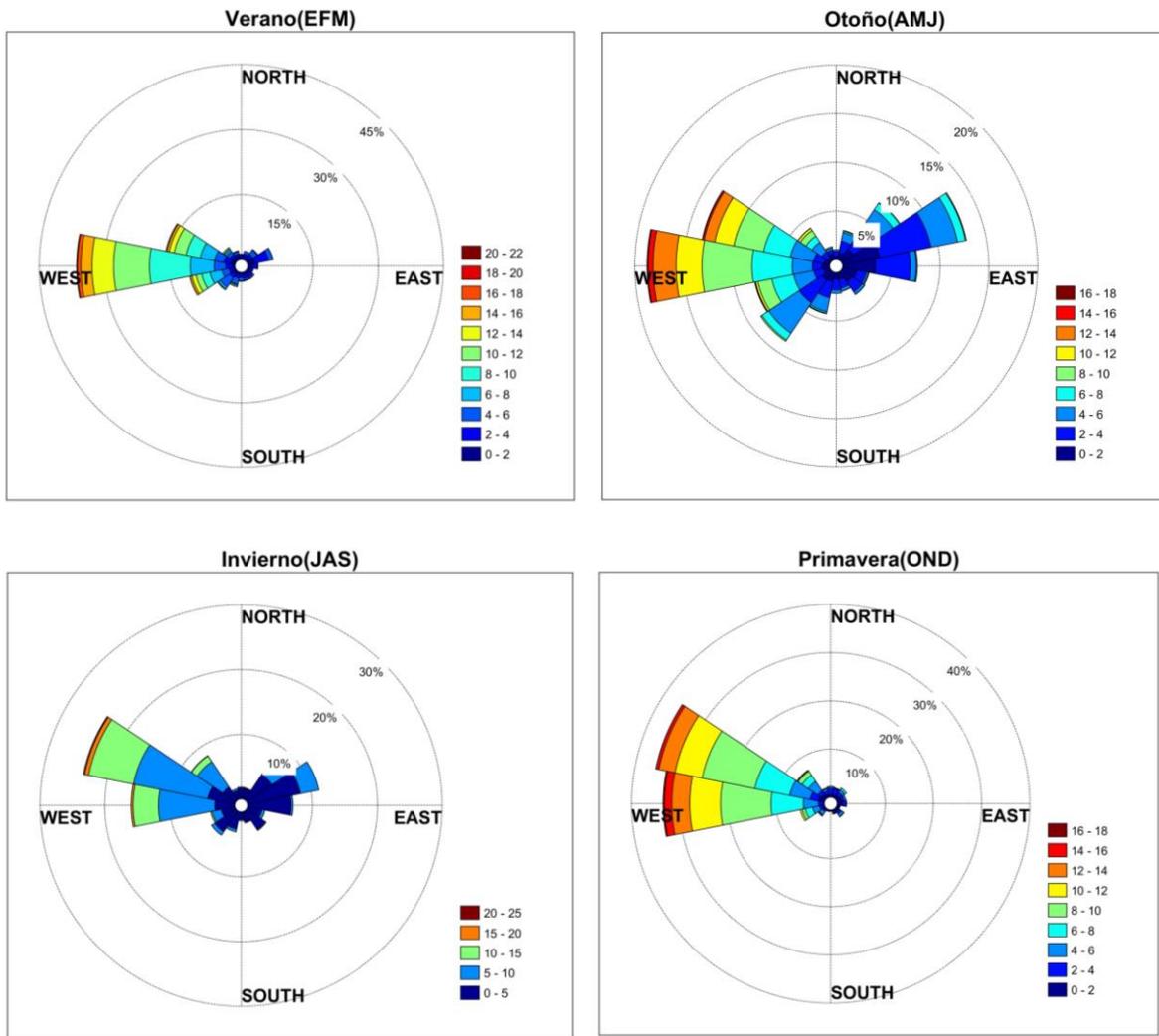
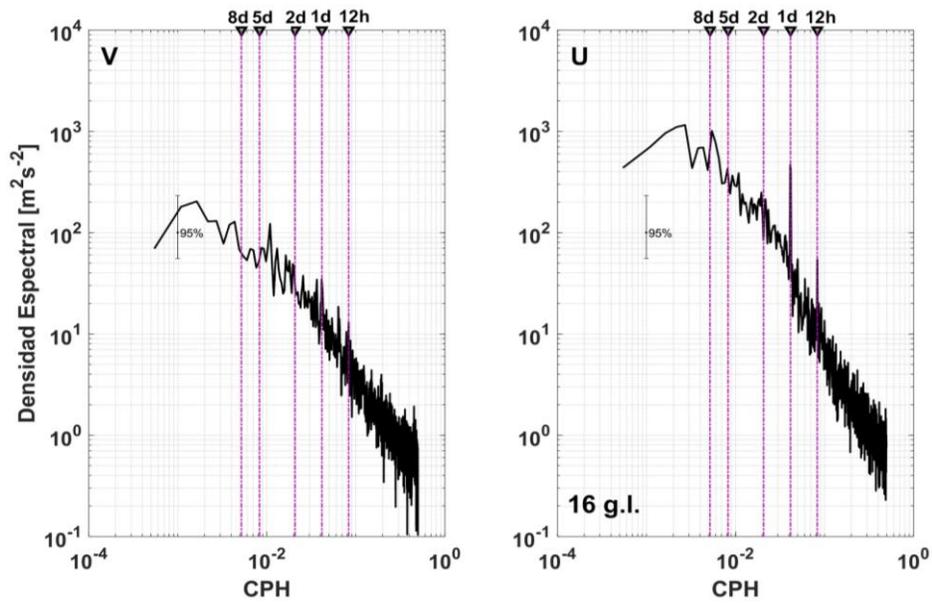
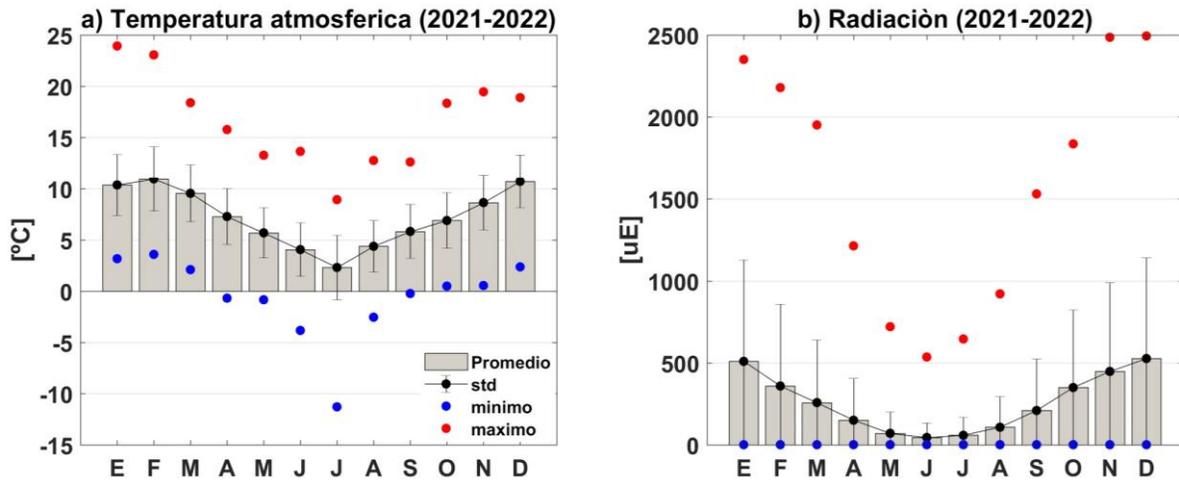


Figura 11: Dirección y velocidad del viento . Rosa de vientos. Verano, otoño, invierno y primavera.



**Figura12:** Espectro de la velocidad del viento. Panel izquierdo: espectro de la componente norte-sur del viento. Panel derecho: espectro de la componente oeste - este del viento.

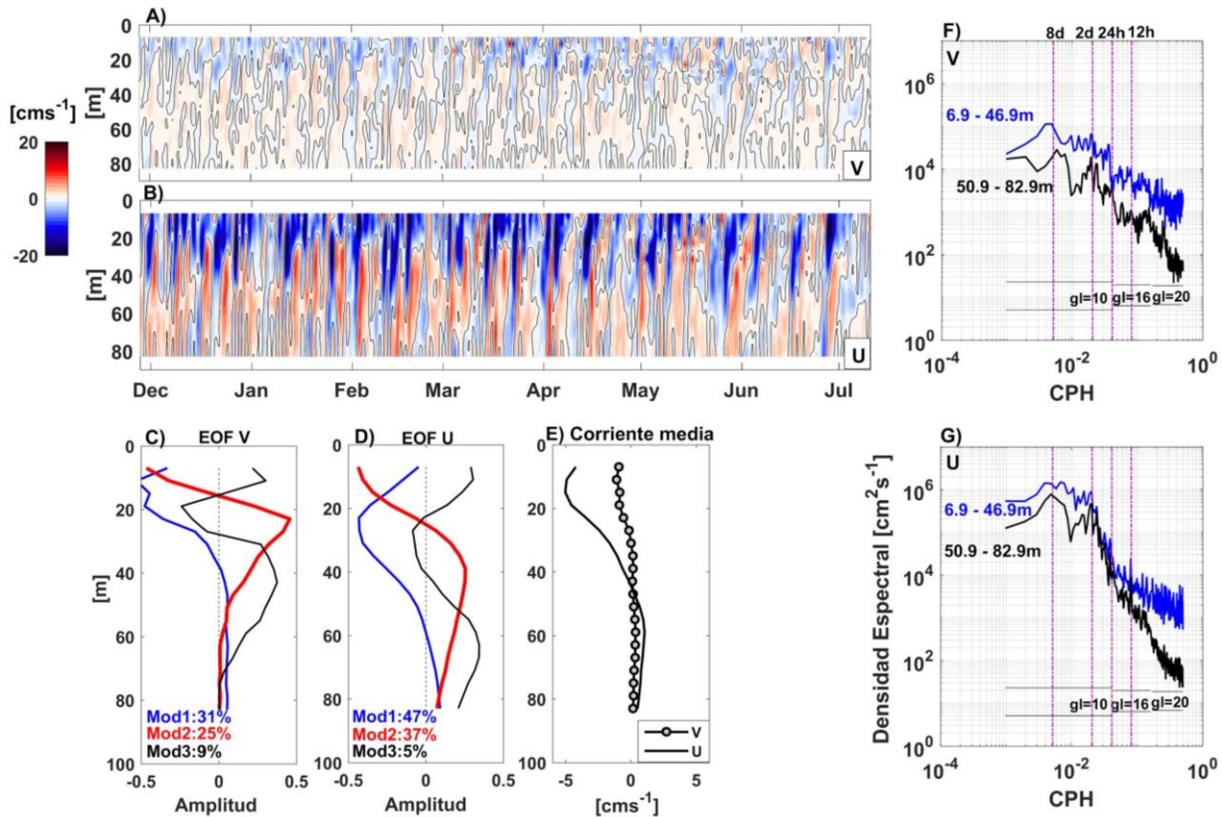


**Figura 13:** Temperatura y radiación mensual. a) temperatura atmosférica mensual y desviación estándar (puntos azules; mínima mensual, puntos rojos; máxima mensual), b) radiación mensual y desviación estándar (puntos azules; mínima mensual, puntos rojos; máxima mensual).

#### 4.1.1.3 Corrientes

La corriente medida en la salida norte de Canal Gajardo mostró que la corriente residual (**Fig. 14**) se alinea con el canal en un 81%, por lo tanto, la mayor variabilidad es explicada por la componente u, con tendencia a la elipticidad y velocidades que alcanzan los 25 cm/s. La serie de tiempo de la corriente residual (**Fig. 14.a y 14.b**), muestra la serie por componente, la componente v presentó bajas velocidades (< 10 cm/s), mientras que la componente u concentró las mayores velocidades, alcanzando los 25 cm/s. El perfil vertical promedio de la corriente a lo largo del canal (**Fig. 14.e**) mostró que tiene una estructura de dos capas; la capa superficial (ADCP: 7 m - 45 m) sale del canal (valores negativos, hacia fuera), la segunda capa (ADCP: > 45 m - 80 m) ingresa al canal (valores positivos), mientras que el perfil promedio a lo ancho del canal presentó dos capas con velocidades cercanas a cero.

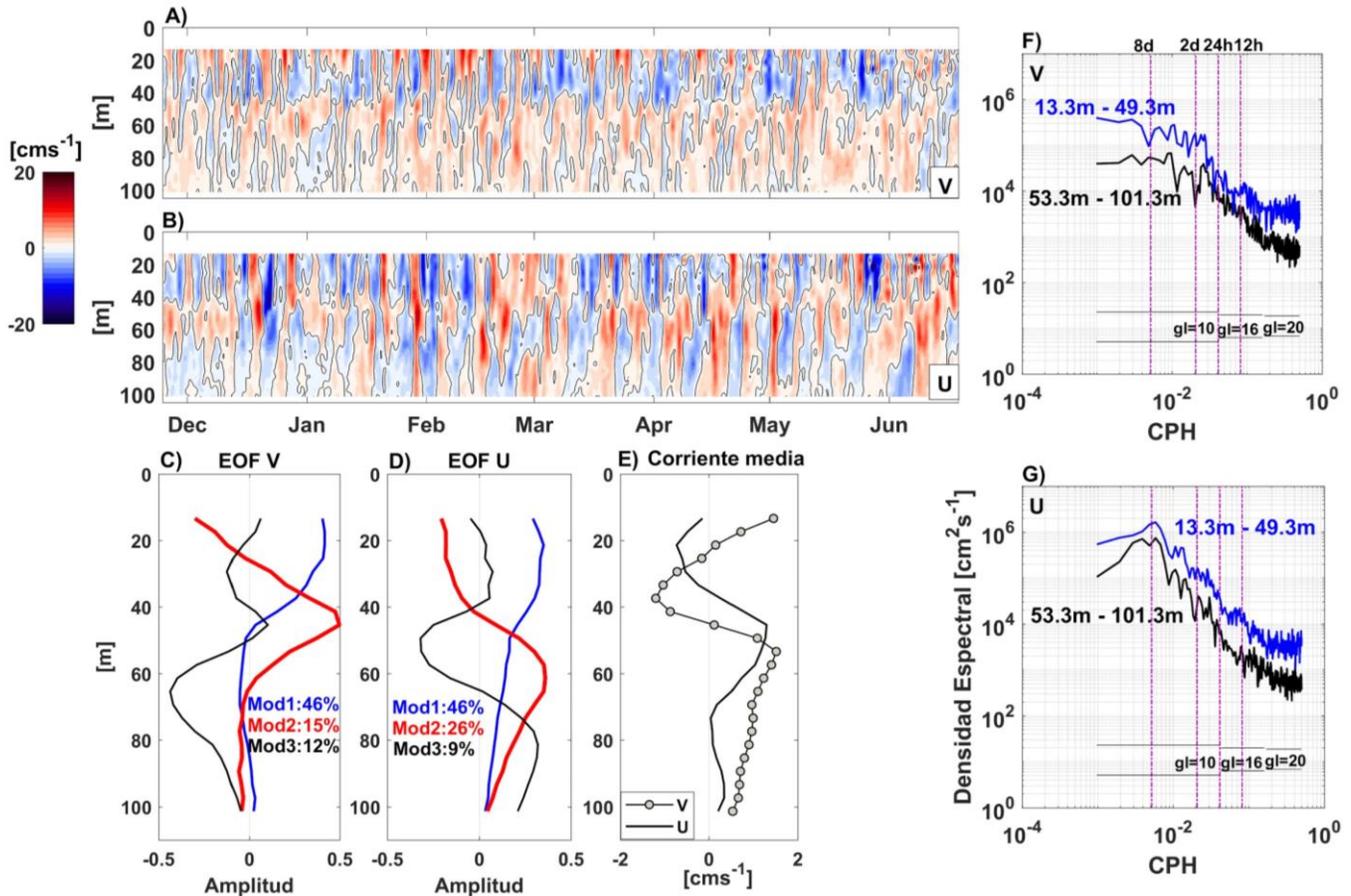
El análisis de EOF vertical de la corriente residual (**Fig. 14.c y 14.d**) mostró que el modo 1 y modo 2 explicó el 84% de la variabilidad total en ambas componentes, el EOF-u (**Fig. 14.d**) presentó una estructura de dos capas para el modo 1 y 2; el modo 1 explicó el 47% del total de la variabilidad y el modo 2 explicó 37% de la variabilidad. El modo 1 del EOF-u presentó una dirección al oeste entre los 7 m y 60 m de profundidad con una mayor amplitud entre los 20 m a 30 m, bajo los 60 m presentó una dirección al este del canal con una baja amplitud comparativamente. El modo 2 del EOF-u presentó una mayor amplitud en la capa superficial con dirección al oeste del canal (7 m a 25 m) que disminuye con la profundidad, la capa subsuperficial (> 25 m a 80 m) tiene dirección al este con una amplitud que disminuye con la profundidad. El EOF-v (**Fig. 14.c**) presentó una estructura de dos capas para el modo 1 y 2; el modo 1 explicó el 31% del total de la variabilidad y el modo 2 explicó 25% de la variabilidad. El análisis espectral de la corriente (**Fig. 14.f y 14.g**) indicó que la corriente u (a lo largo del canal) concentra mayor densidad espectral que la componente v, la variabilidad explicada semidiurna de la marea no es significativa en el canal Gajardo, la variabilidad explicada por la banda diurna alcanza un máximo significativo, pero es baja. La variabilidad de baja frecuencia, específicamente en la banda sinóptica destacan alta varianza en 8, 5 y 2 días.



**Figura 14:** Corriente residual Canal Gajardo. a) corriente residual componente v, b) corriente residual en la componente u, c) EOF de la componente v de la corriente residual, d) EOF de la componente u de la corriente residual, e) corriente promedio para componente u y v, f) espectro de la componente v de la corriente, g) espectro de la componente u de la corriente.

La corriente residual medida cercana a isla Escarpada (**Fig. 15**) mostró una dispersión que tiende a una dispersión orbital donde los ejes de máxima y mínima varianza explicaron el 55% y 44% de la variabilidad de la corriente respectivamente, la máxima velocidad que alcanzó la corriente es de 20 cm/s. La serie de tiempo de la corriente residual (**Fig. 15.a y 15.b**) en ambas componentes mostró periodos en donde hay un aumento de velocidad a media agua, sin embargo, la velocidad promedio es entre 1 cm/s y 2 cm/s. El perfil de la corriente residual promedio (**Fig. 15.e**) mostró un perfil de tres capas para la componente v; capa superficial (13.4 m - 21.4 m) la corriente fue al norte, la capa subsuperficial (25.4 m - 45.4 m) la dirección en promedio fue al sur, bajo los 45 m presentó dirección hacia el norte, el perfil promedio de la componente u presentó dos capas; superficial (13.4 m - 33.4 m) hacia oeste y subsuperficial (37.4 m - 100 m) la corriente presentó dirección al este y alcanzó una máxima velocidad (1.5 cm/s) a los 45.4 m disminuyendo con la profundidad.

El análisis de EOF vertical de la corriente residual (Fig. 15.c y 15.d) indicó que el modo 1 explicó el 46% de la variabilidad total en ambas componentes, el modo 2 explicó el 15% en la componente v y el 26% de la variabilidad total en la componente u, la amplitud de los modos fue baja ( $< 0.5$ ), en la componente v ambos modos presentaron una estructura de 3 capas y el EOF de la componente u mostró una estructura de 1 capa (modo 1) y de 2 capas (modo 2). El análisis espectral de la corriente (Fig. 15.f y 15.g) mostró que en ambas componentes no existe una señal significativa ni tampoco un máximo en las bandas diurna y semidiurna, la mayor energía espectral se observó en la componente u en la banda sinóptica con un máximo en los 8 días.



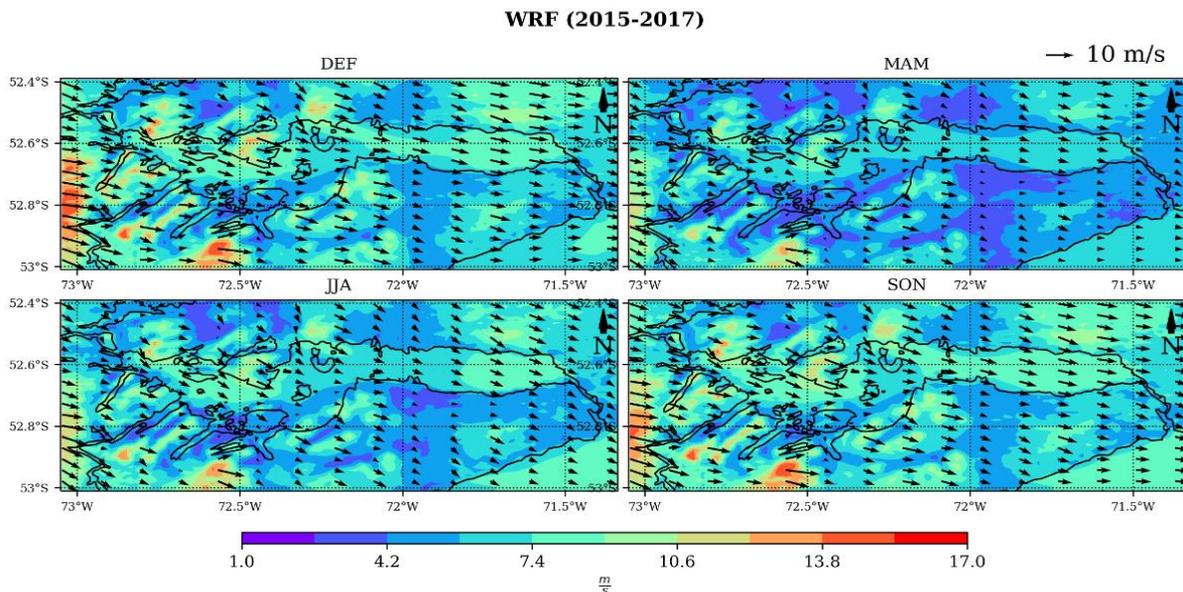
**Figura 15:** Corriente residual Escarpada. a) corriente residual componente v, b) corriente residual en la componente u, c) EOF de la componente v de la corriente residual, d) EOF de la componente u de la corriente residual, e) corriente promedio para componente u y v, f) espectro de la componente v de la corriente, g) espectro de la componente u de la corriente.

#### 4.1.2 Modelos numéricos

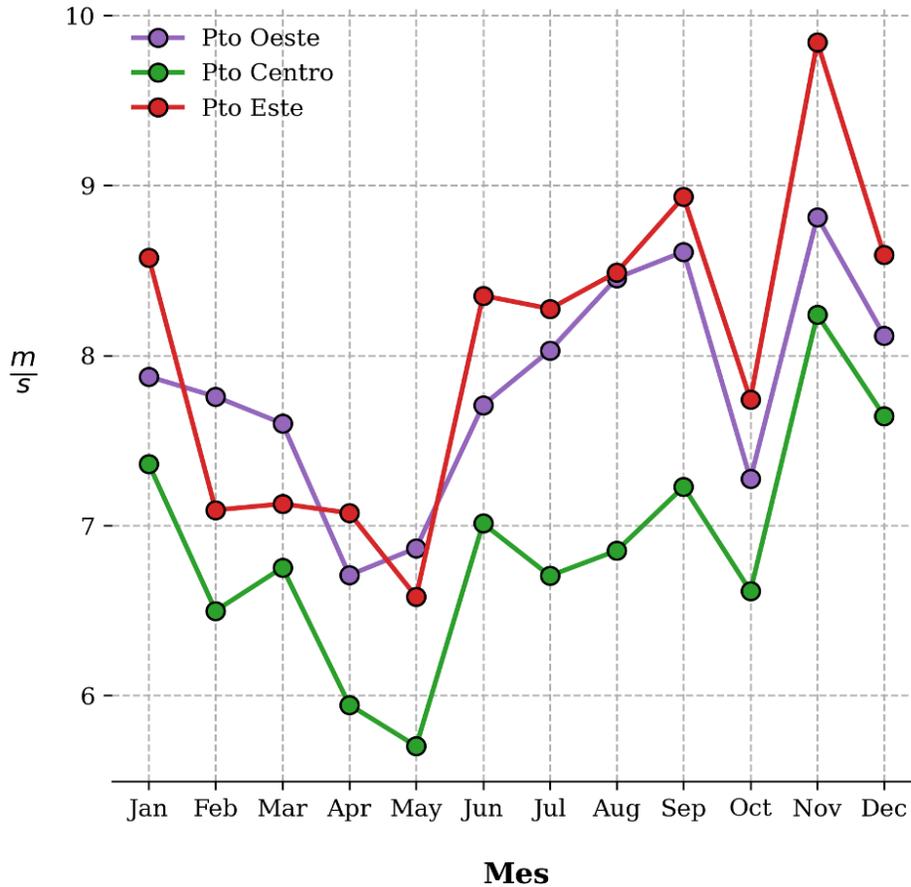
Los resultados de este objetivo referidos a la obtención de un modelo hidrodinámico en seno Skyring se encuentran descritos para cada uno de los componentes que interactúan dentro del sistema de modelación (Fig. 1). Por tanto, los resultados seguirán el mismo orden presentado en la metodología.

##### 4.1.2.1 Patrones atmosféricos: modelo WRF

El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con una marcada componente de viento que sopla desde el oeste y que se mantiene durante todo el año especialmente en el sector oriental del seno Skyring, donde se observa además un núcleo de máxima intensidad (Fig. 16). Hacia el oeste se exhibe una mayor variabilidad espacial y vientos locales más intensos, posiblemente influenciado por un efecto topográfico. La intensidad del viento es mayor durante la primavera (SON) y se debilita hacia los meses de otoño (MAM). La Figura 17 muestra el ciclo anual de la magnitud del viento en tres posiciones a lo largo del seno Skyring (ver Fig. 2), durante el año generalmente la mayor intensidad ocurre en los extremos del seno y la menor en la zona central. Los máximos se alcanzan durante noviembre con una intensidad media de casi  $10 \text{ m s}^{-1}$  al este y por debajo de  $9 \text{ m s}^{-1}$  hacia el oeste. En estas tres posiciones los vientos se debilitan alcanzando el mínimo en los meses de abril y mayo con magnitudes por debajo de los  $7 \text{ m s}^{-1}$ .



**Figura 16.** Campos de magnitud (colores) y dirección (flechas) del viento estacional en seno Skyring modelados por WRF entre 2015-2017.

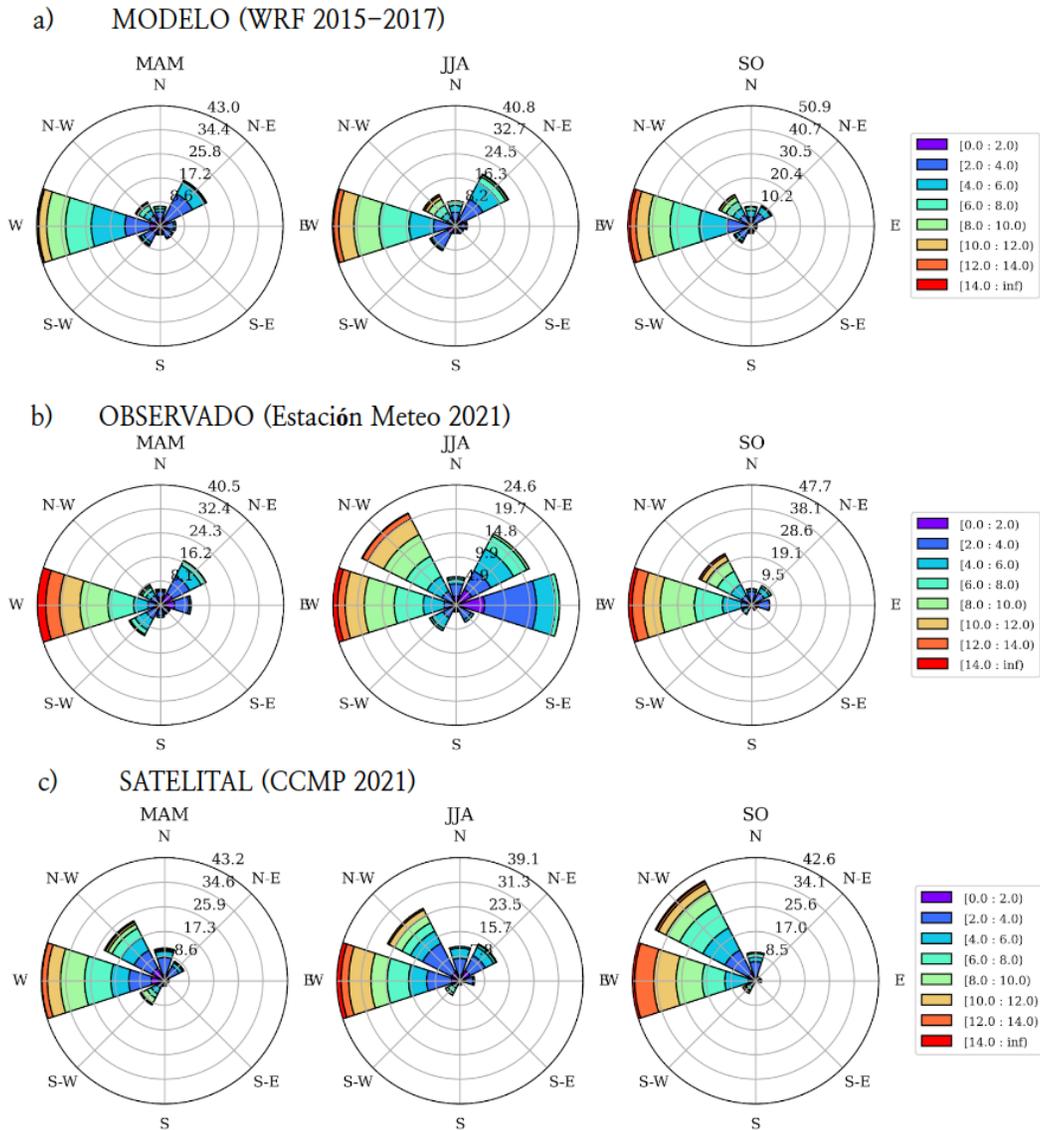


**Figura 17.** Ciclo anual de la magnitud del viento en tres posiciones (ver Fig. 7) a lo largo del seno Skyring. Data modelada por WRF entre 2015-2017.

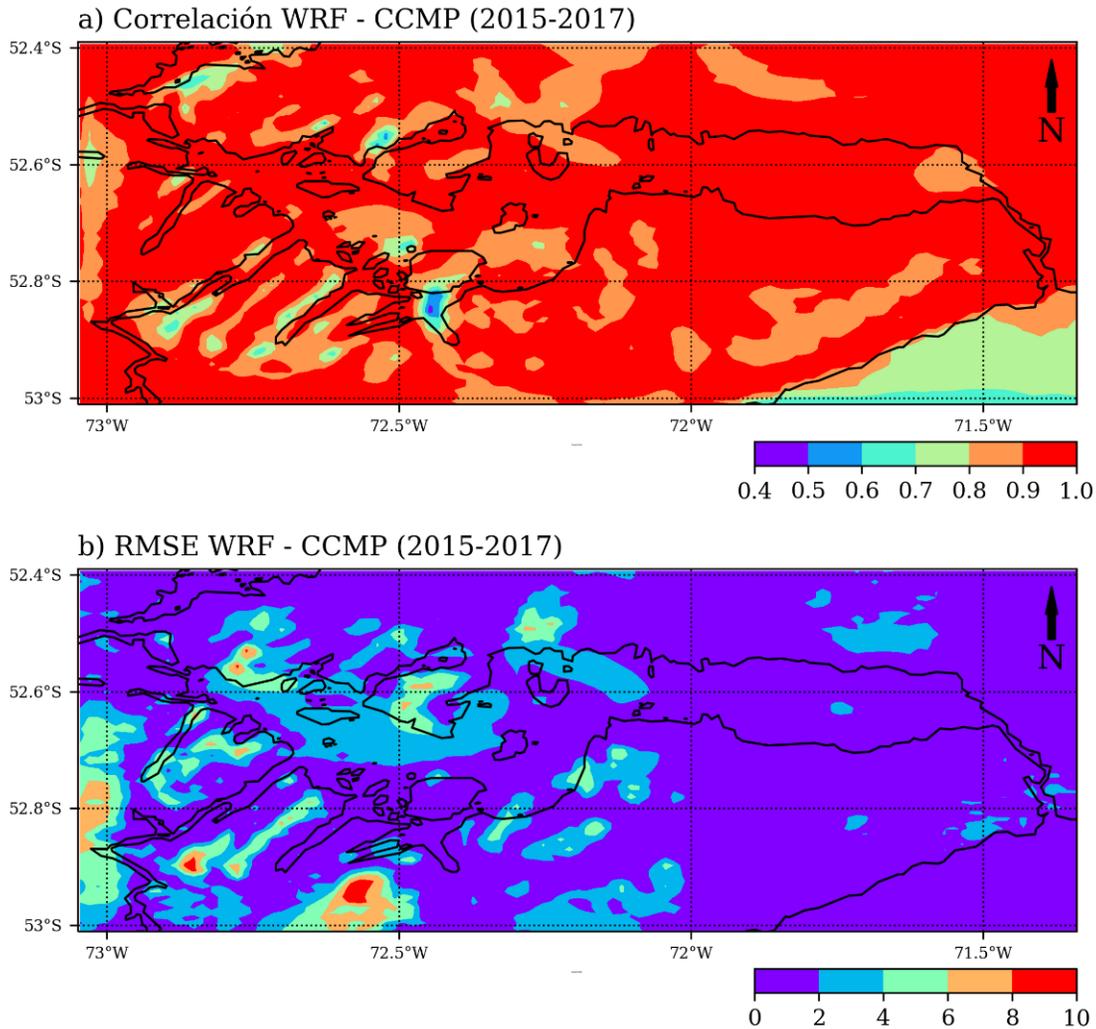
Este patrón de viento también se evidencia en las observaciones registradas durante el 2021 (**Fig. 18**). La estación meteorológica revela el patrón estacional con una componente que sopla principalmente desde el oeste, acompañado de una señal de viento del este, importante durante el invierno y que no está presente en la modelación. Esta señal podría representar una anomalía de aquel invierno o estar condicionada por la ubicación geográfica en la que está instalada la estación meteorológica, lo cual limitaría su simulación debido a una resolución espacial demasiado gruesa (**Fig. 18b**). El producto CCMP revela un patrón similar durante 2021, una marcada componente que sopla desde el oeste y que se mantiene por todo el periodo con una mayor presencia de vientos noroeste hacia invierno y primavera (**Fig. 18c**).

Por su parte, la magnitud del viento simulado se correlaciona de buena manera con los campos de viento del producto CCMP, se pueden observar valores sobre 0.8 en todo el dominio salvo en el sector de estero Riquelme al sur del seno, donde el coeficiente de correlación alcanza un valor de 0.5 (**Fig. 19a**). WRF tiende a sobrestimar levemente la intensidad del viento con respecto a CCMP, se observa

un error en la magnitud menor a 2 m/s en casi todo el dominio, a excepción de algunas zonas de mayor altitud donde el error puede llegar en torno a 4 m/s (**Fig. 19b**). Cabe destacar que al ser CCMP un producto satelital este puede conllevar a una incertidumbre en la intensidad de la señal en zonas donde el viento depende de condiciones meteorológicas locales, existe una topografía compleja y una alta presencia de nubosidad.



**Figura 18.** Rosas de viento para los periodos de otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SO). **a)** Modelo WRF entre 2015-2017, **b)** estación meteorológica y **c)** producto CCMP para 2021.

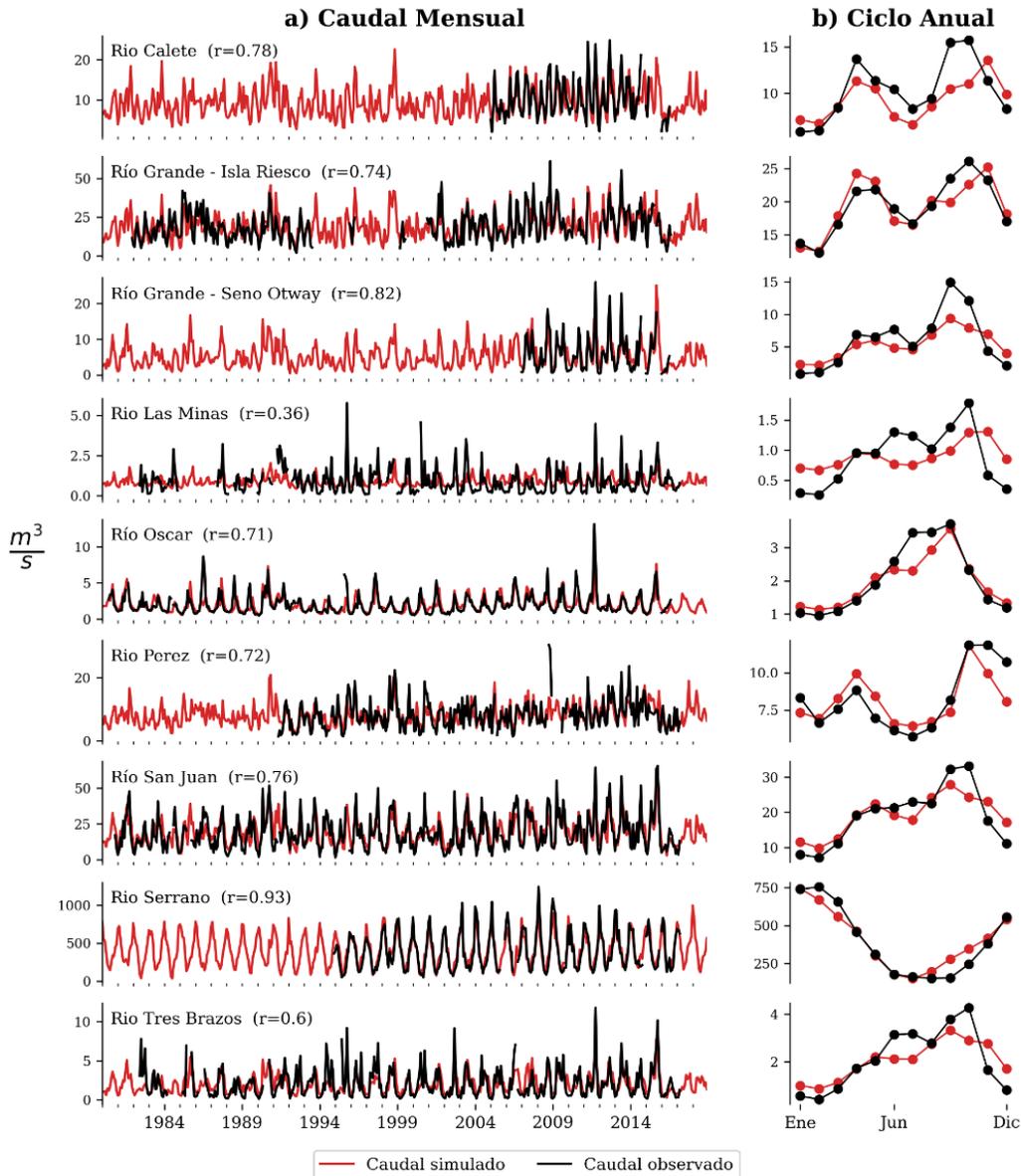


**Figura 19. a)** Mapas de correlación y **b)** raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los campos de magnitud de viento mensual WRF y CCMP para el periodo 2015-2017.

#### 4.1.2.2 Caracterización hidrológica: modelo VIC

La Patagonia Chilena presenta una gran cantidad de fuentes de agua dulce que desembocan en los mares interiores, canales y fiordos, cambiando las condiciones del sistema. Debido a este gran número la red hidrográfica resulta bastante compleja de estimar, sin embargo, los caudales simulados por el modelo hidrológico VIC se ajustan de buena manera a las observaciones. Por lo general se obtienen correlaciones significativas por sobre 0.7 en casi todas las estaciones fluviométricas, incluido en río Pérez ubicado dentro del dominio seno Skyring (**Fig. 20a**). El modelo es capaz de reproducir la estacionalidad de los caudales, estimando los máximos tanto en verano (DEF) y primavera (SON),

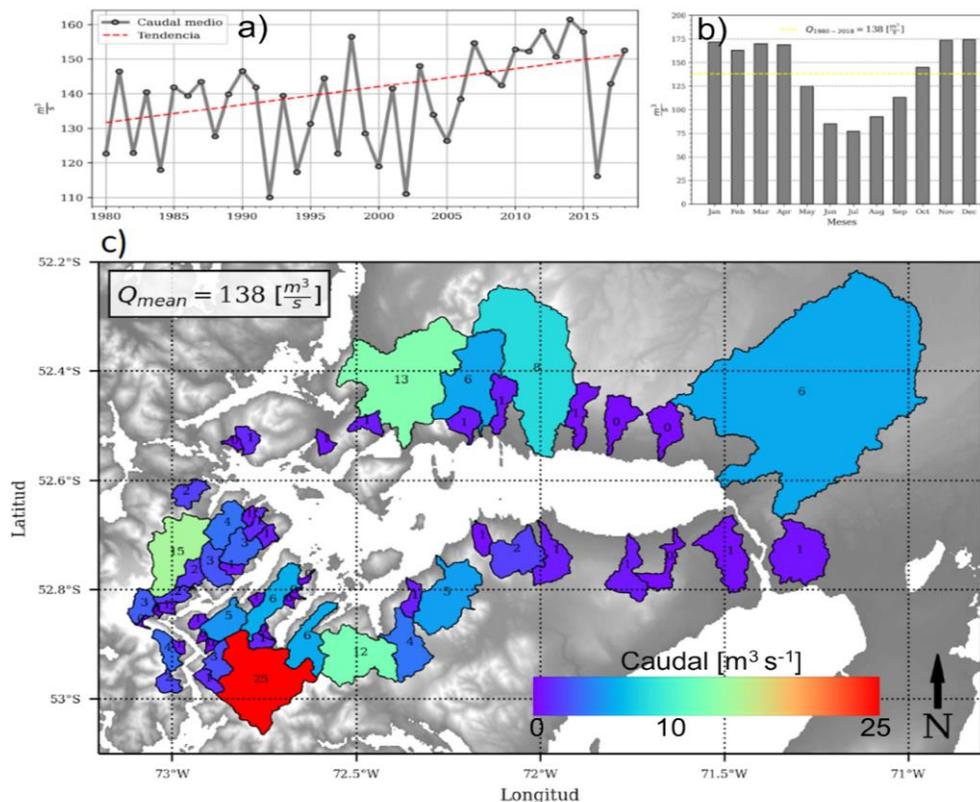
como los mínimos en invierno (JJA) (**Fig. 20b**). Lo que demuestra la habilidad del modelo hidrológico de reproducir de manera adecuada la variabilidad de los caudales en la región.



**Figura 20.** a) Caudal mensual y b) ciclo anual entre los ríos con observaciones de la DGA y los estimados por la herramienta FLOW-CHONOS, en la región de Magallanes.

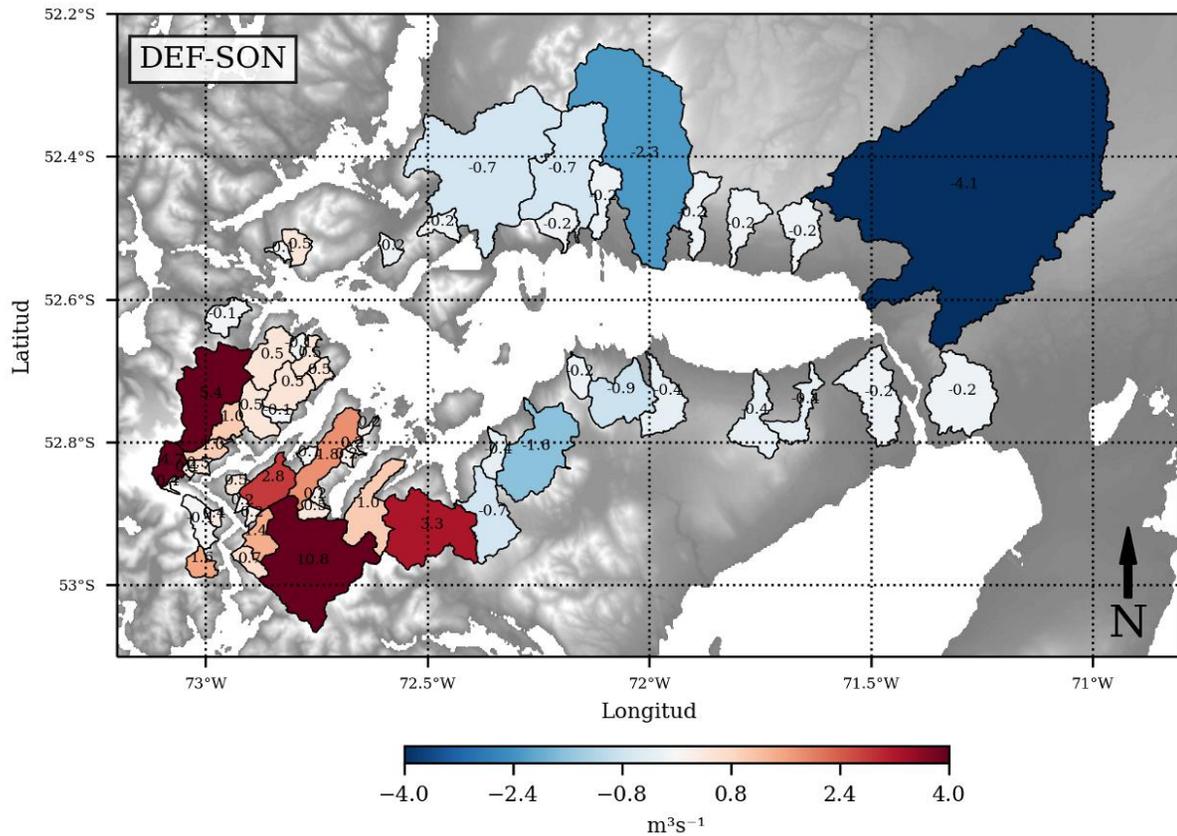
Los resultados de las simulaciones en seno Skyring muestran que en términos generales el sistema recibe un relativamente escaso aporte fluvial. La cantidad de agua dulce que ingresa al sistema alcanza valores bajos en comparación a las principales cuencas y ríos de la Patagonia.

La variabilidad interanual presente en la señal acumulada muestra una tendencia positiva en los caudales de  $0.52 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{año}^{-1}$ , la cual resulta ser significativa con una confianza del 95% según un test de Mann-Kendall. La señal interanual muestra una variabilidad con una desviación estándar de  $14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los  $160 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los  $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (**Fig. 21a**). Las principales descargas de agua dulce en el sistema se evidencian mayoritariamente hacia el sector occidental del seno Skyring (**Fig. 21c**), donde destacan máximos caudales en las cuencas que desembocan en estero Navarro y estero de Los Ventisqueros con caudales medios de  $25$  y  $15 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  respectivamente. En segundo orden la zona central presenta 3 cuencas con aportes de agua dulce significativos, ubicadas al norte del seno Skyring las cuales acumulan una descarga media de  $27 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  aproximadamente. Por su parte, la región oriental del seno hacia el canal Fitz Roy no presenta descargas significativas en el sistema (**Fig. 21c**).



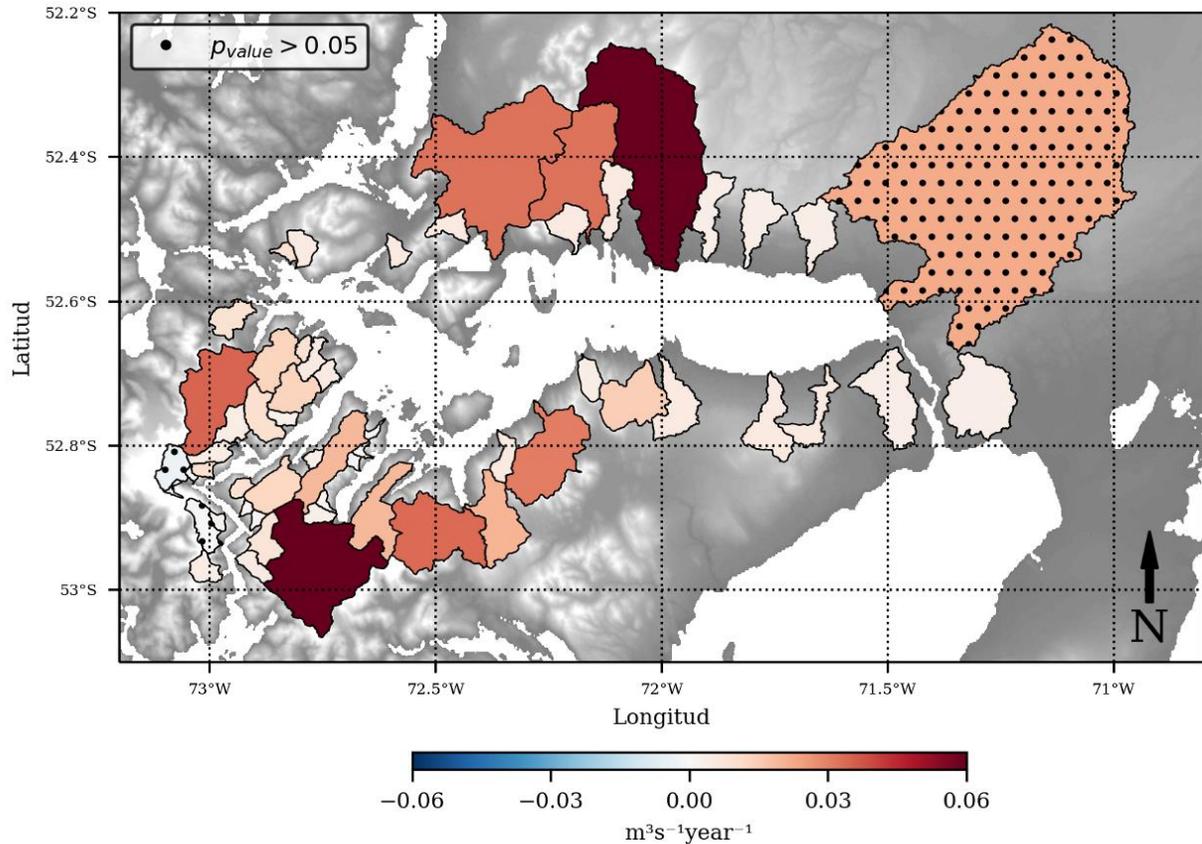
**Figura 21.** a) Variabilidad interanual de la suma de aportes de agua dulce sobre el seno Skyring. b) Ciclo anual del caudal acumulado. c) Caudal promedio de las principales cuencas de seno Skyring, caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

Los aportes de agua dulce en seno Skyring muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo de  $\sim 175 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , y mínimos durante la época de invierno que llegan a  $\sim 75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  durante julio (**Fig. 21b**). Este régimen estacional, con dos máximos anuales, se asocia a una diferencia del forzante que induce la descarga de los caudales en el seno. La diferencia estacional entre verano (DEF) y primavera (SON) (**Fig. 22**) revela un patrón espacial que divide al sistema en dos fuentes de variabilidad. Al oeste del sistema la señal de caudales es dominada principalmente por la descarga ocurrida durante los meses de verano resaltando la importancia del derretimiento de las masas de hielo presentes en esta zona del dominio y por su parte al este de  $72.5^\circ\text{O}$ , la estacionalidad se vuelve más importante durante primavera, lo cual sugiere un mayor dominio de la precipitación sobre la descarga en esta zona.



**Figura 22.** Diferencia entre el caudal medio de verano (DEF) y primavera (SON) para las principales cuencas que aportan agua dulce sobre el sistema de seno Skyring. Caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

Por otro lado, las tendencias de los caudales en seno Skyring considerando todo el periodo simulado (1980-2018), revelan una inclinación positiva prácticamente en todo el dominio, según un test de mann-kendall con un intervalo de confianza del 95% (**Fig. 23**).

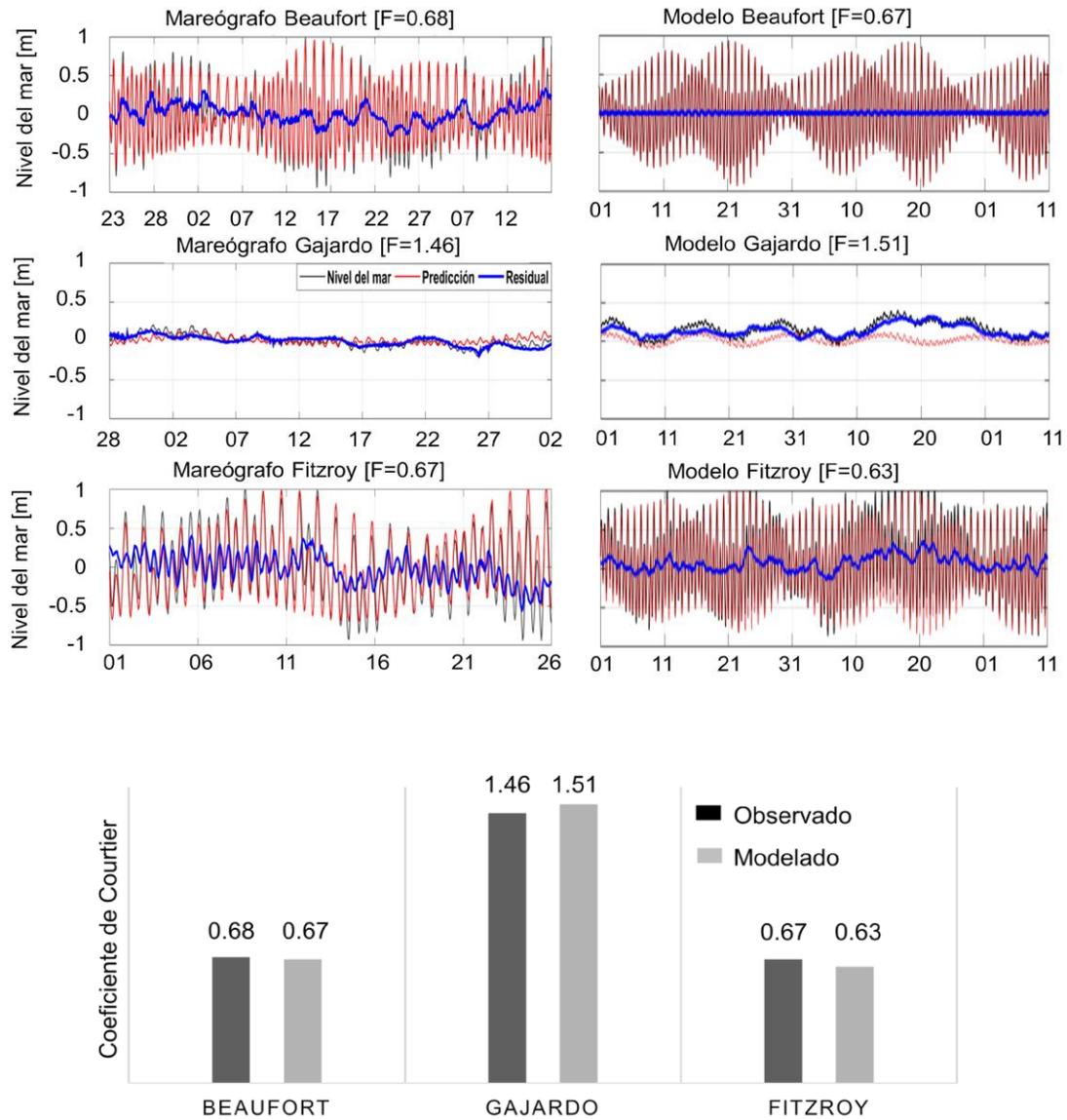


**Figura 23.** Magnitud de la tendencia en las principales cuencas que aportan agua dulce sobre el sistema de seno Skyring. Los puntos señalan las cuencas que no son estadísticamente significativas ( $p > 0.05$ ). Caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

#### 4.1.2.3 Simulación nivel del mar

En base a un análisis armónico, se caracterizó el régimen de marea del sistema Skyring considerando mediciones in situ con mareógrafo (**Fig. 5**). El coeficiente de Courtier para bahía Beaufort, canal Gajardo, Seno Skyring y Canal Fitzroy va desde 0,60 a 1,50 (**Fig. 24**), indicando que el régimen de marea que presenta el sistema Skyring es semidiurno mixto, lo cual, es concordante con lo que muestra el modelo. El espectro de amplitud de marea tanto en el mareógrafo como en el modelo (**Fig. 25**), muestra una disminución de la amplitud de la marea en el canal Gajardo y Skyring. En el caso del constituyente  $M_2$  presenta una amplitud de 0,47 m en Fitzroy (previo a la constricción) y en canal

Gajardo 0,02 m (posterior a la constricción), en Beaufort más cercano al océano costero por donde ingresa la onda de marea desde el norte;  $M_2$  registra una amplitud de 0,41 m.



**Figura 24.** Nivel del mar observado (izquierda) y modelado (derecha), junto al coeficiente de Courtier (F) para cada sector.

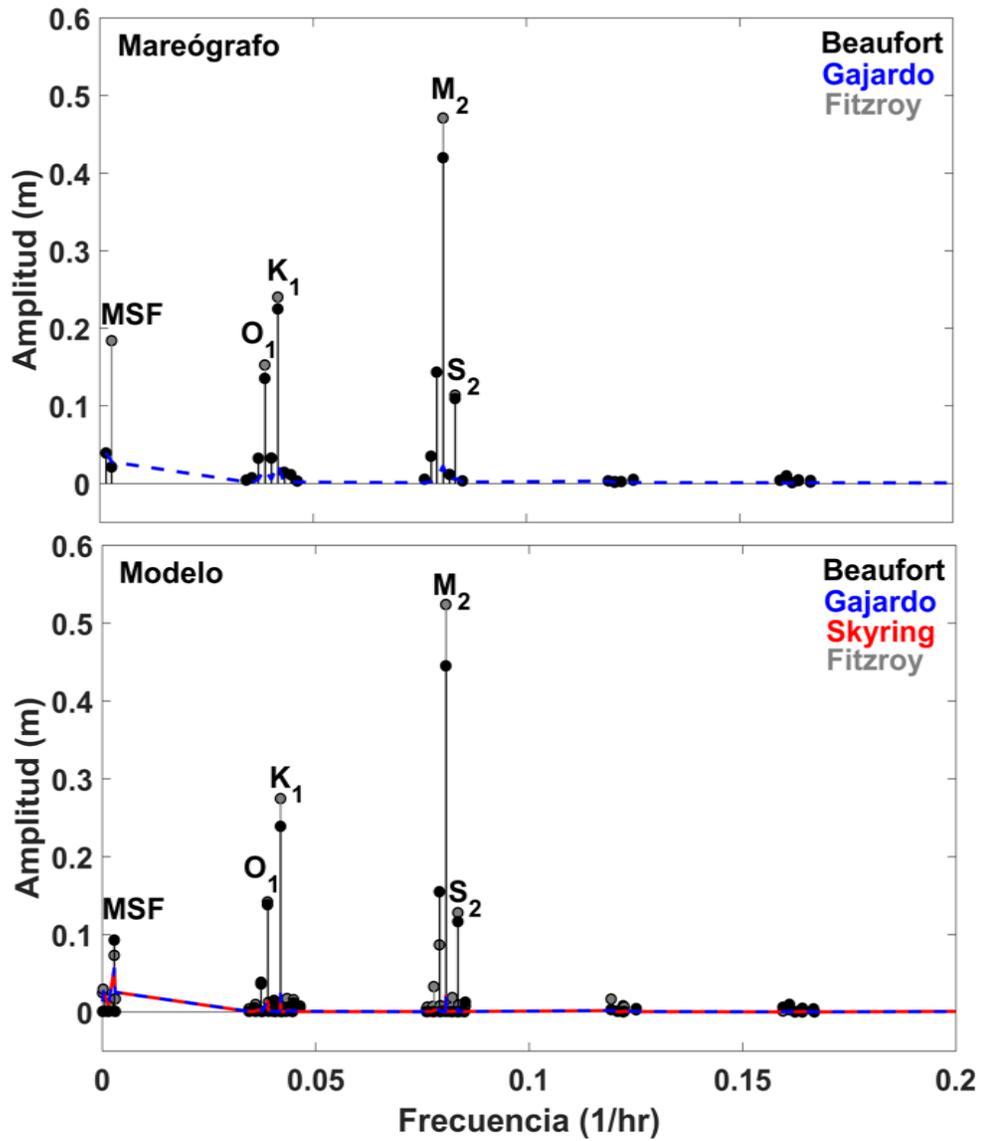
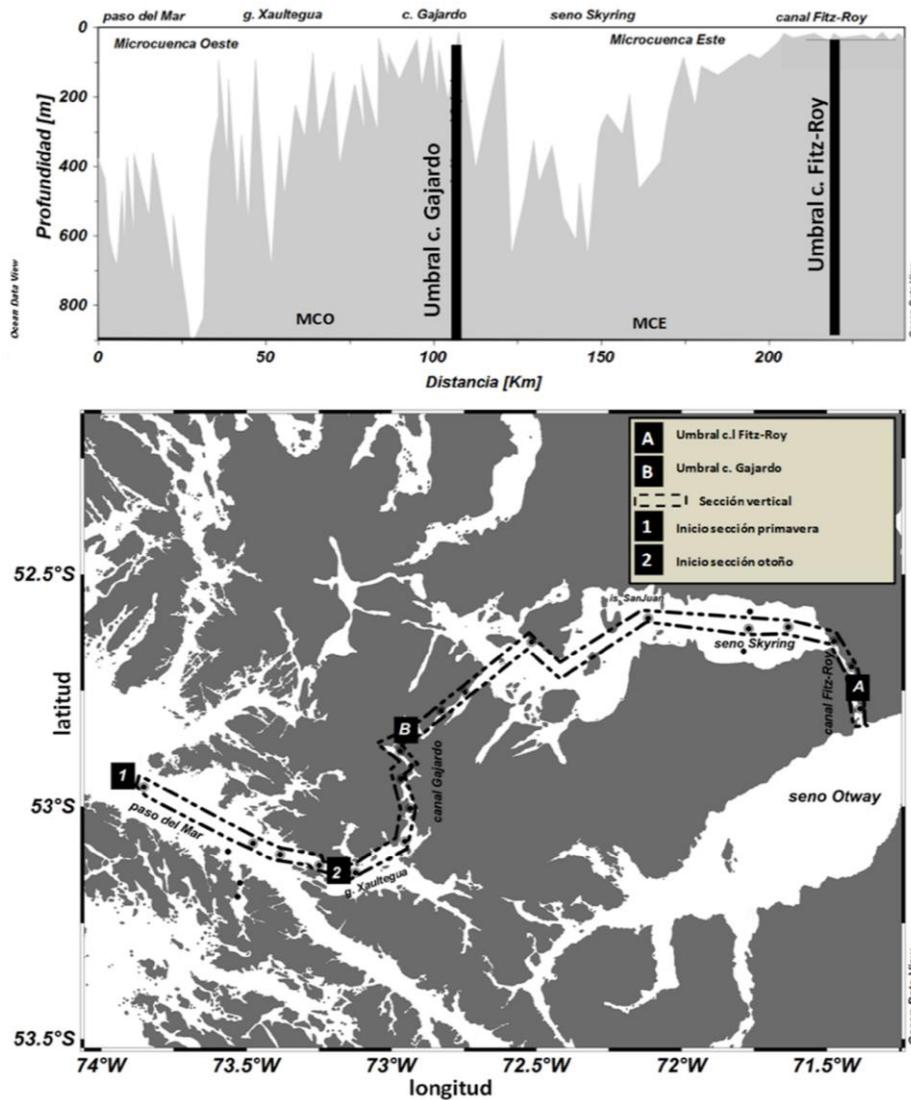


Figura 25. Espectro de Amplitud de marea observada (panel superior) y modelada (panel inferior)) de Beaufort, canal Gajardo y canal Fitzroy.

#### 4.1.2.4 Evaluación de características hidrográficas en modelo hidrodinámico

El seno Skyring es una cuenca semicerrada en la región de Magallanes (**Fig. 26**) limitada por los umbrales batimétricos, canal Gajardo (~5 m) y canal Fitz-Roy (~10 m), presenta profundidades de 100 m en la proximidad del canal Fitz-Roy y máximos de 600 m hacia el canal Gajardo. Hacia el exterior de Skyring, por canal Gajardo, la profundidad se situó entre 150 a 250 m, mientras que el golfo Xaultegua reveló profundidades entre 450-650 m y llegando al Estrecho de Magallanes, en Paso del Mar, se registraron las mayores profundidades entre 600-800 m. La conformación batimétrica tiende a exhibir una disminución en sentido oeste-este.



**Figura 26:** Perfil batimétrico de seno Skyring y zonas aledañas.

De las observaciones registradas entre 2012 y 2013, la sección vertical salinidad mostró que el agua oceánica ingresa de forma acotada por las constricciones batimétricas, así el agua al interior del seno no supera el rango de 20, mientras que, a su exterior, estas presentan una salinidad sobre 30, tanto en primavera como en otoño (Fig. 27). Por otra parte, la temperatura presenta, en general, valores más reducidos al interior del seno Skyring, especialmente bajo los 100 m de profundidad. Finalmente, el contenido de oxígeno disuelto se encuentra sobre los valores de 5 mL L<sup>-1</sup> en las zonas más profundas, no observándose zonas hipóxicas a su interior. El tipo de masa de agua que domina en seno Skyring puede caracterizarse como agua estuarina salobre (Fig. 28) conformada en una gran proporción por el agua dulce proveniente de glaciares y lluvia, y por aguas mezcladas con remanentes de Agua Subantártica Modificada.

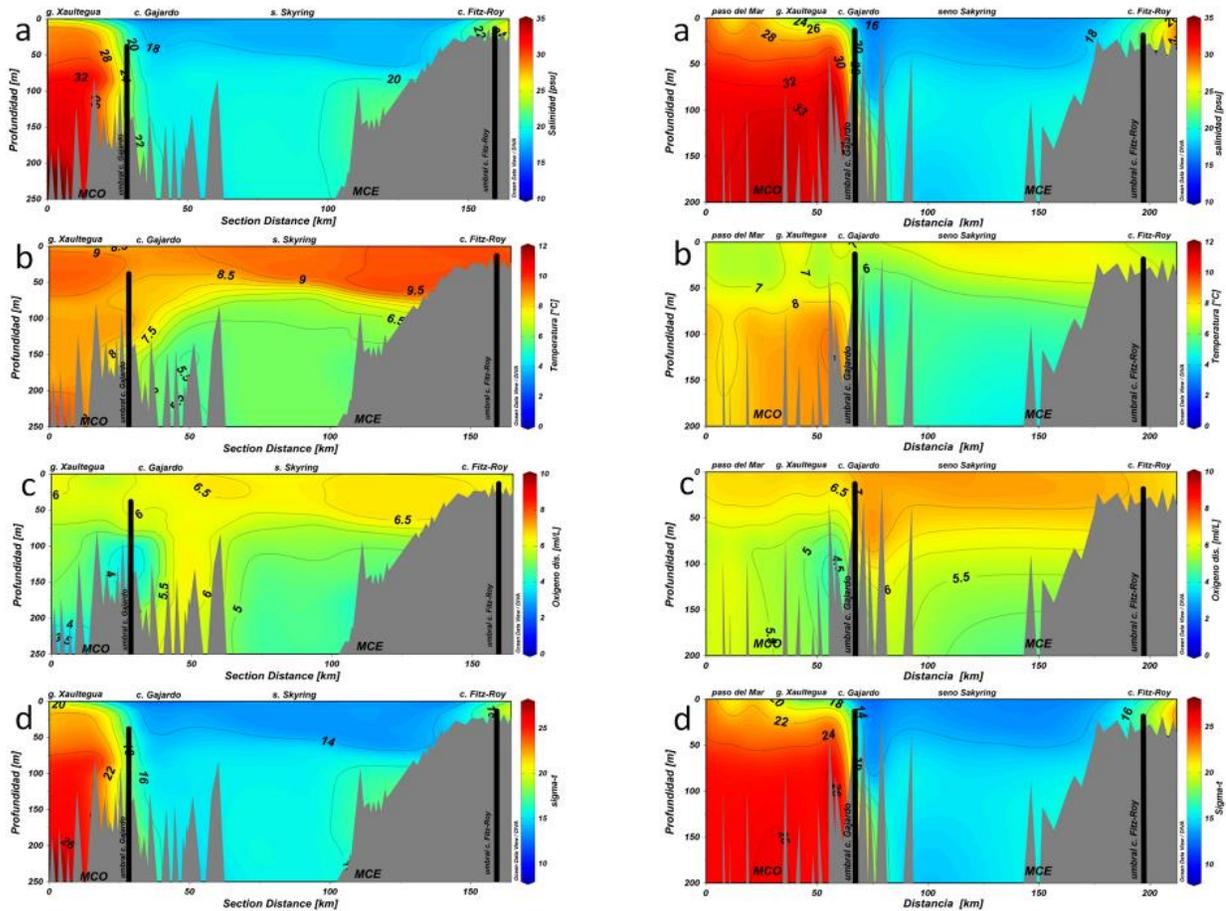
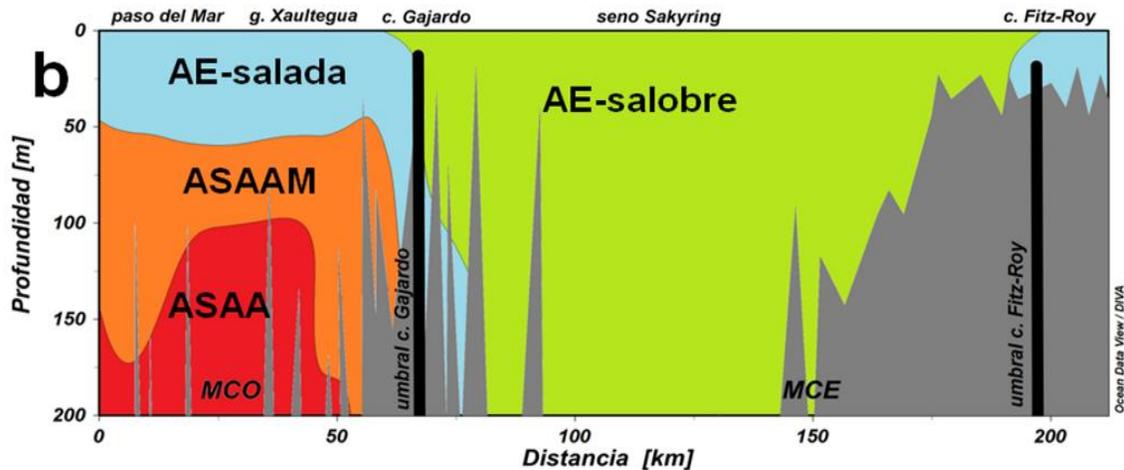


Figura 27: Condiciones hidrográficas en seno Skyring en otoño de 2012 (panel izquierdo) y primavera de 2013 (panel derecho).



**Figura 28:** Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

Determinar la capacidad del modelo hidrodinámico en reproducir las estructuras verticales de las propiedades físicas (temperatura y salinidad) de la columna de agua, es un punto esencial en la evaluación del modelo hidrodinámico. Para este propósito, se utilizaron diagramas de temperatura y salinidad. Esta comparación fue realizada para años distintos, por lo tanto, eventualmente existe una fuente de error adicional al desempeño del modelo, que tenga su origen en la variabilidad interanual propia de este sistema.

La **Fig. 29** muestra una comparación entre diferentes estaciones de CTD realizadas en periodos puntuales y se compararon con datos extraídos del modelo. El modelo en el sector oeste del seno (E2 y E3) tiene en general un buen desempeño, especialmente en la salinidad, está se encuentra en los rangos adecuados, entre 15 a 20. En cambio, para la temperatura, el modelo tiene menos habilidad para reproducir valores más bajos, en cambio en la zona central (E4) de Skyring, el modelo reproduce de mejor manera y en un rango adecuado la temperatura y la salinidad, además de la variabilidad temporal de esos rangos. Finalmente, en el lado este (E8), se observa una estructura distinta a la zona interna del seno, aquí la variabilidad de la salinidad aumenta, mientras que en la temperatura disminuye, este rasgo es capturado por el modelo, sin embargo, no con exactitud, sobreestimando los valores de temperatura, especialmente en diciembre.

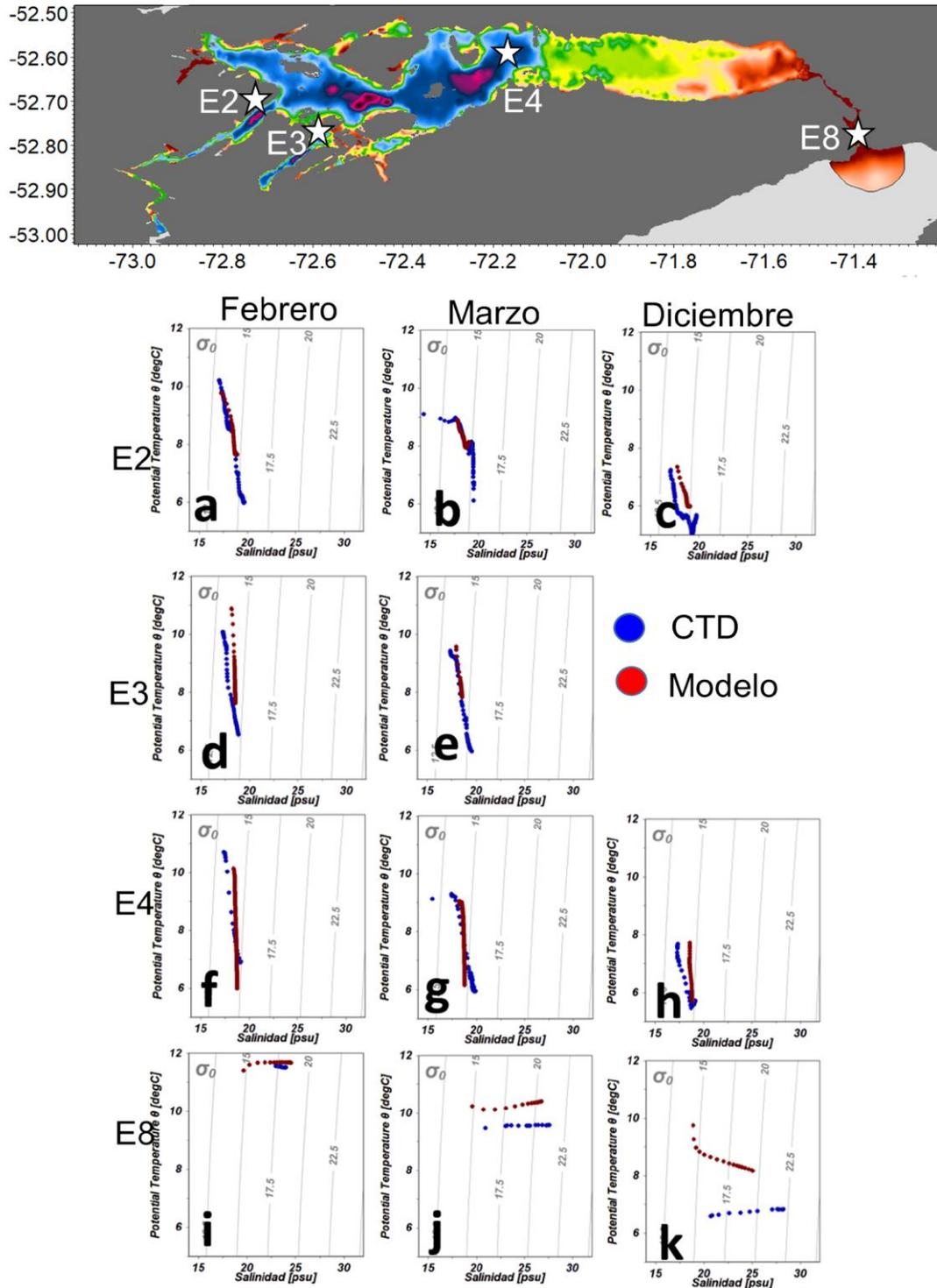
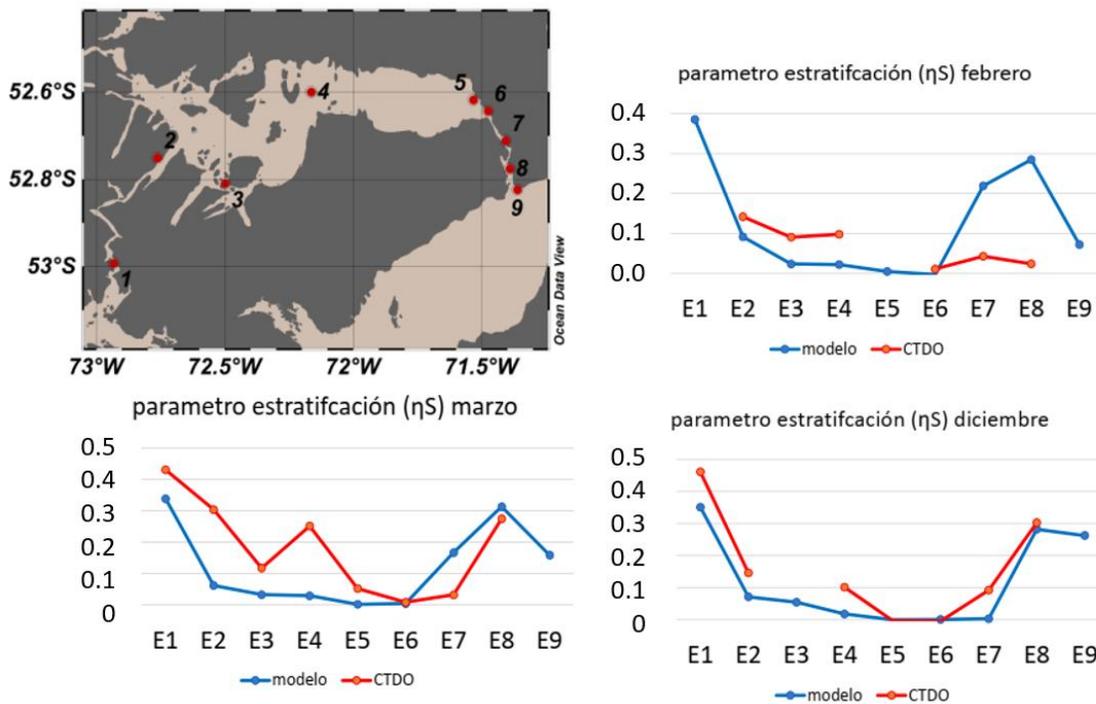


Figura 29: Diagramas TS en distintos sitios en seno Skyring entre estaciones de CTD (azul) y el modelo (rojo).

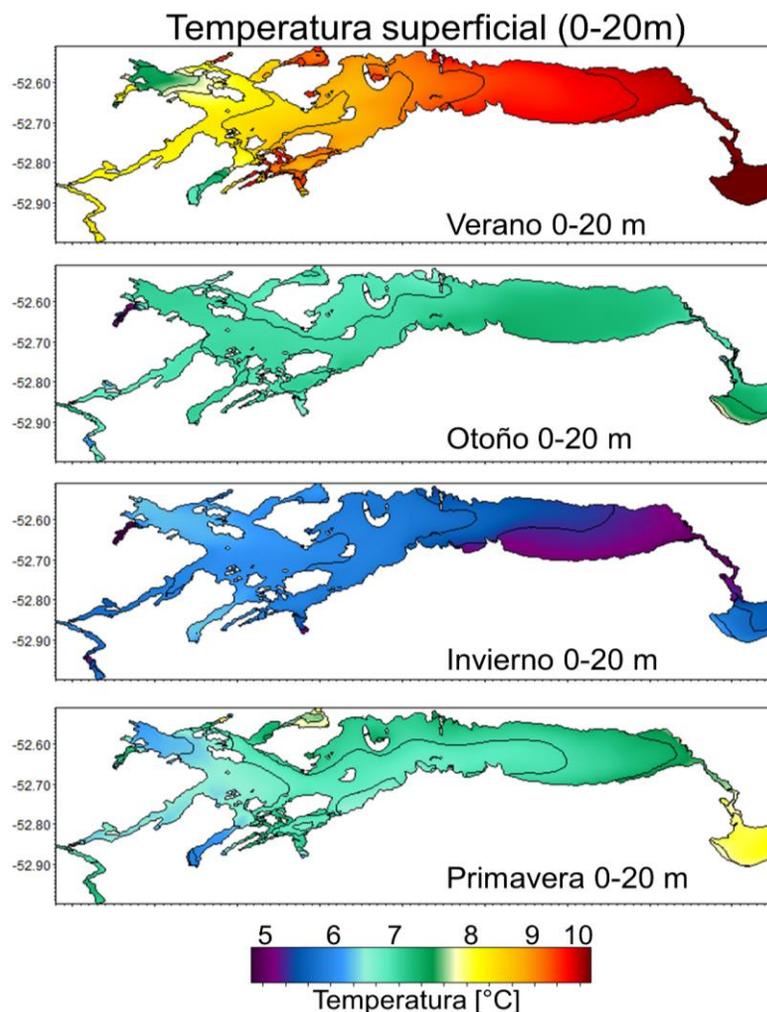
Uno de los aspectos fundamentales en los cuerpos estuarinos corresponde a la estratificación y una forma sencilla de cuantificarla es a través del parámetro de estratificación ( $\eta_s$ ), estimado a partir de diferencias entre la salinidad superficial y de aguas más profundas. Especialmente, existe una mayor estratificación en los canales de conexión (Fitz Roy y Gajardo) y, por el contrario, al interior del seno, esta tiende, en general, a disminuir (**Fig. 30**). Así en febrero, el modelo tiende a subestimar la estratificación en la parte oeste del seno, de manera opuesta las estaciones de la parte este del sistema estaciones 5-9, indicaron una sobreestimación de la estratificación, es importante señalar que en este periodo se registraron el menor número de observaciones de CTD. Una de las mejores concordancias se dio en las observaciones de marzo, si bien el modelo subestima la estratificación si se logra apreciar el mismo patrón, con elevados valores hacia las estaciones hacia el oeste (E1-E2), también el modelo replica el mismo patrón hacia las estaciones canal Fitz-Roy, aunque sobreestimando los valores. En diciembre también se observó una buena concordancia entre la estratificación observada y la representada por el modelo, si bien el modelo subestima, la diferencia es la más reducida de todos los periodos comparados (febrero-marzo) (**Fig. 30**). Se insiste en que las mediciones fueron realizadas en un periodo distinto a la modelación, por lo cual, las desviaciones podrían no ser necesariamente atribuibles al desempeño del modelo.



**Figura 30:** Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

#### 4.1.2.5 Temperatura superficial modelada

Los valores medios estacionales de la temperatura superficial (0-20 m) en seno Skyring (**Fig. 31**) muestra, como es esperable, máximos en verano y mínimos en invierno. Durante el verano la temperatura tiende a ser mayor hacia el lado Este, con valores sobre los 10 °C, mientras que esta es menor hacia el lado este y principalmente cercano a descarga de agua dulce de origen glaciar, mientras que, durante los inviernos, los valores mínimos alcanzan valores cercanos a 5°C, en tanto, durante el otoño y la primavera en las capas superficiales tienen un comportamiento similar con valores de temperatura cercano a 7°C. La salinidad en cambio muestra homogeneidad al interior del seno Skyring, y con valores relativamente bajos (~17 a 19) esto contrasta con los canales de conexión al seno que alcanzan valores entre 25 a 30 (**Fig. 32**). Durante el verano se producen los valores más bajos de salinidad en las cercanías de las descargas de ríos, época en la que se producen deshielos.



**Figura 31:** Temperatura superficial (0-20m) para cada estación del año 2017-2018

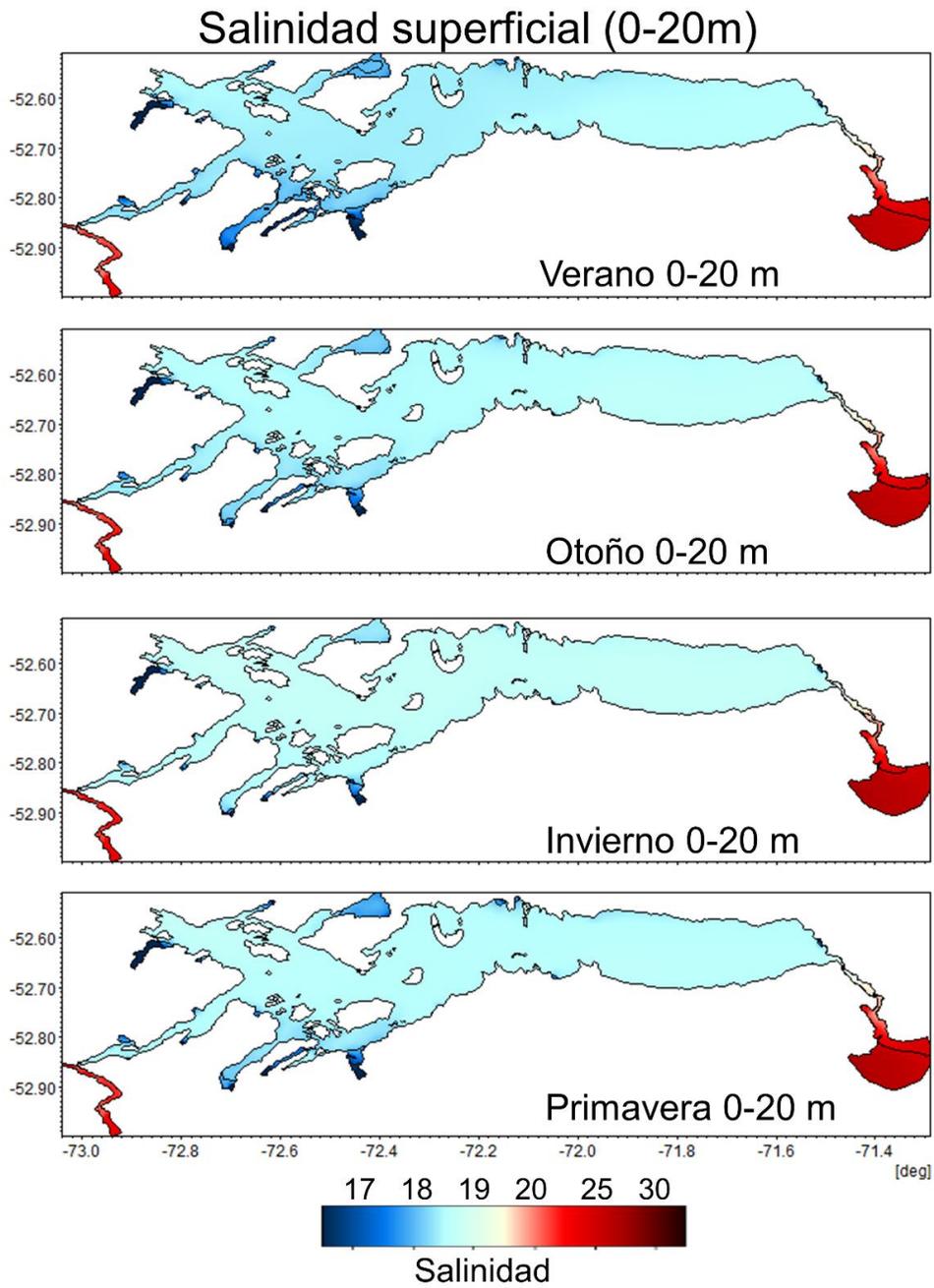
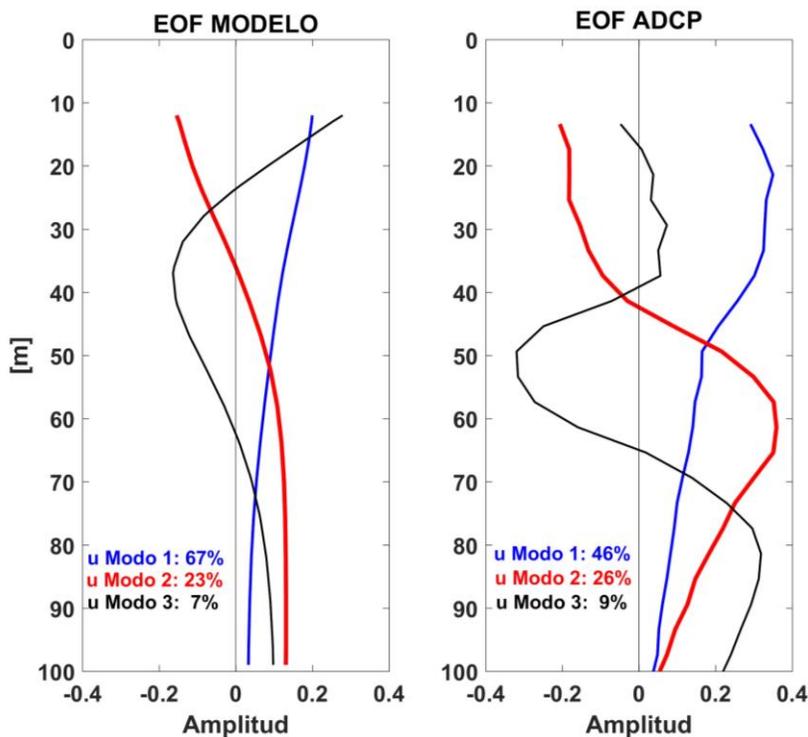


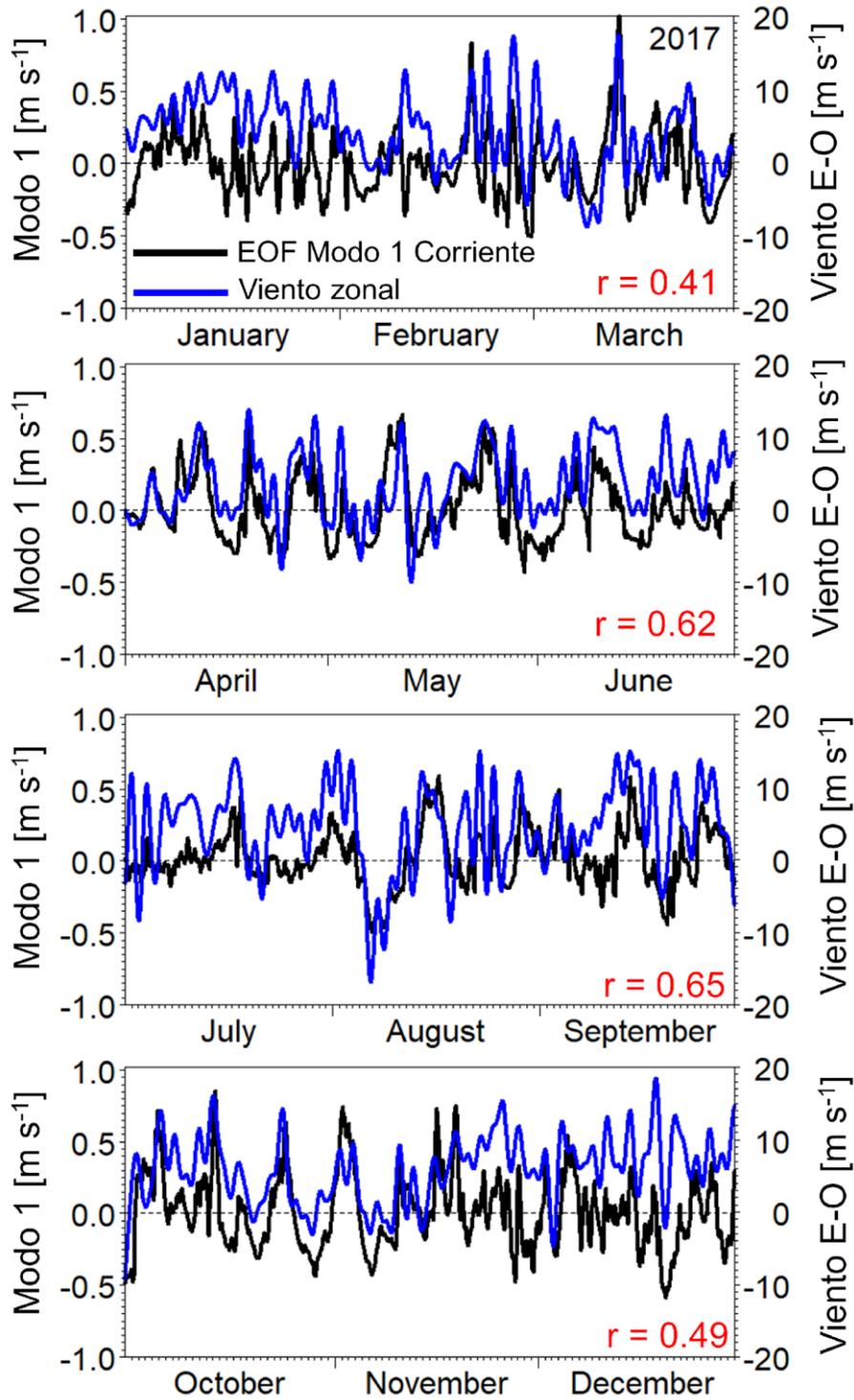
Figura 32: Salinidad superficial (0-20 m) para cada estación del año 2017.

#### 4.1.2.6 Evaluación de las corrientes modeladas

Se comparó la salida del modelo (enero - diciembre 2018) con los datos de ADCP (noviembre – julio 2022) en base a un análisis de EOF de la corriente submareal de seno Skyring. En general, los 3 modos verticales de la corriente coinciden entre el ADCP y el modelo (**Fig. 33**). El modo 1 mostró una estructura barotrópica hacia el este que disminuye su amplitud con la profundidad. El modo 1 del modelo explicó el 67 % de la variabilidad total, mientras que el modo 1 del ADCP alcanzó un 46%. El modo 2 del modelo presentó una estructura baroclínica con una capa sobre los 40 m hacia el oeste y una capa bajo los 40 m hacia el este, esta estructura se observó en el ADCP explicando un 26% de la variabilidad total, el modelo lo hizo en un 23%. El modo 3 presentó una estructura de 3 capas; sobre los 25 m la corriente presentó dirección hacia el este y entre los 25 m y 60 m la corriente tuvo dirección hacia el oeste, bajo los 60 m la corriente tuvo dirección al este, este modo explicó el 7% en el modelo y 9% en el ADCP. El modo 1 explicó la mayor variabilidad, se comparó el modo 1 del modelo con viento el viento zonal, se encontraron correlaciones relativamente altas, sobre todo en otoño e invierno ( $r = 0.65$  y  $0.62$  respectivamente), esto sugiere que el viento es el principal forzante en la circulación, al menos en los primeros 50 m de la columna de agua (**Fig. 34**).

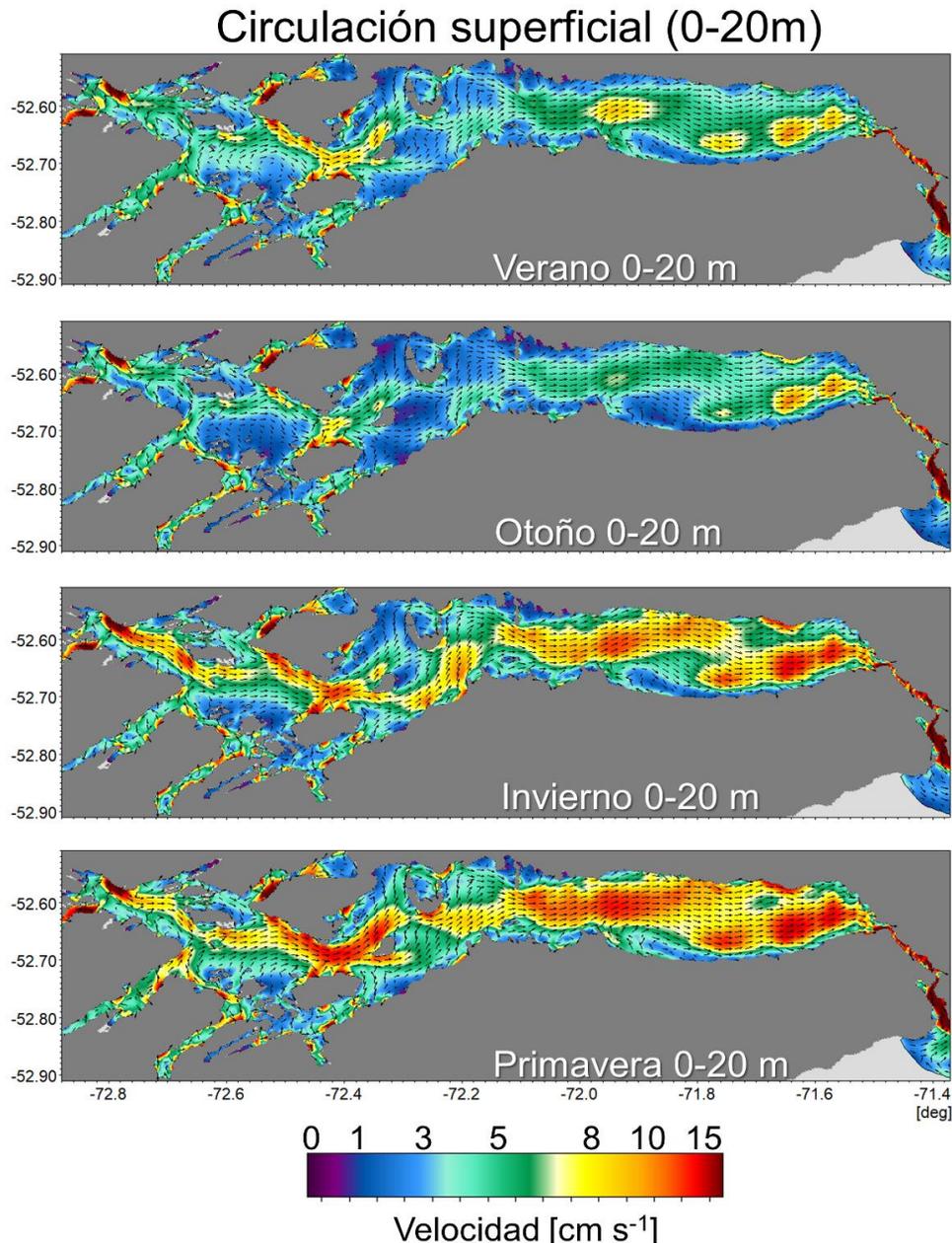


**Figura 33:** EOF de la componente u del modelo 2018 y de ADCP 2021 - 2022, Isla Escarpada.



**Figura 34:** Serie temporal del modo 1 de EOF (negro) y el viento zonal (azul), para cada estación del año 2017 con su respectivo valor de r.

El patrón de circulación superficial de las corrientes (**Fig. 35**), obtenido como promedios estacionalmente para el año 2017, muestra en general, una dirección del flujo desde oeste a este, siendo más intenso durante invierno y principalmente en la primavera, alcanzando en algunos sectores valores máximos de  $\sim 15 \text{ cm s}^{-1}$ . Por otra parte, durante otoño se observan las menores magnitudes de corrientes, aunque conservando su dirección. Estas diferencias estacionales sugieren un activo forzamiento del viento en la estructura superficial de las corrientes en seno Skyring.

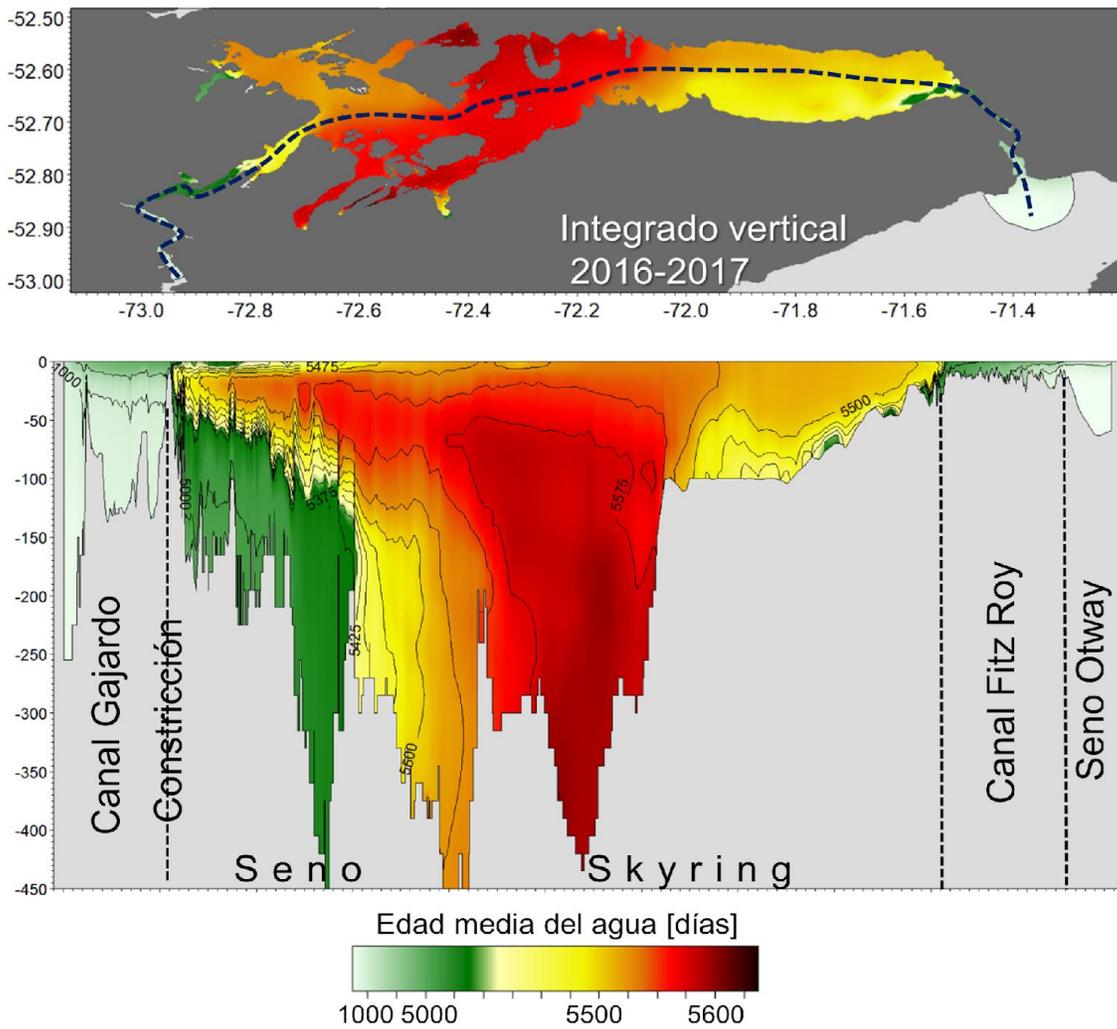


**Figura 35:** Patrón estacional de corriente superficiales promedio (0-20 m) proveniente del modelo hidrodinámico para el año 2017.

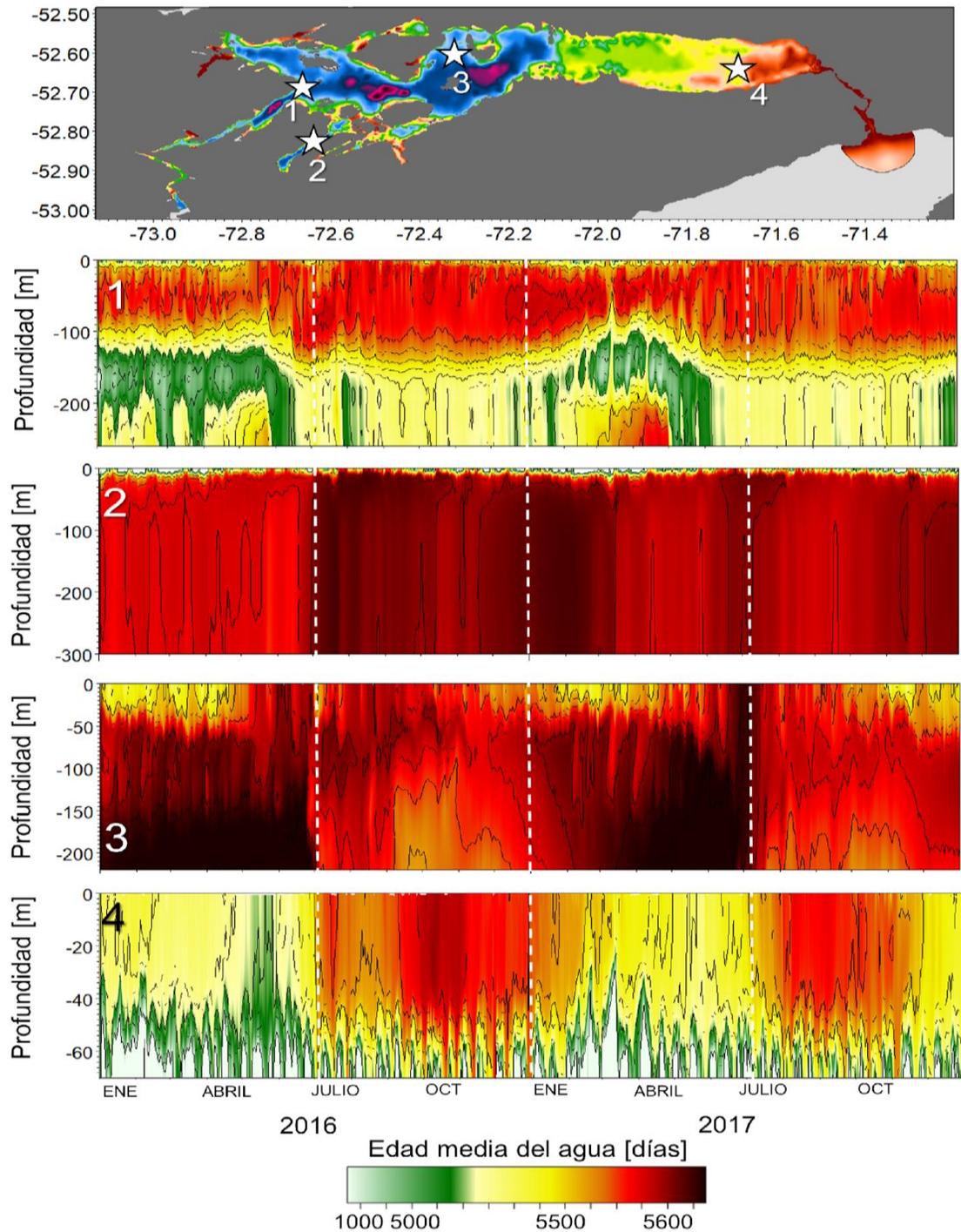
#### **4.2 Objetivo 2.2.2.** Calcular el intercambio de agua interanual mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico en Seno Skyring

Los resultados de intercambio de agua muestran que el seno Skyring tiene valores sobre 15 años (>5500 días) de edad del agua. Espacialmente, los mayores valores se encuentran en el sector central y más profundo del seno Skyring (**Fig. 36**), mientras que menores valores son observados cercanos a los canales de conexión con valores cercanos 5000 días, esto es apreciable tanto en los campos promedio, como en las secciones verticales para el periodo 2016-2017 (**Fig. 36**). En tanto, la variabilidad temporal para distintas profundidades muestra distintas estructuras (**Fig. 37**), así como los canales de conexión (**puntos 1 y 4 Fig. 37**), se muestran con aguas relativamente más nuevas en zonas de mayor profundidad, asociado a entradas de aguas externas más salinas y, por tanto, más densas, que se hunden hacia estratos más profundos, esta relativa mayor renovación tiende a intensificarse durante el verano y el otoño.

Las zonas más internas (**puntos 2 y 3 Fig. 37**), y asociadas a zonas acuícolas con concesión de salmones, registran valores relativamente más altos de edad del agua. En estero Navarro (**punto 2**), una delgada capa superficial de alrededor 10 m de espesor contiene agua de edad relativamente más joven, sin embargo, el restante volumen de agua contiene aguas de edades mucho más altas, acentuándose durante el invierno. Mientras que en el **punto 3**, se registra una de las zonas con mayor edad del agua de seno Skyring (>5600 días), especialmente en las capas más profundas y durante el verano y el otoño.



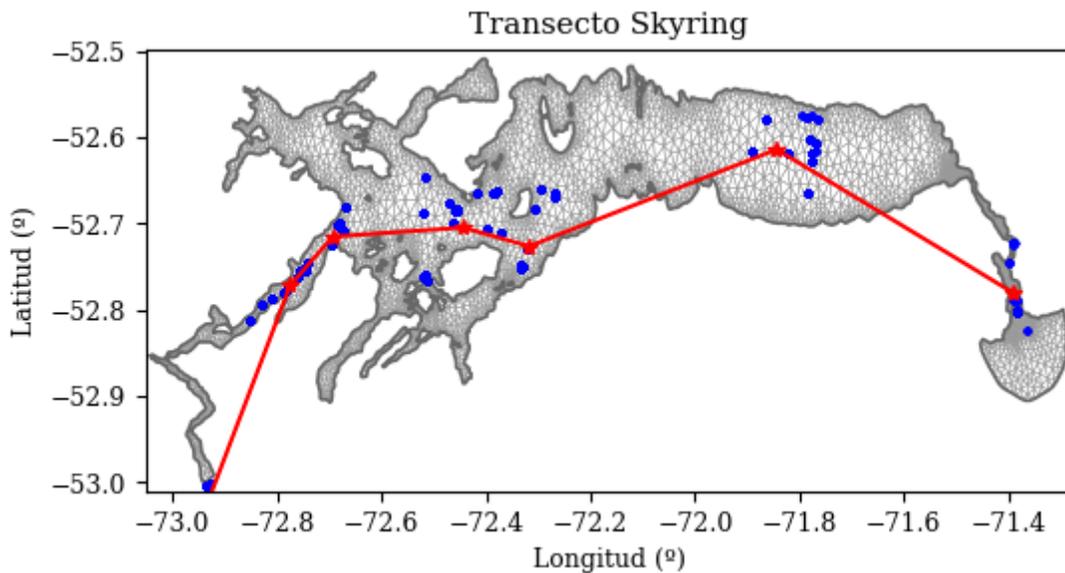
**Figura 36:** Mapa integrado verticalmente (arriba) y sección vertical de la edad del agua promedio 2016-2017 en seno Skyring.



**Figura 37:** Secciones temporales de la edad del agua para distintos sitios en seno Skyring, indicados con estrellas en mapa de arriba.

**4.3 Objetivo 2.2.3.** Implementar un modelo simple y semi-empírico de la dinámica de oxígeno disuelto y establecer relaciones con el intercambio de agua.

Para verificar la estructura y la variabilidad espacial del oxígeno disuelto en Skyring, otorgado por el modelo, se comparó una transecta promedio de datos CTDO históricos, recopilados por IFOP para los años 2012, 2021 y 2022 (**Fig. 38, puntos azules**), con una transecta promedio del modelo entre los años 2016, 2017 y 2018 (**Fig. 38, puntos rojos**). El transecto corresponde desde canal Gajardo a canal Fitz Roy. Los perfiles CTDO se encuentran a una distancia máxima de 8 km. En el caso de la simulación, se buscaron los perfiles más cercanos a cada punto CTDO, mediante el módulo MIKE IO en Python.

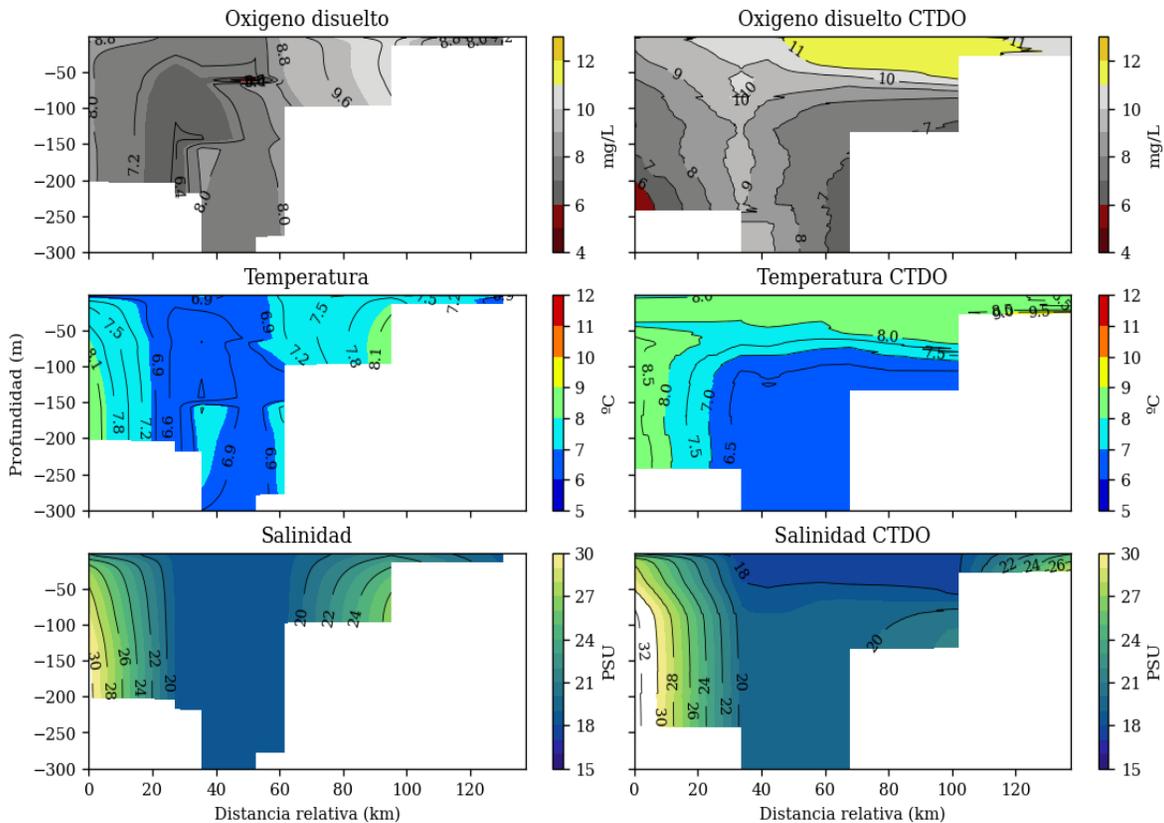


**Figura 38.** Transecto de perfiles en el dominio de Skyring, los puntos rojos corresponden a las coordenadas escogidas para la extracción de información del modelo (coordenadas representantes), en azul se muestra la cobertura de datos CTDO con los cuales se calculó un valor medio representativo para cada punto del transecto.

En la **Figura 39** se observa la comparación entre la transecta promedio de oxígeno, temperatura y salinidad del modelo (panel izquierdo) y la transecta promedio de CTD (panel derecho). Los datos de oxígeno disuelto de CTD muestran alta concentración de oxígeno con rangos entre 6 mg/L y 12 mg/L, en el seno Skyring y hacia el este de la transecta (hacia Fitzroy) la capa superficial ( $z=0$ ) alcanza valores máximos de 12 mg/L que disminuye con la profundidad a 6 mg/L. El modelo reproduce la alta

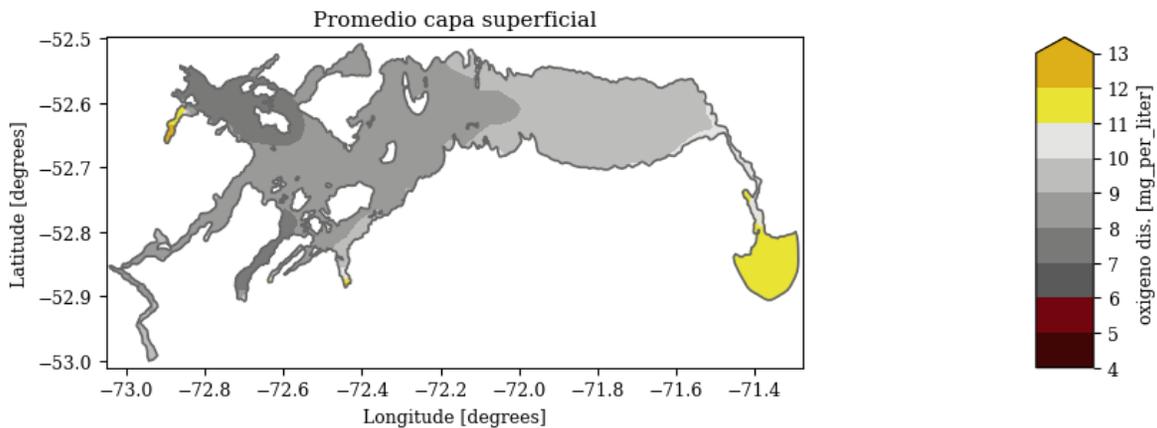
concentración de oxígeno en Skyring, pero logra un máximo de 10 mg/L, replica las máximas concentraciones hacia el este de la transecta (hacia Fitzroy).

En el borde oeste, el oxígeno disuelto de CTD muestra valores mínimos cercanos a los 4 mg/L, entre los 200 m y 250 m de profundidad, en la boca oeste del canal Gajardo, lo cual no logra ser reproducido por el modelo, lo que podría responder a la cobertura batimétrica o baja resolución batimétrica disponible para correr el modelo. Los transectos del CTD de temperatura y salinidad alcanzan rangos de 9°C a 6°C y 30 a 17 respectivamente, las mayores temperaturas se alcanzan a lo largo de la columna de agua de Gajardo y Fitzroy y en los primeros 50 m en el centro de seno Skyring, que disminuye con la profundidad. Las mayores salinidades fueron registradas en los bordes; Gajardo y Fitzroy, en la zona central de Skyring la salinidad superficial alcanza 18 hasta los 50 m que disminuye con la profundidad, sin la presencia de altos gradientes verticales. Estos valores de temperatura y salinidad fueron replicados por el modelo, pero el modelo no logra replicar la capa superficial hasta 50 m de profundidad de salinidad 18 y sobre 8°C de temperatura en el centro de seno Skyring.



**Figura 39.** Perfiles verticales del transecto. La columna izquierda corresponde a los campos obtenidos a través de la modelación, la columna derecha corresponde a las variables medias de CTD de campañas realizadas por IFOP.

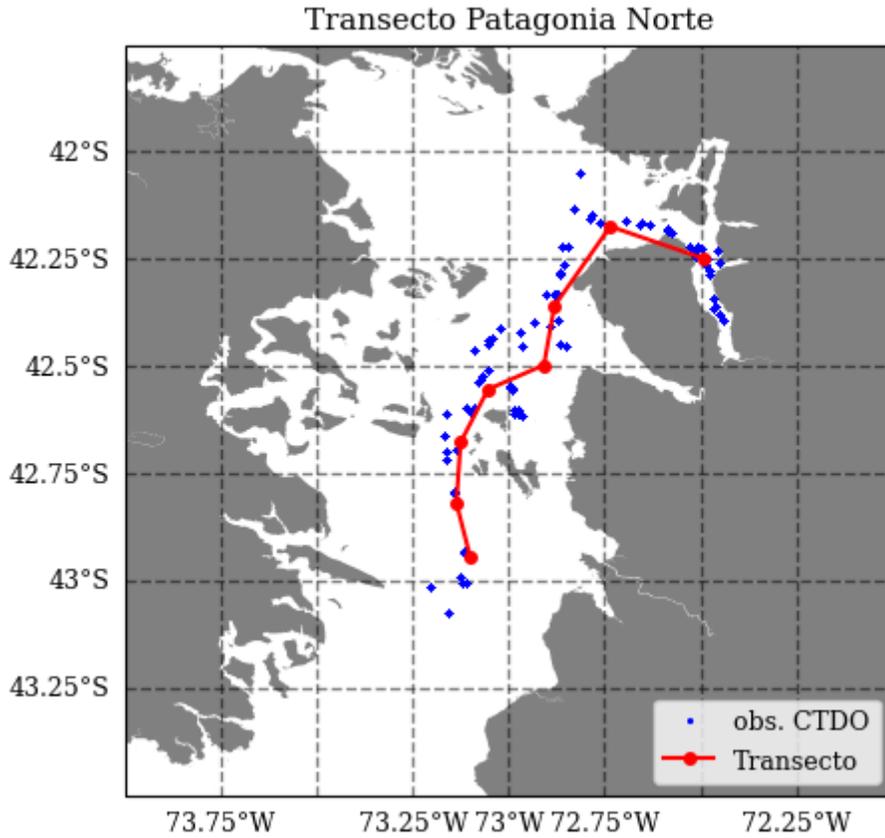
La capa superficial ( $z=0$ ) del modelo (**Fig. 40**) muestra la distribución espacial de la concentración de oxígeno disuelto en el sistema Skyring, donde se observa una superficie con altas concentraciones de oxígeno entre 7 mg/L y 12.5 mg/L, con un promedio espacial de 9.3 mg/L. Se observa que el borde oeste (canal Gajardo) presenta menores concentraciones de oxígeno comparativamente que el borde este (Fitzroy hacia seno Otway), un punto que destaca son las altas concentraciones de oxígeno disuelto en canal ventisquero (zona noroeste de Skyring) que alcanzan 13 mg/L.



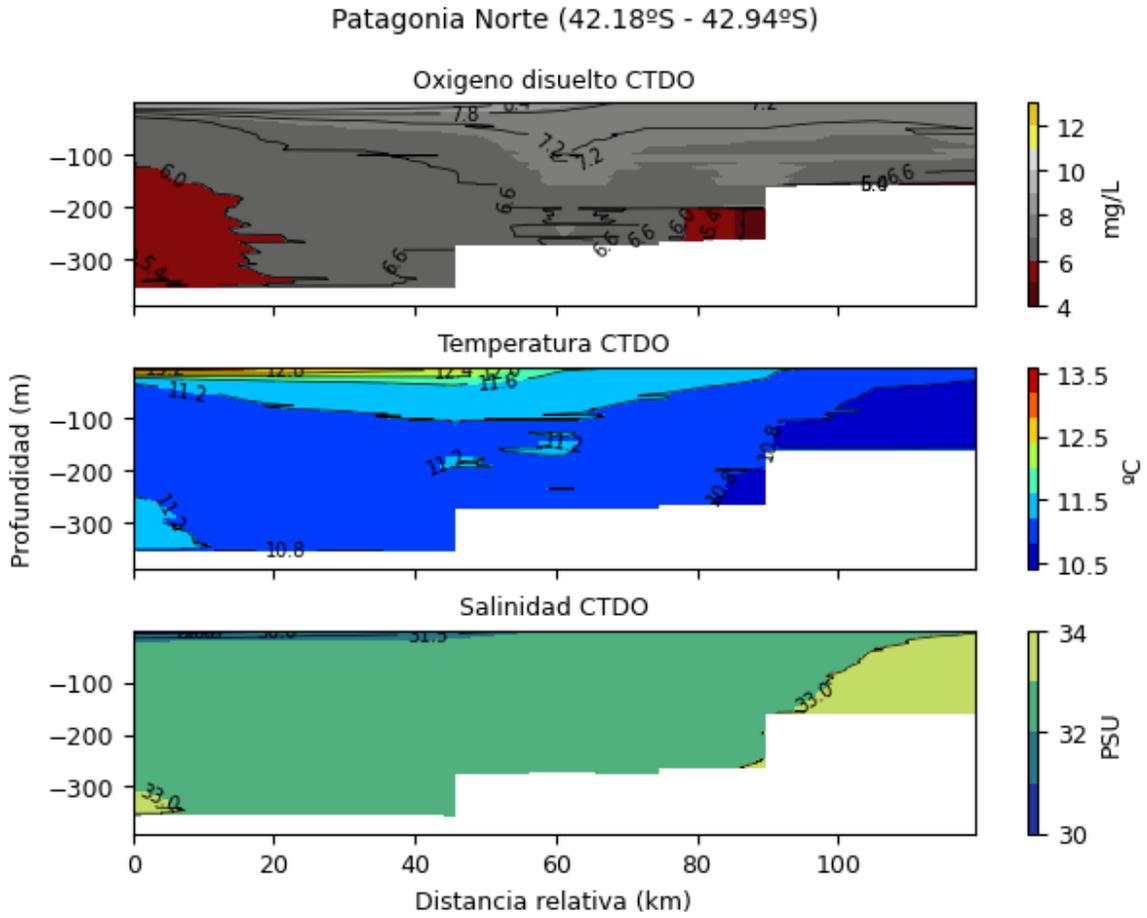
**Figura 40.** Promedio de oxígeno disuelto para la capa superficial ( $z=0$ ) para los periodos 2016, 2017, y 2018.

Con el objetivo de tener una referencia de la estructura y distribución espacial del oxígeno disuelto fuera de Skyring, se utilizó la metodología descrita al inicio para obtener una transecta de CTDO en un segmento de Patagonia Norte (**Fig. 41**) entre las latitudes 42.18°S - 42.94°S. Según lo anterior, se buscaron suficientes observaciones (a una distancia máxima de 16 km de las coordenadas representantes) que pudieran presentar una cobertura temporal que contenga todas las estaciones del año, para luego obtener una transecta promedio. Esta vez se consideró la base de datos histórica de IFOP y cruceros CIMAR. Los resultados obtenidos se presentan en la **Figura 42**.

De la transecta extraída en Patagonia Norte (**Fig. 42**) se observa que el oxígeno disuelto tiene rangos inferiores al de Seno Skyring, entre 6.6 mg/L y 8.9 mg/L y un promedio de 4.3 mg/L. A diferencia de Seno Skyring, se observa que las áreas con mayor concentración OD (8.9 mg/L), no superan los 50 m de profundidad, se distribuye entre los 0 m y 20 m de profundidad.



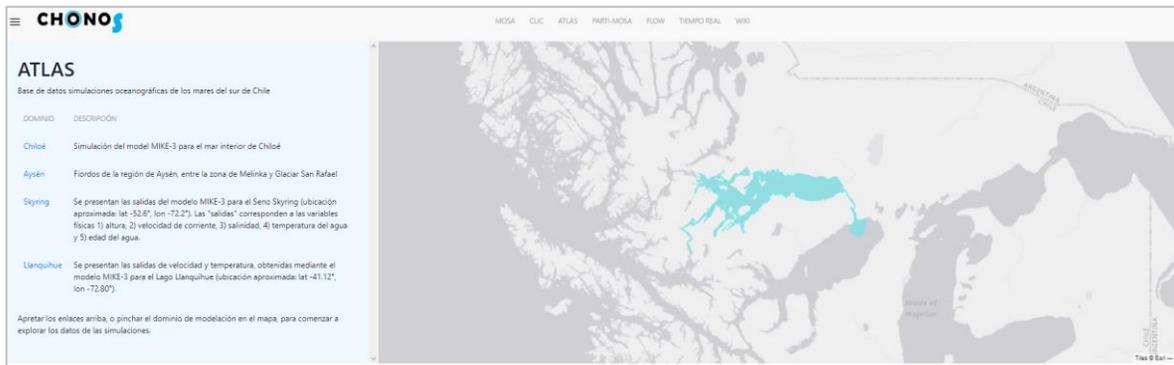
**Figura 41.** Transecto de perfiles verticales para segmento de Patagonia Norte. En rojo se muestran las coordenadas representantes para las cuales se obtuvieron valores medios, en azul se muestran las observaciones recopiladas a partir de campañas IFOP y cruceros CIMAR.



**Figura 42.** Transecto de perfiles verticales para segmento de Patagonia Norte.

**4.4 Objetivo 2.2.4.** Generar mapas de tiempos de intercambio de agua y de variables oceanográficas modeladas para el seno Skyring acoplados a la plataforma de información oceanográfica Chonos.

La herramienta web ATLAS, de la plataforma Chonos (**Fig. 43**) fue utilizada para visualizar interactivamente los resultados derivados de este estudio, no tan solo a través de la generación de mapas de intercambio de agua, sino también, de todas las variables que derivan del modelo hidrodinámico, esto es, corrientes, temperatura, salinidad. El acceso es público, y puede ser visualizado entrando a la portada de sistema de Información Chonos (chonos.ifop.cl) o bien directamente a la aplicación ATLAS en <http://chonos.ifop.cl/atlas/>.

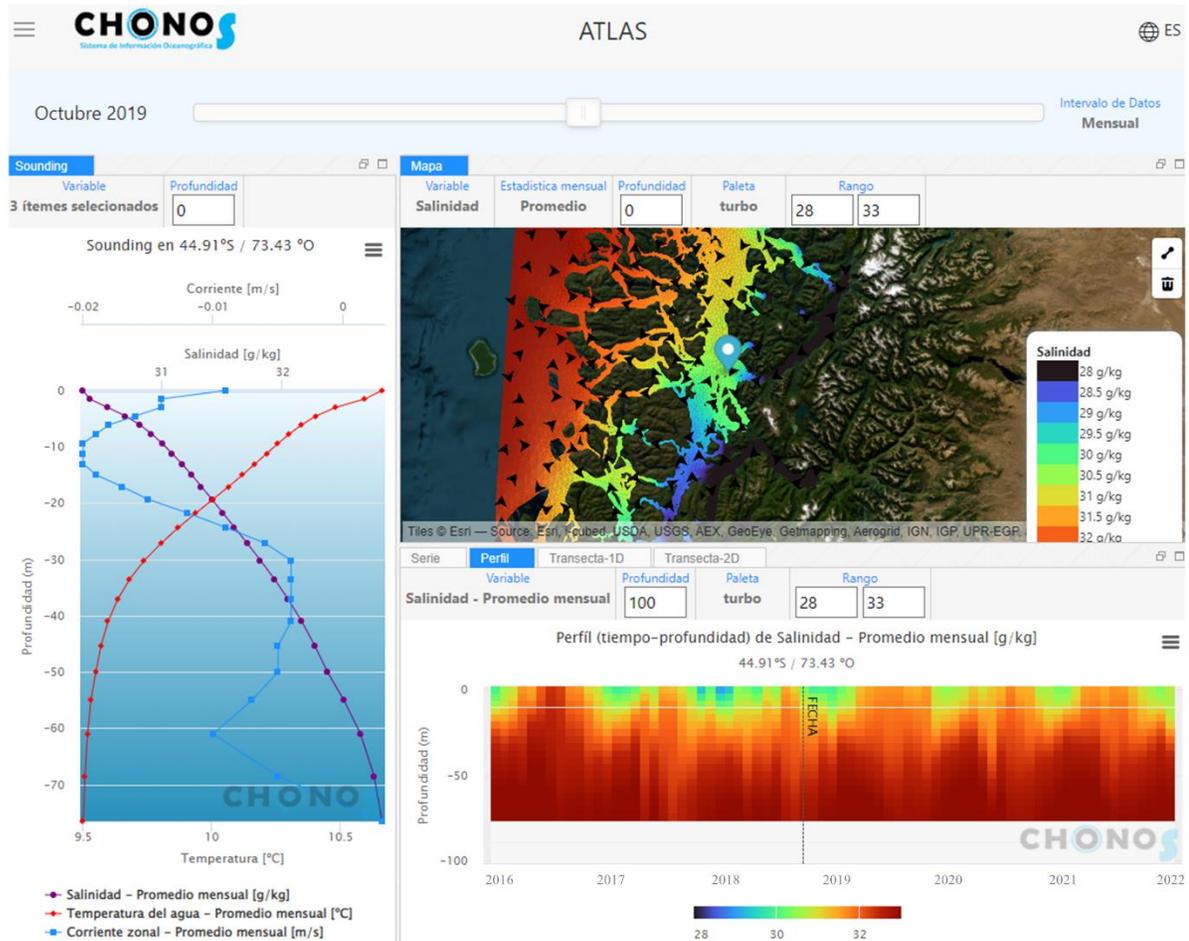


**Figura 43:** Interfaz de la plataforma de información geográfica ATLAS, perteneciente al sistema de información oceanográfica CHONOS.

Este sistema cuenta con una serie de herramientas para facilitar la apropiación de la información por parte de los usuarios, tales como: generación de mapas para distintas profundidades, perfiles verticales, series de tiempo y secciones verticales espaciales y temporales. Además, cuenta con un botón que permite navegar en el tiempo, de esta forma el usuario puede apreciar las variaciones temporales de todas variables antes detalladas. Finalmente, cada una de estas herramientas cuenta con un botón de descarga de datos en formato .CSV o XLS, así como también de figuras en distintos formatos (.jpg, .png, etc.). La plataforma cuenta con un tutorial para facilitar el uso de cada una de las herramientas por parte de los usuarios.

**4.5 Objetivo 2.2.5.** Actualizar periodo modelación en los modelos hidrodinámicos ya implementados en la región de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para visualización en plataforma Chonos.

Los modelos hidrodinámicos para los mares interiores de la región de los Lagos y Aysén fueron actualizados para el periodo 2019-2021, sumándose a los ya existente en el periodo 2015-2018. Los resultados pueden verse directamente en la plataforma CHONOS (Reche et al. 2021), bajo la herramienta ATLAS <http://chonos.ifop.cl/atlas/>.



**Figura 44:** Interfaz de ATLAS, con la disponibilidad en información en la región de Aysén para el periodo 2016-2021.

## 5. DISCUSIÓN

---

Seno Skyring es un sistema estuarino semi cerrado en la región de Magallanes, con una conexión limitada al océano costero, donde la acuicultura de cultivos de salmones está presente de manera intensiva, contando actualmente con 35 concesiones otorgadas y 30 solicitudes en trámite (<https://mapas.subpesca.cl/ideviewer/>), razones que hacen necesaria la búsqueda e integración de información oceanográfica para la adecuada toma de decisiones. Este ecosistema marino tiene características particulares que lo diferencian de la Patagonia norte (Lat. 41°S a 47°S), entre los cuales se encuentran una conformación geológica intrincada que reduce el intercambio de agua con el océano exterior, limitando la propagación de la onda de marea, y el transporte de masas de agua de origen oceánico, aspectos que son muy relevantes como características oceanográficas en la Patagonia Norte. En ausencia de la energía de las mareas, los patrones de viento en la región de Magallanes, reconocidos por su alta energía, emergen como uno de los principales forzantes de su circulación. Por otra parte, la ubicación remota del seno Skyring y adversas condiciones climáticas hacen de la toma de datos oceanográficos un desafío mayor. A continuación, se detalla cada uno de estos aspectos que interactúan en el balance de la circulación y las características físicas en Seno Skyring, sus tasas de renovación y la relación con el oxígeno disuelto, esto derivado a partir de un conjunto de mediciones in situ, así como a través de modelación numérica.

El seno Skyring, se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de las constricciones de canal Gajardo y Fitz-Roy, estas generan la formación de ambientes con características oceanográficas disímiles. El canal Fitz-Roy, presenta bajas profundidades (<10 m) y conecta de manera limitada con el Seno Otway, cuyas condiciones hidrográficas observadas no se registran dentro del seno Skyring (Valdenegro y Silva 2003). Por otra parte, la constricción de lado oeste, en canal Gajardo, es aún más limitada (~5 m), sin embargo, no es conocida en su detalle debido a la ausencia de una batimetría más detallada que permita conocer con exactitud la geometría de esa zona de conexión, esto es un aspecto importante por resolver, ya que puede influenciar de forma dramática los resultados del intercambio de agua entre la cuencas internas y externas.

La información hidrográfica recopilada en 2012 y 2013 (Pinilla et al. 2013) mostraba que la salinidad el seno Skyring presentó una relativa baja variabilidad (rango de 15 a 20) en toda la columna de agua, mientras que la zona externa, fuera de las constricciones, exhibió valores superficiales relativamente bajos (~15), pero también valores mayores a 30 de salinidad en capas más profundas, indicando una mayor influencia oceánica y con mayor tendencia a la estratificación que el propio seno Skyring. Por otra parte, se reveló una disminución de la amplitud del nivel del mar al interior del seno, que sugería, una disipación importante de la energía de la onda de marea al encontrarse con los límites topográficos antes detallados.

Uno de los efectos de la atenuación de la onda de marea al interior del seno Skyring es que en las observaciones de corrientes realizadas entre el año 2021 y 2022, no registraron la señal de marea

significativamente, la varianza explicada por la banda semidiurna y diurna en la corriente es  $< 6\%$  y  $< 2\%$  respectivamente, la banda sinóptica (2 -16 días) explicó el 50% (Gajardo) y 24% (Isla Escarpada) de la varianza total de la corriente. Las corrientes (entre 7 m y 100 m.) dentro del Seno Skyring son lentas, con un promedio entre 5 cm/s - 2 cm/s y máximas velocidades que alcanzan 20 cm/s.

Los análisis de las corrientes observadas a través de ADCP sugieren que en este sistema es el ingreso de agua dulce y sobre todo el viento, quienes gobiernan la circulación. Ambos forzantes presentan un régimen estival en donde; las mayores descargas de agua dulce son por deshielo glaciar en primavera/verano en el mismo periodo dominan viento de alta magnitud (del oeste) mientras que en invierno el ingreso de agua dulce disminuye o es totalmente limitada por las bajas temperaturas, donde se congelan ríos y cascadas, en este periodo domina; baja radiación, bajas temperaturas y baja magnitud del viento con algunos eventos de alta magnitud (viento del oeste). En eventos prolongados de bajas temperaturas (negativas) se ha registrado hielo marino, esto ocurrió durante el crucero oceanográfico desplegado en invierno de 2022.

De esta manera, el sistema presenta una componente estacional relevante y alta energía espectral en la banda sinóptica, entre 2 y 8 días, esto difiere en gran medida al comportamiento en la Patagonia norte, en donde la energía espectral se concentra fuertemente en la banda de 12 horas, asociada a la constituyente semidiurna (M2) de la marea. Esto indicaría que, en general, el seno Skyring está oscilando en frecuencias distintas y más bajas que la Patagonia Norte, probablemente asociado a la acción de los vientos. Esto se evidenció en diferentes variables; corriente, nivel del mar, temperatura, salinidad y oxígeno en toda la columna de agua, sin embargo, hay oscilaciones en la corriente que responden a frecuencias distintas a las que oscila el viento, lo que se podría relacionar a la interacción del viento con la geometría de seno Skyring generando oscilaciones internas más complejas, las cuales no fueron investigadas en profundas pero que debiesen ser fruto de futuras investigaciones.

Bajo las condiciones antes detalladas, se implementó un sistema de modelación que incluyó: un modelo barotrópico de mareas, un modelo hidrológico para estimar los caudales de las descargas de agua dulce y un modelo meteorológico que proveyera no solamente el viento sino también, la presión atmosférica y los flujos de calor desde la atmósfera. Estos modelos suministraron la información de entrada para la inicialización del modelo hidrodinámico y que fue implementado, en esta etapa, para los años 2016 y 2017. La importancia de la implementación de un modelo hidrodinámico no solo radica en la información física que puede obtenerse a través de este, sino que es el modelo base para acoplar otro tipo de modelos, como aquellos para estimar el intercambio de agua a través de métricas como la edad de agua, utilizada en este estudio, pero también de modelos biogeoquímicos más complejos o de conectividad basada en individuos.

Las condiciones de viento modeladas por el modelo atmosférico WRF son consistentes con otras fuentes de información que fueron utilizadas para medir su desempeño, tales como una estación

meteorológica ubicada en el sector este del seno y el producto grillado global CCMP. Ambas bases de datos (WRF y CCMP) se encuentran en fase, presentan una alta relación lineal, bajo error en magnitud y congruencia en la dirección de viento según las observaciones, esto revela la capacidad del modelo WRF de reproducir el forzamiento del viento en el dominio de seno Skyring. El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con una marcada componente de viento que sopla desde el oeste y que se mantiene durante todo el año, mientras que su intensidad es mayor durante la primavera y se debilita hacia los meses de otoño.

Por otra parte, la información de descargas de agua dulce simuladas por el modelo VIC, muestra un adecuado ajuste con las observaciones fluviométricas de la DGA ( $r > 0.7$ ). Las estimaciones revelan un caudal medio acumulado de  $138 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para todo el sistema, muy por debajo, por ejemplo, a lo estimado en las cuencas del río Puelo ( $\sim 645 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) o Palena ( $\sim 812 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), ambos ríos con un importante aporte de agua dulce en la Patagonia. Los aportes de agua dulce en seno Skyring muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo de  $\sim 175 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , y mínimos durante la época de invierno que llegan a  $\sim 75 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  durante julio. La diferencia estacional entre verano (DEF) y primavera (SON) revela un patrón espacial que divide al sistema en dos fuentes de variabilidad. Al oeste del sistema la señal de caudales es dominada principalmente por la descarga ocurrida durante los meses de verano, resaltando la importancia del derretimiento de las masas de hielo presentes en esta zona del dominio y por su parte al este de  $72.5^\circ\text{O}$ , la estacionalidad se vuelve más importante durante primavera, lo cual sugiere un mayor dominio de la precipitación sobre la descarga en esta zona.

La variabilidad interanual de las descargas de agua dulce en seno Skyring muestra una tendencia positiva en los caudales de  $0.52 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{año}^{-1}$ . La señal interanual muestra una variabilidad con una desviación estándar de  $14 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los  $160 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los  $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Cabe señalar que el modelo hidrodinámico simuló el año 2016 y 2017 que coincide con un periodo de mínimos caudales (periodo 1980-2018), esto sugiere un impacto, tanto en las características hidrográficas del seno durante estos años y también en su capacidad renovación, este punto es retomado más adelante.

Dentro de la evaluación de modelos hidrodinámicos, una pregunta relevante de responder es si los modelos disipaban la energía de la marea al ingresar al seno Skyring, tal como lo muestran las observaciones. La respuesta simple, es que sí. Comparativamente la amplitud de  $M_2$  en el mareógrafo y modelo en el extremo sur del canal Fitzroy (punto previo a la constricción) registró una amplitud 0.45 m mayor a la amplitud que registró el mareógrafo y modelo en el centro norte del canal Gajardo (punto posterior a la constricción) y 0.45 m mayor que dentro del Seno Skyring. Esto indica que la marea no es forzante relevante en la dinámica al interior del seno Skyring, pero sí puede serlo como agente en el intercambio de agua con los canales de conexión Gajardo y Fitzroy. En general, la marea es un forzante importante en la Patagonia chilena, que en algunos casos explica sobre el 80% de la variabilidad de la corriente total y el constituyente que explica mayor varianza es  $M_2$ . En la Patagonia

Norte la amplitud de  $M_2$  alcanza entre 1 y 1.8 m entre Guafo y Reloncaví (Aiken, 2008) y dentro de Skyring  $M_2$  alcanza una amplitud cercana a 0.02 m. Lo que apunta a la importancia de los umbrales topográficos en el sistema Skyring.

El modelo hidrodinámico en el seno Skyring logra reproducir los principales atributos de este sistema marino. Por una parte, la hidrografía representada por los campos de temperatura y salinidad es bien definida, tanto espacial como temporalmente. Esto considerando que las observaciones de estaciones de CTD se realizaron en un período distinto de modelación y que la simulación fue realizada para años con un déficit importante en descarga de agua dulce (2016-2017). Por otra parte, los principales modos de variabilidad de la corriente son coincidentes entre el modelo y un perfilador de corrientes desplegado en el año 2021, años distintos, pero expresiones similares en su estructura. El análisis mediante EOF reveló que el modo 1 y que explica la mayor parte de la variabilidad, es coincidente con la señal del viento zonal, esto revela al viento como principal agente en la circulación en seno Skyring. La circulación superficial sigue un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oeste-este, de la misma forma en que se presenta la estructura espacial del viento, así durante la primavera al registrarse la mayor energía del viento, también se produce la respuesta de las corrientes a incrementar su intensidad, dicho lo anterior, la incertidumbre de la variabilidad espacial de las corrientes en el modelo debe ser considerada, existiendo espacios enormes con poca información batimétrica es esperable que en estos lugares el modelo no responda con exactitud. Por otra parte, los únicos ríos con que pudo validarse el modelo hidrológico no pertenecen al sistema glaciar Gran Campo Nevado, por lo que podemos estar subestimando el ingreso total de agua dulce en los periodos de deshielo.

### **Intercambio de agua**

Las escalas de tiempo de transporte, agrupa una serie de conceptos relativos al tiempo que toma a una masa de agua en moverse de un cierto lugar, respecto de las cuales, existen aún diversas definiciones y métodos para cada una de estas (por ejemplo: tiempo de residencia, edad del agua, tiempo de tránsito, tiempo de renovación, “flushing time”), para evitar malentendidos e incluso conclusiones erróneas, es importante introducir definiciones precisas y utilizarlas con cuidado (Bolin y Rodhe, 1973). La edad del agua es definida como el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua. (Bolin y Rodhe, 1973; Delhez et al., 1999; Monsen et al., 2002), en seno Skyring, estos límites coinciden, por una parte, con los bordes abiertos (canales Gajardo y Fitzroy) y por las descargas de agua dulce, en ambos casos la edad en esos límites es igual a 0, por lo tanto, el agua externa de mayor salinidad, y el agua dulce, son las fuentes por donde se renueva el sistema interior. Sin embargo, la colocación de los límites para definir una región de interés es una elección arbitraria, e influirá en los valores absolutos de las escalas de tiempo (Sandery y Kämpf, 2007). Hasta cierto punto, las distribuciones de escala temporal en el sistema son relativas por naturaleza, por consecuencia los patrones similares serán vistos sin importar la localización del límite (Sandery y Kämpf, 2007), lo cual, indica que los valores absolutos de la edad del agua son menos relevantes que la estructura espacial y temporal que esta adopta.

La noción de lo relativo de las escalas de transporte debe ser tomado en cuenta, dado las distintas aproximaciones, en cuanto al método y la elección del dominio de control que son utilizadas, por tanto, las comparaciones con otras métricas o métodos como aquellos analíticos utilizando datos observaciones en algunos fiordos en Chile (Guzmán y Silva 2013; Calvete y Sobarzo 2011; Valle-Levinson et al., 2007; Salinas et al. 2002) pueden ser inadecuados e inducir a conclusiones erróneas.

La edad del agua en seno Skyring presentó valores de ~15 años (~5500 días), estos son valores extraordinariamente altos comparados con estudios similares realizados en la Patagonia norte (regiones de los Lagos y Aysén), si bien existe variabilidad a lo largo del año, y lugares con mejor renovación, estos valores siguen siendo altos ~13.7 años (~5000 días). Este número representa cerca de 10 veces más tiempo de los estimado para la zona de mayores edades en la región de Aysén, específicamente en las cercanías del fiordo Cupquelán (~500 días). De acuerdo con la definición de la edad del agua empleada en este trabajo, el volumen de agua que renueva el sistema depende de la entrada de aguas externas y de los ríos, en ambos casos estas fuentes de renovación son débiles. Si consideramos que la suma de todas las descargas que desembocan al seno Skyring tiene un valor medio anual  $138 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (media anual 1980-2018) y que el año 2016 representó valores deficitarios (~ $120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ), entonces parecen plausibles valores altos de edad del agua.

### Dinámica del oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es una medida importante de salud en estuarios, y en especial en fiordos con umbrales batimétricos que, en la mayoría de los casos, no permiten una renovación rápida de las aguas en profundidad o impiden la circulación (Zhang et al., 2010). La lenta renovación de aguas de fondo o el impedimento de la circulación de aguas profundas, es comúnmente visto en cuencas que presentan un umbral somero (Silva y Vargas, 2014). Los fiordos de la Patagonia albergan una intensiva industria acuícola basada principalmente en la salmonicultura, por lo que la comprensión de los procesos que regulan la dinámica del oxígeno disuelto es crucial para estimar la capacidad de carga de estos sistemas y así mejorar la gestión de esta industria.

Se implementó un modelo simple y semi empírico de oxígeno disuelto en Seno Skyring, basado en el modelo de Hong y Shen (2013), en bahía Chesapeake, idéntica configuración de este modelo ha sido implementado por IFOP en la Patagonia Norte, con buen ajuste respecto observaciones (Pinilla et al. 2020b), permitiendo definir aquellos lugares con bajo contenido de oxígeno e hipoxia. Los resultados en seno Skyring muestran consistencia entre los patrones espaciales de OD modelados y las observaciones obtenidas por IFOP, presentando los mayores niveles de OD en la capa superficial y en las cercanías de los campos de hielo y ríos. En las capas profundas, los valores de oxígeno disuelto no disminuyen significativamente, manteniendo una cota inferior de aproximadamente  $6 \text{ mg L}^{-1}$ .

Tanto el modelo como las observaciones muestra a Seno Skyring como una zona de altos niveles de OD en la Patagonia en comparación a lo observado en el transecto extraído en Patagonia Norte (Fig. 6). La Patagonia Norte se encuentra influenciada por el ESSW (Agua Ecuatorial subsuperficial) que se origina en la región ecuatorial y, al desplazarse hacia el sur, pasa por la OMZ (zona mínima de

oxígeno), transportando agua pobre en oxígeno ( $3 - 4.5 \text{ mg L}^{-1}$ ) con alta concentración de nitratos ( $20-30 \text{ } \mu\text{M}$ ) y elevada salinidad (34,9) (Silva et al., 2009). Los estudios de masas de agua dentro de los fiordos y canales patagónicos detectaron la presencia del ESSW (Agua Ecuatorial subsuperficial) sólo en la Patagonia Norte, entre los  $41^{\circ}45^{\circ} \text{ S}$ . Esta masa de agua ingresa por la boca del Guafo, un canal profundo con  $\sim 200 \text{ m}$  de profundidad, y un ancho de  $35 \text{ km}$  (Sievers y Silva 2008; Pérez-Santos et al., 2014; Schneider et al., 2014). El ESSW es una de las principales causas que contribuyen a la hipoxia y al agua con bajo contenido de OD dentro de los fiordos patagónicos (por ejemplo, el fiordo Puyuhuapi y el canal Jacaf). Sin embargo, estas condiciones se encontraron en otras áreas alejadas de la influencia del ESSW, por ejemplo, el sistema Reloncaví (fiordo Reloncaví y Seno Reloncaví), el fiordo Aysén y el fiordo Quintralco (Silva y Vargas, 2014).

El modelo configurado en seno Skyring es una simplificación de la dinámica de OD, cuyo supuesto principal, es que el OD es controlado por tasas de constantes consumo de OD, ya sea por actividad biológica o química, mientras el trazador se transporta y mezcla, esto hace al modelo tenga una fuerte dependencia de las condiciones de borde (la masa de agua que se propaga), del transporte y la mezcla interna. De aquí se desprende que zonas con un lento intercambio (corrientes débiles), van a estar sujetas a un mayor consumo de OD por actividad biológica o química. Lo cierto, es que hasta ahora no conocemos los parámetros de respiración por actividad biológica/química en seno Skyring, pero tanto las mediciones como el modelo sugieren que el relativamente baja comparada con la Patagonia Norte, se hace necesario realizar experimentos que puedan demostrar esta hipótesis.

Las limitaciones de este modelo simple, es que no permite una predicción a corto alcance pues no simula la dinámica, por ejemplo, de fitoplancton ni los nutrientes, todos estos procesos se simplifican dentro la tasa de consumo de OD ( $B_c$ ), así es más hábil en estimar los presupuestos de OD, que la variabilidad de alta frecuencia. Dicho lo anterior, logra resultados aceptables, lo que indicaría que el componente físico (transporte y mezcla) y la propagación de las condiciones de borde son importante en la dinámica del OD en seno Skyring. El control físico sobre el oxígeno disuelto ha sido descrito en estuarios en otros lugares del mundo como un importante mecanismo en la variabilidad del oxígeno disuelto (Hong y Sheng 2013; England 1995; Wilson et al. 2008; Shen y Hong 2013).

Este modelo está sujeto a mejoras, como el ajuste de los parámetros mencionados anteriormente, extensión del periodo de modelación, mayor cobertura temporal en la recopilación de datos de calidad para su validación, y mejorar la información relacionada al aporte de OD de ríos, implementando campos variables en el tiempo para éstos. Sin embargo, permite una clasificación general de OD en la región y explorar hipótesis sobre los principales forzantes que intervienen en su dinámica espacial y temporal, por último, es de sencilla implementación y muy eficiente computacionalmente.

### **Información basada en modelos numéricos como herramienta operacional.**

La necesidad de mejorar el conocimiento de los procesos medioambientales relacionados con la interacción de la acuicultura con el medioambiente, pero también a nuevos desafíos como el cambio climático y la proliferación de algas nocivas, hacen que la disponibilidad de información marina sea esencial para la toma de decisiones, en ese contexto el grupo de Oceanografía y Clima, del Instituto

de Fomento Pesquero desarrolló la herramienta Chonos como un sistema de información oceanográfica basada en el desarrollo de modelos numéricos atmosféricos, hidrológicos y oceánicos (Reche et al., 2021). Cuenta con distintas aplicaciones, cada cual generada para responder diversos objetivos. Chonos tiene un ambiente flexible que permite a los usuarios navegar a través de distintas formas de presentar la información ambiental tales como: mapas, series de tiempo, perfiles verticales, etc. Además, cada una de estas aplicaciones cuenta con botones para descarga de la información.

Dentro de las múltiples herramientas de Chonos se encuentra ATLAS, que es una base de datos de información histórica basada en simulaciones del modelo hidrodinámico de malla no estructurada MIKE 3 FM (DHI, 2019) y que son resultado de los objetivos 4 y 5 de este proyecto. El modelo MIKE 3 FM integra información sobre las descargas de agua dulce utilizando el modelo FLOW-IFOP y el forzamiento atmosférico mediante el modelo WRF-IFOP. ATLAS incluye variables simuladas directamente (corrientes, temperatura, salinidad) y variables derivadas (como la edad del agua). Se almacenan como datos con estadísticas horarias y mensuales (media, máximo y mínimo).

La herramienta web ATLAS permite una interacción completa con el entorno marino simulado, ya que los usuarios pueden generar mapas, series temporales y perfiles verticales de los datos horarios y mensuales. Más información en más detalles sobre la configuración y validación de estos modelos en Pinilla et al. (2020b).

Por otra parte, recientemente se ha abierto dentro del sitio Chonos una WIKI <https://chonos.ifop.cl/wiki/>, que es una biblioteca digital que permite conectar los contenidos de Chonos con el fin de darle una explicación más simple. Entre los recursos que se encuentran disponibles están las explicaciones para cada herramienta, videos cortos enlazados a YouTube, reportes técnicos y publicaciones científicas. Por ejemplo, una guía paso a paso para ATLAS puede encontrarse en este enlace <https://chonos.ifop.cl/wiki/atlas-simulaciones-historicas/guia-de-uso/>.

## 6. CONCLUSIONES

---

En seno Skyring, se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de las constricciones de canal Gajardo y Fitz-Roy, estas limitan el ingreso de aguas oceánicas y generan la formación de 2 microcuencas con características oceanográficas distintivas.

Se implementó un modelo hidrodinámico tridimensional en seno Skyring y canales aledaños (2016-2017) forzado con información proveniente de modelos hidrológico, atmosférico y de mareas, todos estos modelos fueron evaluados y su desempeño es consistente con las observaciones.

Las descargas totales de agua dulce que desembocan en seno Skyring alcanzan un valor de  $138 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , siendo relativamente bajas respecto de otros sistemas marinos en la Patagonia, por otro lado, el modelo hidrológico muestra una tendencia al alza para el periodo 1980-2018, sin embargo, el año 2016, presentó anomalías negativas en sus caudales.

La energía de la onda de marea es disipada en por los umbrales batimétricos al ingresar al seno Skyring, donde su amplitud disminuye, por tanto, no es forzante relevante en la dinámica al interior del seno Skyring, pero sí puede serlo como agente en el intercambio de agua con los canales de conexión Gajardo y Fitzroy.

El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con una marcada componente de viento que sopla desde el oeste y que se mantiene durante todo el año, mientras que su intensidad es mayor durante la primavera y se debilita hacia los meses de otoño.

La circulación superficial sigue un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oeste-este, de la misma forma en que se presenta la estructura espacial del viento, así durante la primavera al registrarse la mayor energía del viento, también se produce la respuesta de las corrientes a incrementar su intensidad.

Seno Skyring presenta una alta energía espectral en la banda sinóptica, entre 2 y 8 días, al contrario de la Patagonia norte, en donde la energía espectral se concentra fuertemente en la banda de 12 horas, asociada a la constituyente semidiurna (M2) de la marea. Seno Skyring está oscilando en frecuencias distintas y más bajas que la Patagonia Norte, probablemente asociado a la acción de los vientos.

La edad del agua en seno Skyring presentó valores de  $\sim 15$  años, estos son valores extraordinariamente altos comparados con estudios similares realizados en la Patagonia norte (regiones de los Lagos y Aysén), esto representa cerca de 10 veces más tiempo de los estimado para la zona de mayores edades en la región de Aysén, fiordo Cupquelán ( $\sim 500$  días).

Tanto el modelo como las observaciones muestra a seno Skyring como una zona de alta concentración de oxígeno disuelto, esto en comparación a lo observado en Patagonia Norte ( $^{\circ}41 - 45^{\circ}$  S).

La información proveniente del modelo hidrodinámico en seno Skyring fue desplegada en la herramienta ATLAS en la plataforma CHONOS, con variables disponibles como: corrientes, temperatura, salinidad y edad de agua.

Fueron actualizados los modelos regionales de la región de los Lagos y de la región Aysén, también en ATLAS, actualmente el periodo de información cubre los años 2016-2021.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J., Montecinos, A., Garreaud, R., Urbina, M., & Iriarte, J. L. (2019). The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia. *Climatic Change*, 155(3), 417-435.

Aiken, C. M. (2008). Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).

Araya-Vergara, J. (1997). Geomorfología comparada de los fiordos de Chiloé y Aysén. Resultados del Crucero CIMAR 1 – Fiordos. Comité Oceanográfico Nacional, Valparaíso. Libro de Resúmenes: 15-17. Disponible en: [http://aysen.udec.cl/wp-content/uploads/Araya\\_Vergara\\_1996.pdf](http://aysen.udec.cl/wp-content/uploads/Araya_Vergara_1996.pdf).

Araya-Vergara, J. F. (1999). Perfiles longitudinales de fiordos de Patagonia Central. *Cienc. Tecnol. Mar.* 22: 3-29.

Araya-Vergara, J. (2006). Geomorfología submarina de fiordos y piedmonts patagónicos. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. N. Silva and S. Palma (Eds.). Valparaíso, Comité Oceanográfico Nacional Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: 25-27 pp.

Bendat, J. y Piersol, A. (1986). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley: pp. 566.

Bendtsen, J., Mortensen, J., Rysgaard, S. (2014). Seasonal surface layer dynamics and sensitivity to runoff in a high Arctic, *J. Geophys. Res.Oceans*, 119, 6461–6478.

Boghen, A.D. (1995). *Cold-Water Aquaculture in Atlantic Canada. Second Edition.* (Moncton): The Canadian Institute for Research on Regional Development.

Bolin, B., Rodhe, H., (1973). A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25, 58–62.

Boon, J.D. (2004). *Secrets of the Tide: Tide and Tidal Current Analysis and Applications, Storm Surges and Sea Level Trends*. Ellis Horwood, Chichester.

Boynton, W. R., Ceballos, M. A. C., Bailey, E. M., Hodgkins, C. L. S., Humphrey, J. L., Testa, J. M. (2018). Oxygen and Nutrient Exchanges at the Sediment-Water Interface: a Global Synthesis and Critique of Estuarine and Coastal Data. *Estuaries and Coasts*, 41(2), 301–333. <http://www.jstor.org/stable/44857931>

Buschmann AH, Cabello, F., Young, K., Carvajal, J., Varela, DA. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean Coast Manage* 52: 243–249.

- Bustos B. (2012). Brote del virus ISA: crisis ambiental y capacidad de la institucionalidad ambiental para manejar el conflicto. *Eure.* 38 (115) 219-245 pp. Disponible en [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612012000300010&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612012000300010&script=sci_arttext)
- Calvete, C., Sobarzo, M. (2011). Quantification of the surface brackish water layer and frontal zones in southern Chilean fjords between Boca del Guafo and Estero Elefantes. *Continental Shelf Research* 31 (3–4), 162–171.
- Carrasco, C., Silva, N. (2006). Comparación de las características oceanográficas físicas y químicas presentes en la zona de Puerto Montt a la boca del Guafo entre el invierno y la primavera de 2004 y entre las primaveras de 1995 y 2004. *Ciencia y Tecnología del Mar* 33(2): 17-44.
- Comité Oceanográfico Nacional. (2021). CIMAR 25 años, Cruceros de Investigación Marina en Áreas Remotas. 542 p. ISBN: 978-956-235-032-7. Disponible en: [http://www.cona.cl/pub/libros\\_RS\\_CIMAR/LRP\\_cimar\\_025.pdf](http://www.cona.cl/pub/libros_RS_CIMAR/LRP_cimar_025.pdf).
- Deleersnijder, E., Campin, J.M., Delhez, E.J.M. (2001). The concept of age in marine modelling: I. Theory and preliminary model results. *J. Mar. Syst.* 28, 229–267
- Deleersnijder, E., Mouchet, A., Delhez, E.J.M., Beckers, J.M. (2002). Transient behaviour of water ages in the world ocean. *Math. Comput. Model.* 36, 121–127.
- Deleersnijder, E., (2007). Timescale- and tracer-based methods for understanding the results of complex marine models. Editorial, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74.
- Delhez, E.J.M., Campin, J.M., Hirst, A.C., Deleersnijder, E. (1999). Toward a general theory of the age in ocean modelling. *Ocean Model.* 1, 17–27.
- Delhez, E.J.M., Deleersnijder, E. (2002). The concept of age in marine modelling II. Concentration distribution function in the English Channel and the North Sea. *Journal of Marine Systems* 31, 279-297.
- Delhez, E.J.M., Heemink, A.W., Deleersnijder, E. (2004). Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 691-702.
- DHI, (2019). Mike 3, User guide and reference manual. Danish Hydraulic Institute, Denmark
- England, M.H. (1995). The age of water and ventilation timescales in a global ocean model. *J. Phys. Oceanogr.* 25, 2756–2777.
- Emery, W. J., Thomson, R. E. (1998). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon Press: pp. 634.
- Fuentes J. (2014). Evolución del régimen ambiental de la acuicultura en Chile. *Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso* no.42 Valparaíso. [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-68512014000100013#footnote-33032-2](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-68512014000100013#footnote-33032-2).

Godoy, M.G., Aedo, A., Kibenge, M.J., Groman, D.B. (2008) First detection, isolation and molecular characterization of infectious salmon anaemia virus associated with clinical disease in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Chile. *BMC Vet Res* 4:28

Gregoire, M., Oguz, T. (2003). *Modeling Biogeochemical Processes in Marine Ecosystems*. UNESCO – EOLSS. Sample Chapters. Oceanography – Vol.III.

Guzmán, D., Silva, N., (2013). Caracterización físico-química de los canales australes. Modelo geoquímico del Fiordo Aysén. Editorial Académica Española, p. 106.

Gustafsson, K.E., Bendtsen, J. (2007). Elucidating the dynamics and mixing agents of a shallow fjord through age tracer modeling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74 (4), 641–654.

Haralambidou, K., Sylaios, G., Tsihrintzis, V.A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 90 (4), 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.08.010>.

Hirst, A.C. (1999). Determination of water component age in ocean models: application to the fate of North Atlantic Deep Water. *Ocean Modelling* 1, 81–94.

Hong, B., Shen, J. (2013). Linking dynamics of transport timescale and variations of hypoxia in the Chesapeake Bay. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6017–6029.

Hunter, J.R., Craig, P.D., Phillips, H.E. (1993). On the use of random walks models with spatially variable diffusivity. *Journal of Computational Physics* 106, 366–376.

Karstensen, J., Tomczak, M. (1998). Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. *Journal of Geophysical Research* 103 C9, 18599–18609.

Kawase, M., Bang, S. (2013). Seasonal variability of salinity and circulation in a silled estuarine fjord: a numerical model study. *Coni. Shelf Res.* 71:109-126.

Kendall, M.G., (1975). Rank correlation methods. London: Griffin.

Liang, X., Lettenmaier, D., Wood, E., Burges, S. (1994), A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14415–14428, doi:10.1029/94JD00483.

Oliveira, A., Baptista, A.M. (1997). Diagnostic modeling of residence times in estuaries. *Water Resour. Res.* 33 (8), 1935–1946.

Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259. doi:10.2307/1907187

Medina, Y., Muñoz, E. (2020). Estimation of Annual Maximum and Minimum Flow Trends in a Data-Scarce Basin. Case Study of the Allipen river Watershed, Chile. *Water*, 12(1), 162.

Mooers, C. (1973). A technique for cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarized components and rotational invariant. *Deep Sea Res.*, 20:1129 – 1141.

Monsen, N.E., Cloem, J.E., Lucas, L.V., Monismith, S.G. (2002). A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport timescales. *Limnology and Oceanography* 47 (5), 1545-1553.

Myksovoll, M.S., Sandvik, A.D., Skarðhamar J, Sundby S. (2012). Importance of high resolution wind forcing on eddy activity and particle dispersion in a Norwegian fjord. *Estuar Coast Shelf Sci* 113: 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.08.019>.

National Center for Environmental Prediction. (2000). NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, Continuing from July 1999. National Weather Service, U.S. Department of Commerce, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using `t_tide`. *Computers and Geosciences*, 28: 929 -937.

Pellicciotti, F., Burlando, P., & Vliet, K. V. (2007). Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River Basin, central Chile. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports*, 318, 17-38.

Pérez, T., Mattar, C., Fuster, R. (2018). Decrease in snow cover over the Aysén river catchment in Patagonia, Chile. *Water*, 10(5), 619.

Pérez-Santos, I., Garcés-Vargas, J., Schneider, W., Ross, L., Parra, S., Valle-Levinson, A. (2014). Double-diffusive layering and mixing in Patagonia Fjords, *Progr. Oceanogr.*, 129: 35-49.

Pinilla, E., Arriagada, M., Soto, G., Ruiz, C., Reche, P. (2013). Informe final. Caracterización y modelación de patrones de circulación marina en la región de Magallanes. Proyecto ASIPA – MINECOM. 108 p+Anexos. [http://190.151.20.106/exlibris/aleph/a23\\_1/apache\\_media/C8FMDIJG422MVHPXB7HKJ9RSLIF334.pdf](http://190.151.20.106/exlibris/aleph/a23_1/apache_media/C8FMDIJG422MVHPXB7HKJ9RSLIF334.pdf)

Pinilla, E., Arriagada, M., Soto, G., Ruiz, C., Reche, P. (2015). Informe final. Determinación de los patrones de circulación en los mares interiores de la región de Magallanes. Proyecto ASIPA – MINECOM. 183 p+Anexos.

Pinilla, E., Castillo, M., Pérez-Santos, I., Venegas, O., Valle-Levinson, A. (2020a). "Water Age Variability in a Patagonian Fjord." *Journal of Marine Systems*, Volume 210 103376. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103376>.

Pinilla, E., Soto, G., Soto-Riquelme, C., Venegas, O., Salas, P., Reche, P. (2020b) . Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la región de Los Lagos y región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Instituto de Fomento Pesquero - Subsecretaría de Economía 2020, pp. 66. [http://190.151.20.106/exlibris/aleph/a23\\_1/apache\\_media/GRTMPRA128Q17133LA11RY68VVXJ6H.pdf](http://190.151.20.106/exlibris/aleph/a23_1/apache_media/GRTMPRA128Q17133LA11RY68VVXJ6H.pdf)

Rodrigo, C. (2006). Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. N. Silva & S. Palma (eds.) Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 19-23, disponible en: <http://www.cona.cl/revista/spanish/2-1%20Topograf%C3%ADa%20submarina.pdf>.

Salinas, S., Fierro, J., Castillo, M., Letelier, J. 2002. Tiempo de residencia y proceso de mezcla en la cuenca sur de la constricción de Meninea. Libro de Resúmenes pág. 33-43. Taller sobre los resultados del Crucero Cimar 7 Fiordos. Valparaíso.

Sandery, P.A., Kämpf, J. (2007). Transport timescales for identifying seasonal variation in Bass Strait, south-eastern Australia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 74, 684–696.

Sarricolea, P., Meseguer Ruiz, O., Romero-Aravena, H. (2017). Tendencias de la precipitación en el norte grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático. *Diálogo andino*, (54), 41-50.

Schlitzer, R. (2017). Ocean Data View. <http://odv.awi.de>

Schneider, W., Pérez-Santos, I., Ross, L., Bravo, L., Seguel, R., Hernández, F. (2014). On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia, *Prog. Oceanogr.*, 129, 8–18

Shen, J., Wang, H.V., (2007). Determining the age of water and long-term transport timescale of the Chesapeake Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 74, 585–598.

Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation *Interpreting Multivariate Data* (pp. 21-36). Chichester: John Wiley.

Sievers, H. A., Calvete, C., Silva, N. (2002). Distribución de características físicas, masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR Fiordo 2), Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 25(2): 17-43.

Sievers, A.H., Silva, N. (2008). Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. In: N. Silva y S. Palma (eds.). *Progress in the oceanographic knowledge of Chilean inner waters, from Puerto Montt to Cape Horn*. Comité Oceanográfico Nacional, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 53-58.

Silva, N., Sievers, H., Prado, R. (1995). Descripción oceanográfica de los canales australes de Chile. Zona Puerto Montt-Laguna San Rafael (Crucero Cimar-Fiordo 1). *Revista de Biología Marina*. Valparaíso 30, 2, 207–254.

Silva, N., Calvete C., Sievers, H.A. (1997). Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero Cimar Fiordo 1). *Ciencia y Tecnología del Mar*, 20: 23 - 106.

Silva, N., Calvete, C., Sievers, H. (1998). Masas de agua y circulación para algunos canales australes entre Puerto Montt y Laguna San Rafael, Chile (Crucero Cimar- Fiordo 1). *Ciencia y Tecnología del Mar* 21, 17–48.

Silva, N., Palma, S. (2006). Producción científica del Programa CIMAR en los canales y fiordos Australes. Cruceros CIMAR 1 a 4 Fiordos, pp. 145-162. En: N. Silva & S. Palma (eds.). *Avances en el Conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos*. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 162 pp.

- Silva, N., Rojas, N., Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep-Sea Research, Part II* 56, 1004–1020.
- Silva N, Vargas CA. (2014). Hypoxia in Chilean Patagonian fjords. *Prog Oceanogr.*;129:62–74.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. In: NCAR Technical Note (475). p. 125.
- Thomson, R. E, Emery, W. J. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. New York: Elsevier, 638 pp.
- Valdenegro, A., Silva, N. (2003). Caracterización oceanográfica física y química de la zona de canales y fiordos australes de Chile entre el estrecho de Magallanes y cabo de Hornos (CIMAR 3 fiordo). *Ciencia y Tecnología del Mar* 26(2): 19-60.
- Valle-Levinson, A., Sarkar, N., Sanay, R., Soto, D., León, J. (2007). Spatial structure of hydrography and flow in a Chilean Fjord, Estuario Reloncaví. *Estuaries and Coasts* 30 (1), 113–126.
- Viero, DP., Defina, A. (2016). Water age, exposure time, and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow. *Journal of Marine Systems*, Volume 156, p. 16-29.
- Visser, A.W., (1997). Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. *Marine Ecology Progress Series* 158, 275–281.
- Walker, S.J., (1999). Coupled hydrodynamic and transport models of Port Phillip Bay, a semi-enclosed bay in south-eastern Australia. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 50, 469e481
- Wilson, R. E., Swanson, R., Crowley, H. (2008), Perspectives on long-term variations in hypoxic conditions in western Long Island Sound, *J. Geophys. Res.*, 113, C12011, doi:10.1029/2007JC004693.
- Zhang, W.G., Wilkin, J.L., Schofield, O. (2010). Simulation of water age and residence time in New York Bight. *J. Phys. Oceanogr.* 40, 965–982.
- Zimmerman, J.T.F. (1976). Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea. Part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Neth. J. Sea Res.*

# ANEXO I: Base de datos

## BASE DE DATOS

---

Los datos utilizados en este estudio se encuentran en una carpeta digital, adjuntado a la entrega de este informe. En esta carpeta los datos están ordenados por tipo de variables, así se puede ver los siguientes grupos:

1. ADCP: Datos de perfiladores acústicos de corrientes
2. CTD-OD: Datos de estaciones con perfiles de profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia.
3. Marea: Datos con las series de nivel del mar de cada punto.
4. Meteorología: Datos de estación meteorológica utilizada para variables de dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad, radiación y precipitación.

- Para cada caso, existe un archivo de metatada, donde se detallan las características de la medición como: tipo de equipo, lugar, periodo de medición, etc.
- También se adjuntan datos del año 2012, con la respectiva metatada.

## ANEXO II: Gestión del proyecto

## GESTIÓN DEL PROYECTO

---

### 1. REUNIÓN INVESTIGADORES IFOP PERSONAL SUBPESCA: 25/03/2021

- Fecha: • 25 marzo de 2021.
- Ubicación: • Video conferencia,
- Participantes:  
Susana Giglio           SUBPESCA  
Gabriel Soto            IFOP  
Elías Pinilla            IFOP

Objetivo de la reunión: Detallar mediciones, señalar las principales problemáticas, como los relacionados con los flujos de agua dulce, se indican la incorporación de información biogeoquímica a las mediciones de la hidrodinámica y los registros con series de tiempo (oxígeno disuelto, conductividad y temperatura). Además, se indica a contraparte técnica de SUBPESCA que, producto de la situación sanitaria (COVID19), la unidad de oceanografía se encuentra todavía en modalidad de teletrabajo.

### 2. REUNIÓN INVESTIGADORES IFOP PERSONAL SUBPESCA: 12/05/2021

- Fecha: • 12 mayo de 2021.
- Ubicación: • Video conferencia,
- Participantes:  
Susana Giglio           SUBPESCA  
Gabriel Soto            IFOP  
Elías Pinilla            IFOP

Objetivo de la reunión: Debido a que la parte más significativa de este estudio es una continuación del estudio oceanográfico del periodo anterior 2020-2021, focalizado en la zona de Seno Skyring. El retraso se ha estimado en alrededor de 7 meses. Los atrasos que se generaron producto de la serie de restricciones sanitarias COVID19, en el desplazamiento desde y hacia la región de Magallanes

2020-2021, tuvieron repercusiones en la actividad de este estudio. No obstante, la reprogramación de las actividades permitirá realizar los objetivos y su correcto desarrollo.

### **3. CONTRATACIÓN DE LA EMBARCACIÓN PARA REALIZACIÓN DE MEDICIONES:**

Para la realización de los cruceros oceanográficos de este estudio se realizó una licitación pública ID N°1049-26-LQ21, proceso que finalizó en septiembre de 2021. Producto de todos los retrasos que se generaron con las restricciones de ingreso a la región de Magallanes por motivos sanitarios (COVID19). Se reprogramaron para las mediciones de este estudio, debido a problemas con anterior embarcación contratada.

### **4. REUNIÓN INVESTIGADORES IFOP, SUBPESCA E INVESTIGADORES DEL INSTITUTO DE GEOGRAFÍA - PUC. PRESENTACIÓN ESTUDIO: “PRINCIPALES FUENTES DE AGUA DULCE QUE APORTAN AL SISTEMA DE MICROCUENCAS DE LA REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA (ETAPA 1). LICITACIÓN ID 4728-29-LQ20,” 15/09/2021**

- Fecha: • 26 de agosto 2021.
- Ubicación: • Video conferencia
- Participantes:

- Susana Giglio - SUBPESCA
- Gabriel Soto - IFOP
- Elias Pinilla - IFOP
- Alejandro Salazar - UC
- Francisca Flores - UC
- Luca Mao- UC
- Ricardo Carrillo - UC
- Juan Pablo del Pedregal - UC
- Joaquín Lobato - UC

Esta reunión fue organizada por la SSPA, para dar a conocer el estudio hidrológico que, mediante licitación pública, se adjudicó el grupo de la estación Patagonia (UC). En este estudio se determinarán los ciclos anuales de los principales flujos de agua dulce que descargan directamente dentro del se Skyring, junto con determinar diferentes propiedades físico-químicas de estos estos flujos. El principal

objetivo de esta reunión fue invitar al grupo de investigadores de oceanografía de IFOP (Putemún), para dar a conocer los detalles del estudio hidrológica que se ejecutara durante el 2021 y 2022. Durante el desarrollo de este estudio será generada información pertinente para el progreso del objetivo de balance de nutrientes.

## **5. CONTRATACIONES EXTERNAS:**

- Subcontratación asesoría desarrollo y mejora portal WEB Chonos etapa 4:  
Consultor: MeteoData, INGENIERIA Y GEOFISICA LTDA.

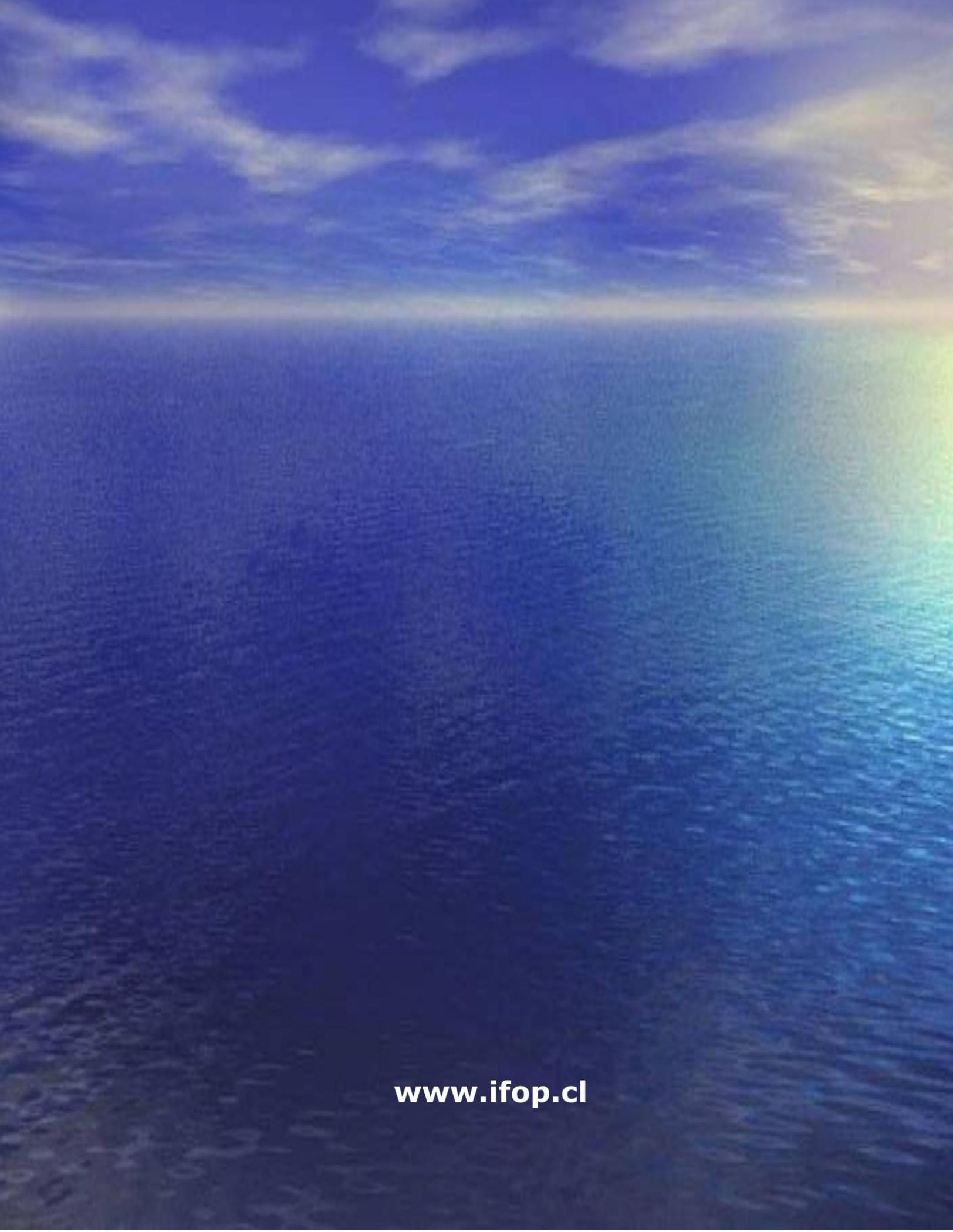
Iniciado: 23/02/2022      finalizado: 30/11/2022



---

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO  
Almte. Manuel Blanco Encalada 839  
Fono 56-32-2151500  
Valparaíso, Chile  
[www.ifop.cl](http://www.ifop.cl)

---



[www.ifop.cl](http://www.ifop.cl)