



INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2020:

Determinación de las escalas de intercambio de agua en
seno Skyring y canales aledaños, región de Magallanes y
Antártica chilena

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT /noviembre 2021

INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2020:

Determinación de las escalas de intercambio de
agua en seno Skyring y canales aledaños,
región de Magallanes y Antártica chilena

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / noviembre 2021

REQUIRENTE

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

Subsecretaria de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Julio Pertuzé Salas

EJECUTOR

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Director Ejecutivo
Luis Parot Donoso

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

JEFE PROYECTO

Elías Pinilla Matamala

AUTORES

Elías Pinilla Matamala
Gabriel Soto Soto
Pedro Valdebenito Muñoz
Camila Soto Riquelme
Oliver Venegas Mella
Javiera San Martín Parra

COLABORADORES

Patricio Salas Salas
Javier Cortes Puebla

RESUMEN EJECUTIVO

Las escalas temporales de transporte, tales como: la edad del agua o el tiempo de residencia, 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, tales como: temperatura, salinidad, clorofila, nutrientes u oxígeno disuelto, transformando a este tipo de métricas, en instrumentos de gran utilidad para la gestión marina.

Este estudio determinó el patrón de circulación y los tiempos de recambio de agua para el seno Skyring, región de Magallanes. Los objetivos específicos involucran: 1) la implementación de un modelo hidrodinámico, 2) modelo de trazadores para determinar la edad de las aguas y 3) el despliegue de toda la información generada en la plataforma CHONOS de IFOP.

Se implementó un sistema de modelación que incluyó: un modelo barotrópico de mareas, un modelo hidrológico para estimar los caudales diarios agua dulce y un modelo meteorológico 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 en esta etapa, para los años 2016 y 2017. 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 grillaado global CCMP. El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 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.

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 ($r > 0.7$). De acuerdo a 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 y 2017 y que este coincide con un periodo de mínimos caudales (periodo 1980-2018).

Al interior de seno Skyring se evidenció una disminución de la amplitud de los constituyentes mareales. La disipación de la energía de la onda de marea responde a la presencia de umbrales

topográficos en los canales de acceso a seno Skyring. Lo anterior indica que la marea no es forzante relevante en la dinámica al interior del seno Skyring, pero si puede serlo como agente en el intercambio de agua en los canales de conexión Gajardo y Fitzroy.

El modelo hidrodinámico en el seno Skyring logra reproducir los principales atributos de este sistema marino. Por una parte, la hidrografía representada en el modelo por los campos de temperatura y salinidad es consistente con las estaciones de CTD, tanto espacial como temporalmente. Esto considerando que las observaciones de estaciones de CTD se realizaron en un periodo distinto de modelación. Por otra parte, los principales 3 modos de variabilidad de la corriente son coincidentes entre el modelo y un perfilador de corrientes desplegado en el año 2013, años distintos, pero con 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 sugiere al viento como el principal agente en la circulación al interior del 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 incrementando 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).

INDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO		i
ÍNDICE GENERAL		iii
1. ANTECEDENTES		1
2. OBJETIVOS		3
2.1 Objetivo general		3
2.2 Objetivos específicos.....		3
3. METODOLOGÍA		4
3.1 Objetivo específico 2.2.1		4
3.2 Objetivo específico 2.2.2		16
3.3 Objetivo específico 2.2.3		17
4. RESULTADOS		
4.1 Objetivo específico 2.2.1		18
4.2 Objetivo específico 2.2.2		38
4.3 Objetivo específico 2.2.3		41
5. DISCUSIÓN		47
6. CONCLUSIONES		52
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		54

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, 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, nutrientes, O₂ y CO₂ disueltos (Sandery y Kämpf, 2007). Por ejemplo, la producción biológica marina es modificada mediante procesos físicos como la mezcla y surgencia de nutrientes, penetración de luz, confinamiento de fitoplancton en la zona eufótica por estratificación o el aporte de nutrientes por descargas de ríos (Gregoire, 2003). Los nutrientes en un estuario también dependen en gran medida de los atributos físicos del mismo estuario, ya que el tiempo de renovación determina la cantidad de tiempo que los nutrientes permanecen en el sistema y están disponibles para los procesos biológicos. Se ha sugerido que el tiempo de renovación de aguas 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, 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 diversos métodos y métricas para cuantificarlo, tales como: "flushing time", tiempo de residencia o la edad del agua que permiten 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, 2007; Gustafsson, 2007; Zhang et al 2010, Kawase, 2013; Hong et al, 2013; Bendtsen, 2014; Viero, 2016, Pinilla et al. 2020).

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 requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua. (Bolin and 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 Kämpf, 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, 2001). En cambio, un enfoque euleriano permite que las masas de agua que interactúan sean modificadas por procesos advectivos y difusivos, (Delhez, 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, 2007).

1.2 Antecedentes del proyecto Escalas de Intercambio de Agua en fiordos de la Patagonia.

En las etapas anteriores de este proyecto, (2017-2018, 2018-2019 y 2019-2020) (Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia norte), se determinaron la circulación, características físicas del agua (temperatura salinidad) y la edad del agua en las cuencas del mar interior de Chiloé, región de Los Lagos y región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, desde la boca del Guafo hasta la laguna San Rafael, de manera tal, de poder determinar espacial y temporalmente los procesos que influyen la ventilación de sus cuencas, o bien, el confinamiento de sus aguas y como se relaciona esto con la variabilidad, por ejemplo, del oxígeno disuelto. Los modelos implementados fueron validados con observaciones recopilados como parte de estos mismos proyectos y otros estudios que llevó a cabo IFOP.

Los resultados derivados de los proyectos en las regiones de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para el periodo 2017-2019, fueron levantados en la plataforma de información oceanográfica CHONOS, en específico, bajo la herramienta ATLAS (<http://chonos.ifop.cl/atlas/>), la cual, es una biblioteca que integra y despliega la información antes descrita de manera interactiva, haciendo posible su visualización y descarga. La información derivada de esta serie de estudios ha sido utilizada en publicaciones científicas de alto impacto

relativo por ejemplo a: floraciones algales nocivas en la región de los Lagos (Mardones et al. 2021), en la región de Aysén (Díaz et al. 2021), para comprensión de procesos físicos de ventilación en el fiordo Puyuhuapi (Pinilla et al. 2020), o de ecología de poblaciones de mitílidos (Yévenes et al. 2021).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar las escalas de tiempo del intercambio de agua en seno Skyring y canales de aledaños de la región de Magallanes.

2.2. Objetivos específicos

- 2.1.1 Modelar hidrodinámicamente la variabilidad anual de seno Skyring.
- 2.1.2 Calcular el intercambio de agua mediante un modelo de trazadores acoplados al modelo hidrodinámico.
- 2.1.3 Generar mapas de tiempos de intercambio de agua montados en una plataforma de información geográfica.

3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo específico 2.2.1: Modelar hidrodinámicamente la variabilidad anual de seno Skyring.

Simular la hidrodinámica de un sitio como 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 información batimétrica.

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.

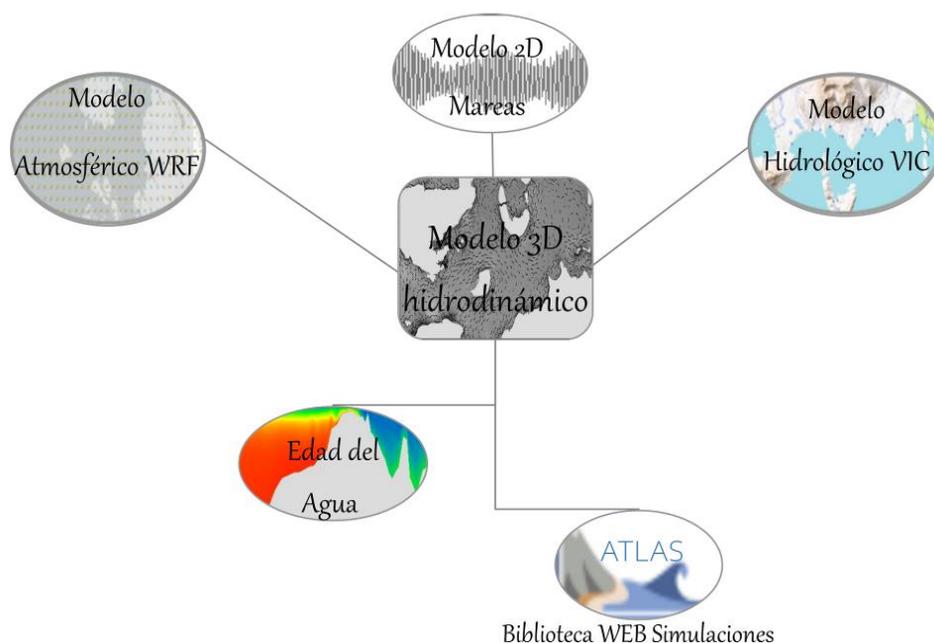


Figura 1: Esquema del sistema de modelación y distribución de información del estudio.

3.1.1 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 $\sim 52.3 - 53^{\circ}\text{S}$ y $\sim 71 - 73^{\circ}\text{W}$.

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). 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 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 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 Y corresponde a la base de datos modelada y X 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 Y y X 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.

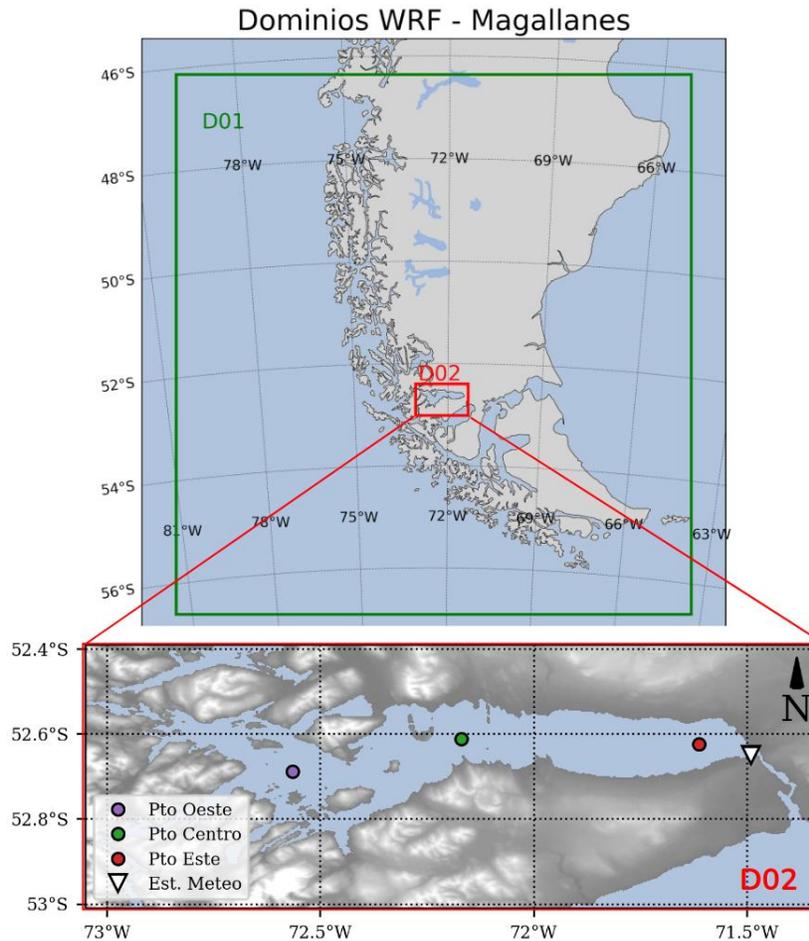


Figura 2: Dominios establecidos para la simulación atmosférica (WRF), con resolución espacial de 9km (D01) y 3km (D02). Se muestran 3 posiciones (Pto. este, centro y oeste) para la descripción de los vientos a lo largo del seno Skyring. El triángulo blanco indica la posición de la estación meteorológica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

3.1.2 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 1.

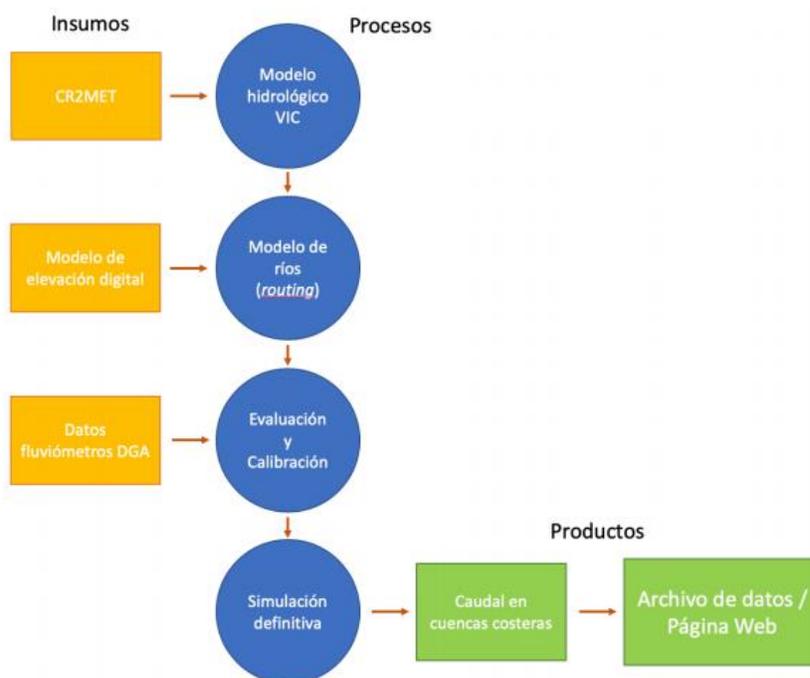


Figura 3: Esquema general del proceso de modelación y construcción de los productos del modelo hidrológico.

Tabla 1: 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 aplique el método son Pellicciotti, F. et al. (2007), Aguayo, R. et al. (2019), Medina & 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.

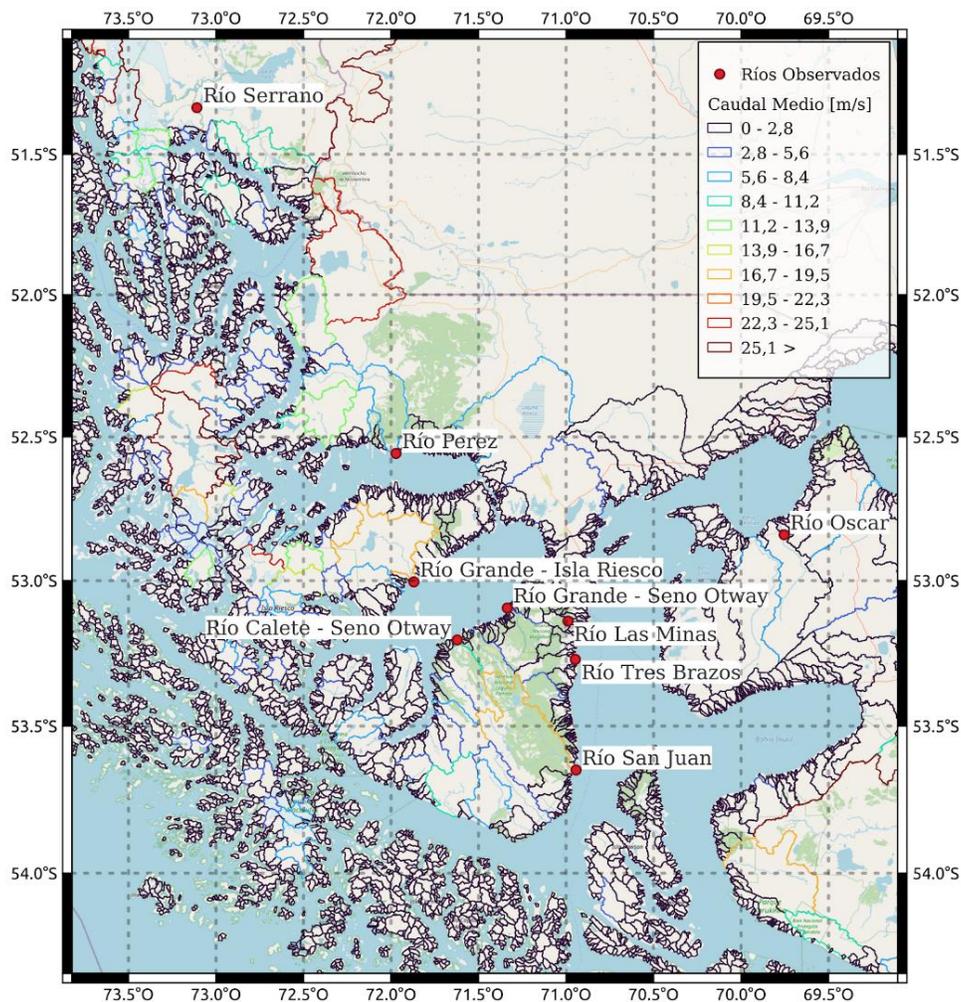


Figura 4. Estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) y cuencas hidrográficas sintéticas estimadas para la región de Magallanes.

3.1.3 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).

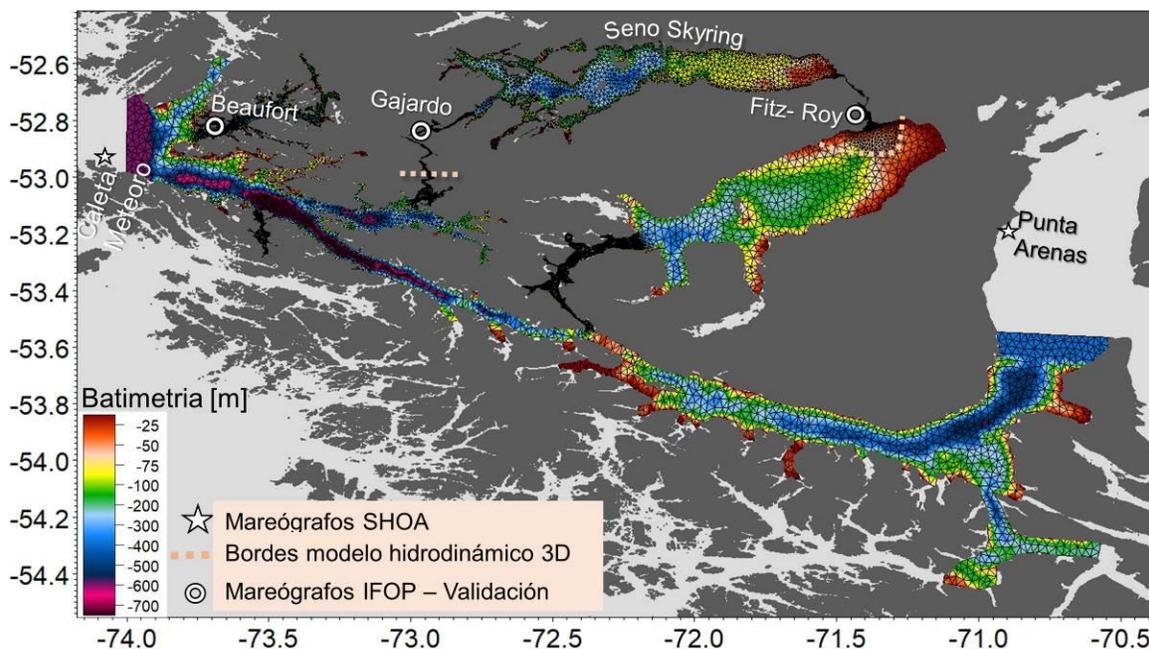


Figura 5: Dominio y batimetría del modelo barotrópico, junto a puntos de observación del nivel del mar.

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 2). Se realizó un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar en base a datos de estos mareógrafos (Tabla 2) 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” (Boon, 2004), el cual se obtiene por la suma de las principales amplitudes diurnas dividido la suma de las principales amplitudes semidiurna.

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

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.

Tabla 2. Información de Mareógrafos instalados en la región

Mareógrafo	Latitud	Longitud	Intervalo de medición	Fecha (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

3.1.4 Modelo hidrodinámico 3D (MIKE 3)

Se utilizó el modelo hidrodinámico 3D MIKE 3 FM (DHI, 2017) 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 considerando un esquema turbulento de cierre. Como algoritmo de solución discreta de las ecuaciones indicadas, el modelo utiliza el método de volúmenes finitos centrados en cada celda. La estructura de discretización en una malla irregular permite un buen ajuste al borde costero, por lo que se considera que este tipo de solución es la adecuada para zonas de topografía compleja. En la vertical utiliza coordenadas sigma combinadas con rectangulares (denominadas Z), que permiten una mejor solución de la estratificación en las zonas con gradientes verticales de densidad. Para la integración temporal, se utiliza un enfoque semi-implícito donde los términos horizontales son tratados explícitamente y los verticales de manera implícita (DHI, 2017).

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 a 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 3.

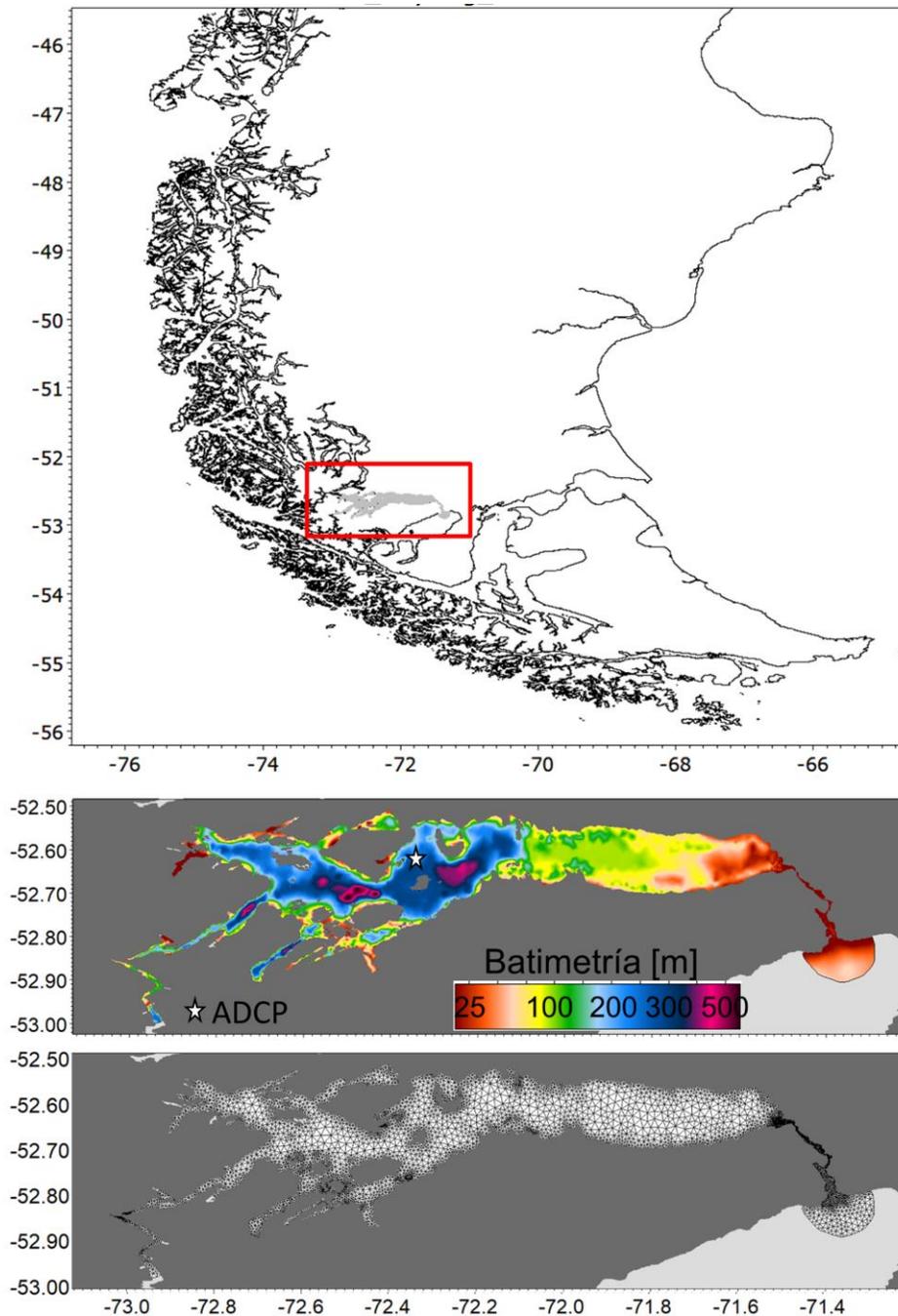


Figura 6: Ubicación del seno Skyring en la región de Magallanes, modelo digital de elevación basado en cartas náuticas SHOA y malla triangular con resolución variable. ☆ADCP en isla Escarpada.

Tabla 3: Características de implementación del modelo hidrodinámico en seno Skyring

<i>Parámetros MIKE 3 FM</i>	<i>Seno Skyring</i>
<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 3.1.3. 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, este periodo de estabilización tomo un tiempo de 8 años, para el periodo 2016-2017 se realizó una simulación en bucle hasta alcanzar el periodo de equilibrio.

3.1.4 Hidrografía:

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, 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).

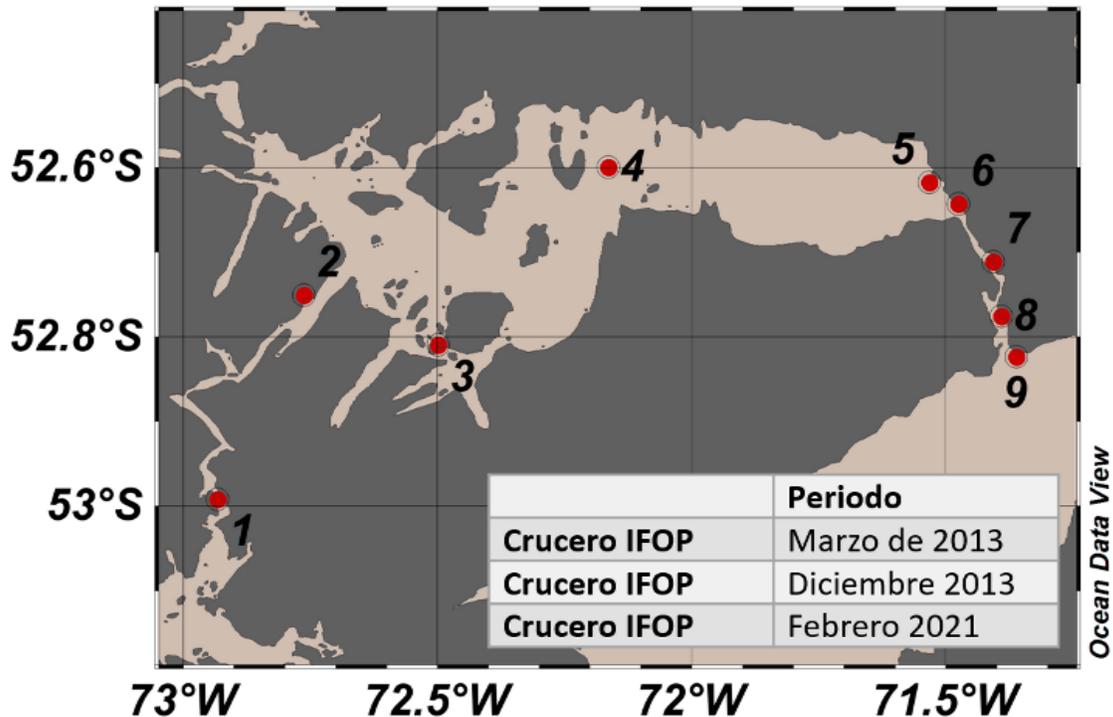


Figura 7: Puntos de estaciones oceanográficas realizadas en los años 2013 y 2021.

Para cuantificar los grados de mezcla o estratificación vertical, basados en la salinidad, se utilizó el parámetro de estratificación η_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 a la siguiente fórmula:

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

Donde Sf: salinidad de fondo, Ss: 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.

3.1.6 Corrientes en seno Skyring

Para conocer la estructura de las corrientes al interior del seno Skyring se comparó la información de un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante el otoño del año 2013, por un periodo ~30 días, ubicado en el sector de isla Escarpada (-Lat. $-52,60^\circ$, Long. $-72,35^\circ$) (Fig. 6), lamentablemente el periodo de medición no coincide con el de modelación, sin embargo, se realizará un análisis que permita 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. Además, se realizó un análisis de Función Ortogonal Empírica (EOF) (Thomson y Emery, 2014) sobre las corrientes submareales (observadas y modeladas) para determinar la capacidad del modelo en replicar los principales modos de variabilidad.

Cabe señalar que este proyecto contemplaba obtener una mayor cantidad de información de corrientes mediante campañas oceanográficas realizadas entre 2020 y 2021, mediante la colaboración con otros proyectos que IFOP lleva a cabo en el seno Skyring, sin embargo, estos han tenido constante retrasos en su obtención por problemáticas asociadas al COVID-19, sin embargo, todos estos datos están disponibles para la segunda parte de este proyecto en seno Skyring, cuyo informe final debiese elaborarse para el segundo semestre de 2022.

3.2 Objetivo específico 2.2.2 Calcular el intercambio de agua mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico.

3.2.1 Edad del agua

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). Entonces, para calcular la distribución de la edad del agua, se utilizó un trazador pasivo, así las ecuaciones de transporte para calcular el trazador y la concentración de la edad se escriben de acuerdo a la ecuación 1 y 2 (Delhez et al., 1999). Aquí 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, 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. Esta metodología ya ha sido utilizada en otros fiordos de la Patagonia (Pinilla et al 2020)

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

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

Donde, c es la concentración del trazador, α 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:

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

3.3 Objetivo específico 2.2.3 Generar mapas de tiempos de intercambio de agua montados en una plataforma de información geográfica.

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), 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.

4. RESULTADOS

4.1 Objetivo 2.2.1 Modelar hidrodinámicamente la variabilidad anual del sistema de fiordos y canales de la Patagonia norte.

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.

4.1.1 Caracterización atmosférica: 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. 8). 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 9 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 ms^{-1} al este y por debajo de 9 ms^{-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 ms^{-1} .

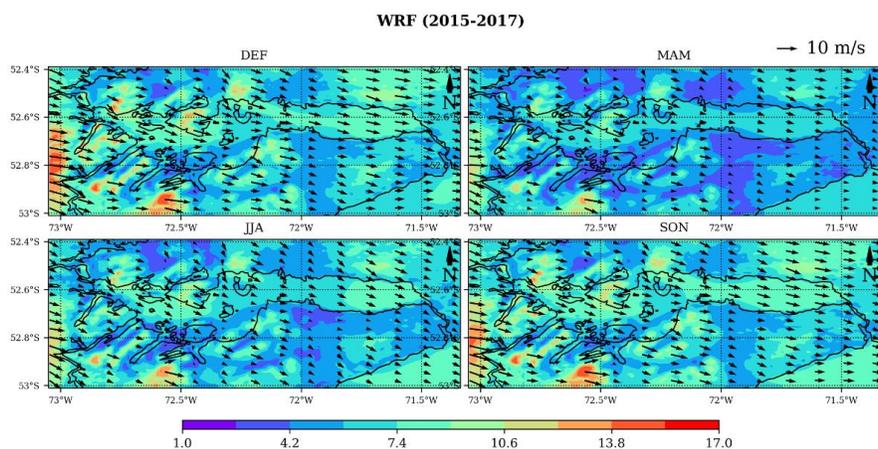


Figura 8. Campos de magnitud (colores) y dirección (flechas) del viento estacional en seno Skyring modelados por WRF entre 2015-2017.

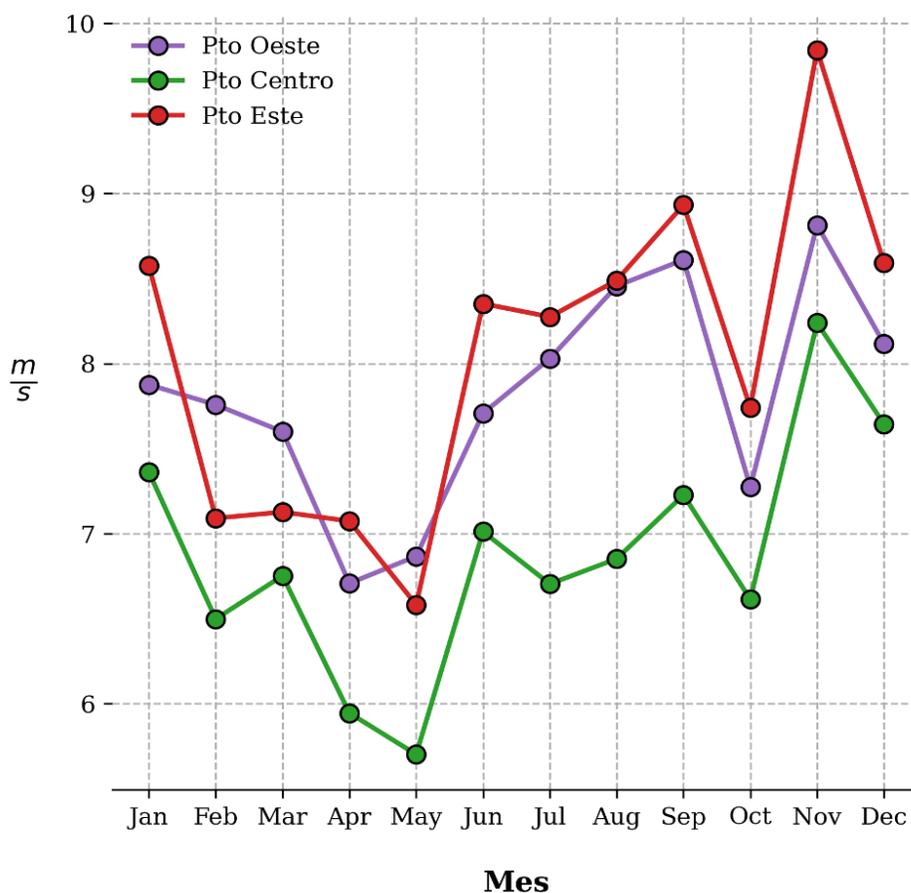


Figura 9. Ciclo anual de la magnitud del viento en tres posiciones (ver Fig. 7) a lo largo del seno Skyring. Data modelada por WRF entre 2015-2017.

Este patrón de viento también se evidencia en las observaciones registradas durante el 2021 (Fig. 10). La estación meteorológica revela el patrón estacional con una componente que sopla principalmente desde el oeste, acompañado de una señal de viento 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. 10b). 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. 10c).

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. 11a). 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. 11b). 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.

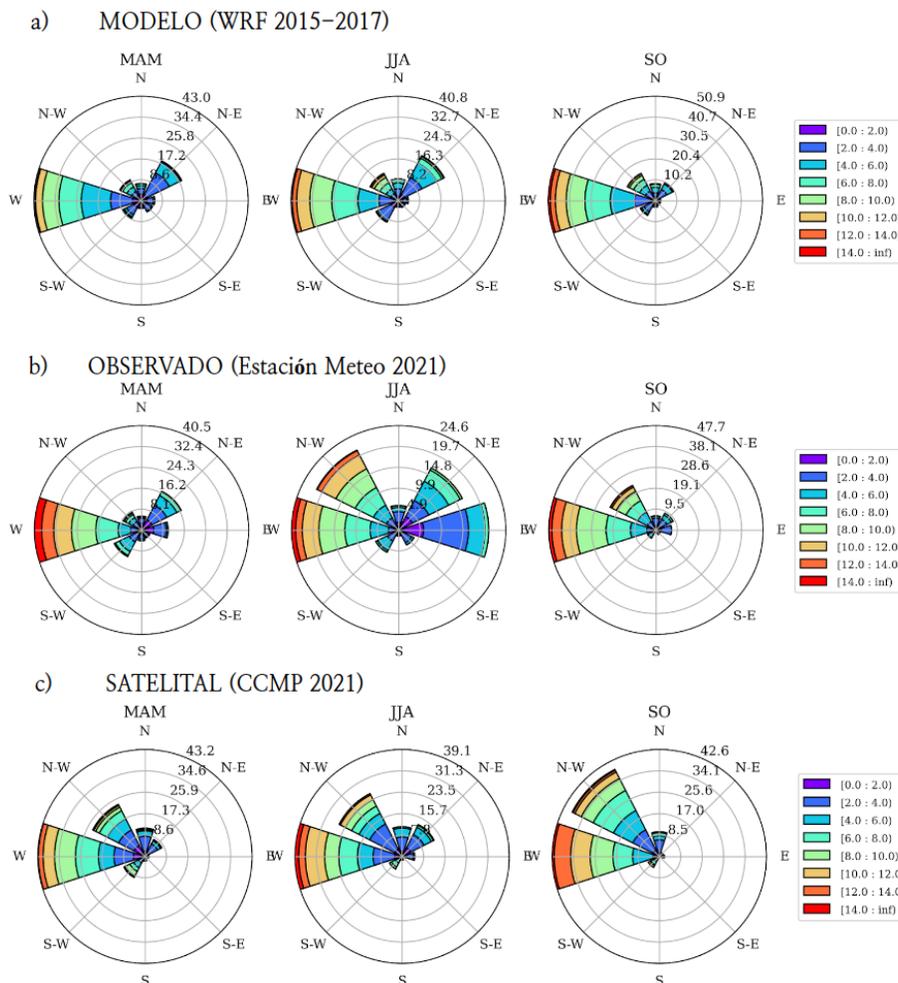


Figura 10. Rosas de viento para los periodos de otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SO). **a)** Modelo WRF entre 2015-2017, **b)** estación meteorológica y **c)** producto CCMP para 2021.

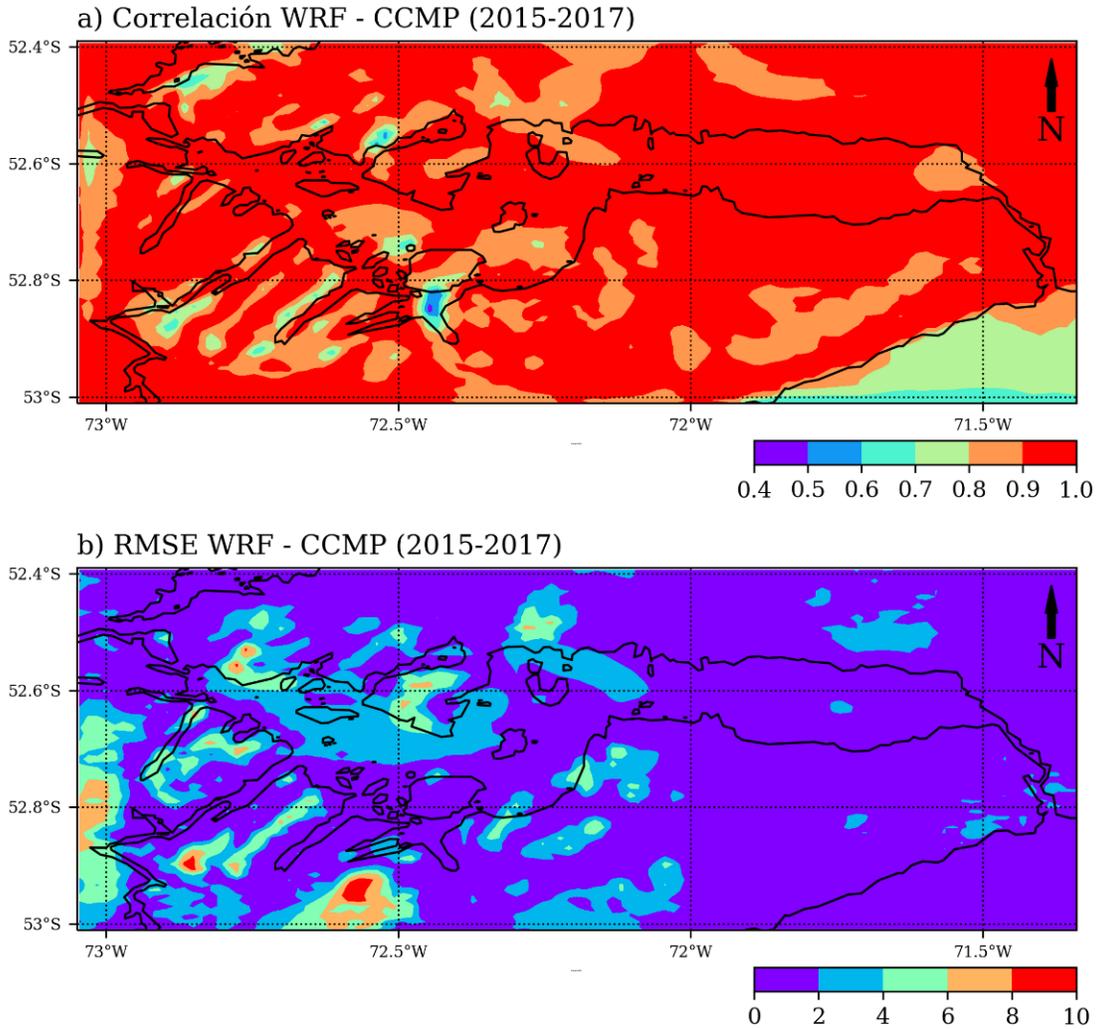


Figura 11. a) Mapas de correlación y **b)** raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los campos de magnitud de viento mensual WRF y CCMP para el periodo 2015-2017.

4.1.2 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. 12a). 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. 12b). Lo que demuestra la habilidad del modelo hidrológico de reproducir de manera adecuada la variabilidad de los caudales en la región.

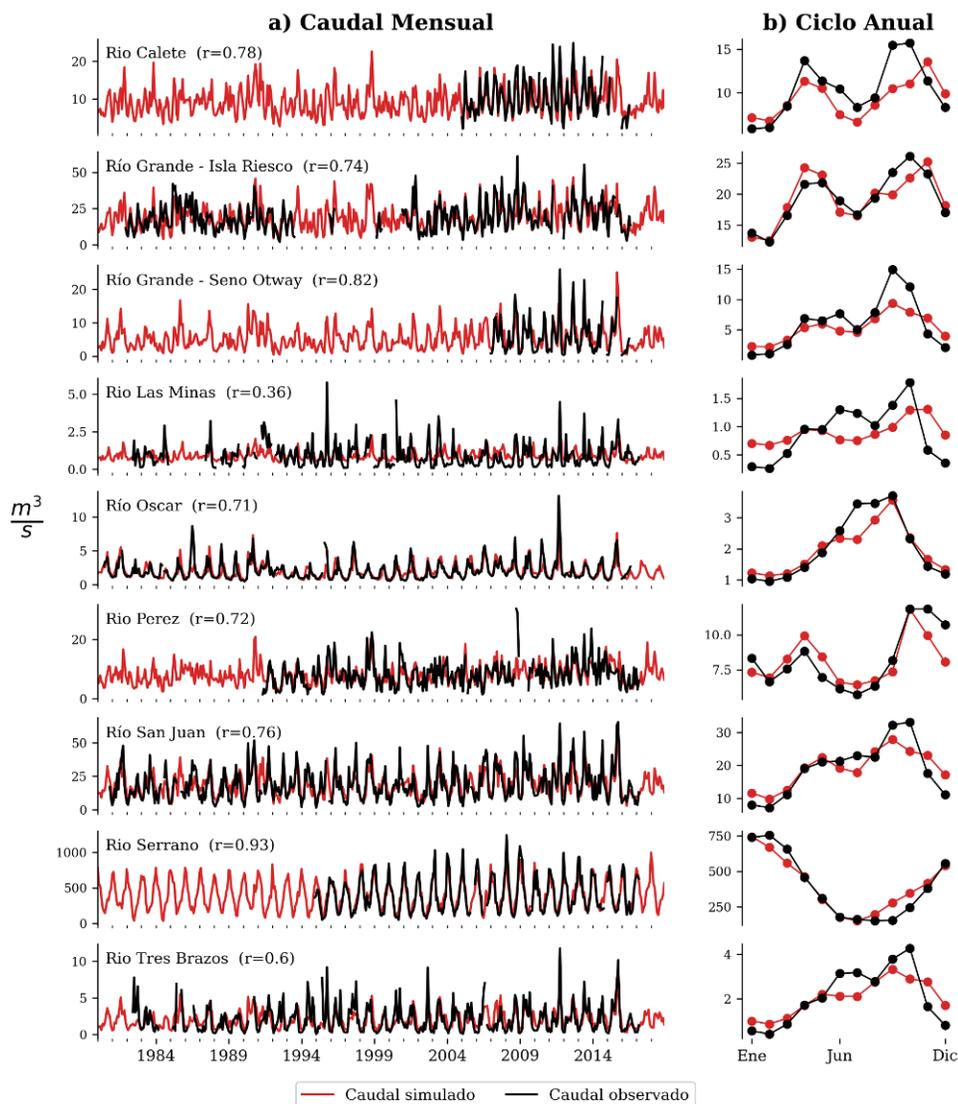


Figura 12. a) Caudal mensual y b) ciclo anual entre los ríos con observaciones de la DGA y los estimados por la herramienta FLOW-CHONOS, en la región de Magallanes.

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. 13a). Las principales descargas de agua dulce en el sistema se evidencian mayoritariamente hacia el sector occidental del seno Skyring (Fig. 13c), 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. 13c).

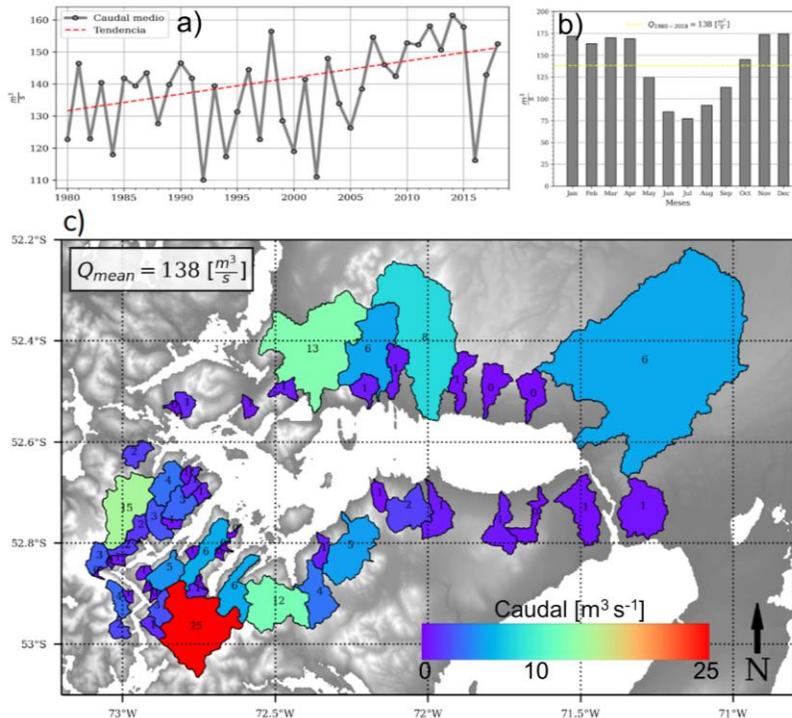


Figura 13. a) Variabilidad interanual de la suma de aportes de agua dulce sobre el seno Skyring. b) Ciclo anual del caudal acumulado. c) Caudal promedio de las principales cuencas de seno Skyring, caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

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. 13b). 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) 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°O , la estacionalidad se vuelve más importante durante primavera, lo cual sugiere un mayor dominio de la precipitación sobre la descarga en esta zona.

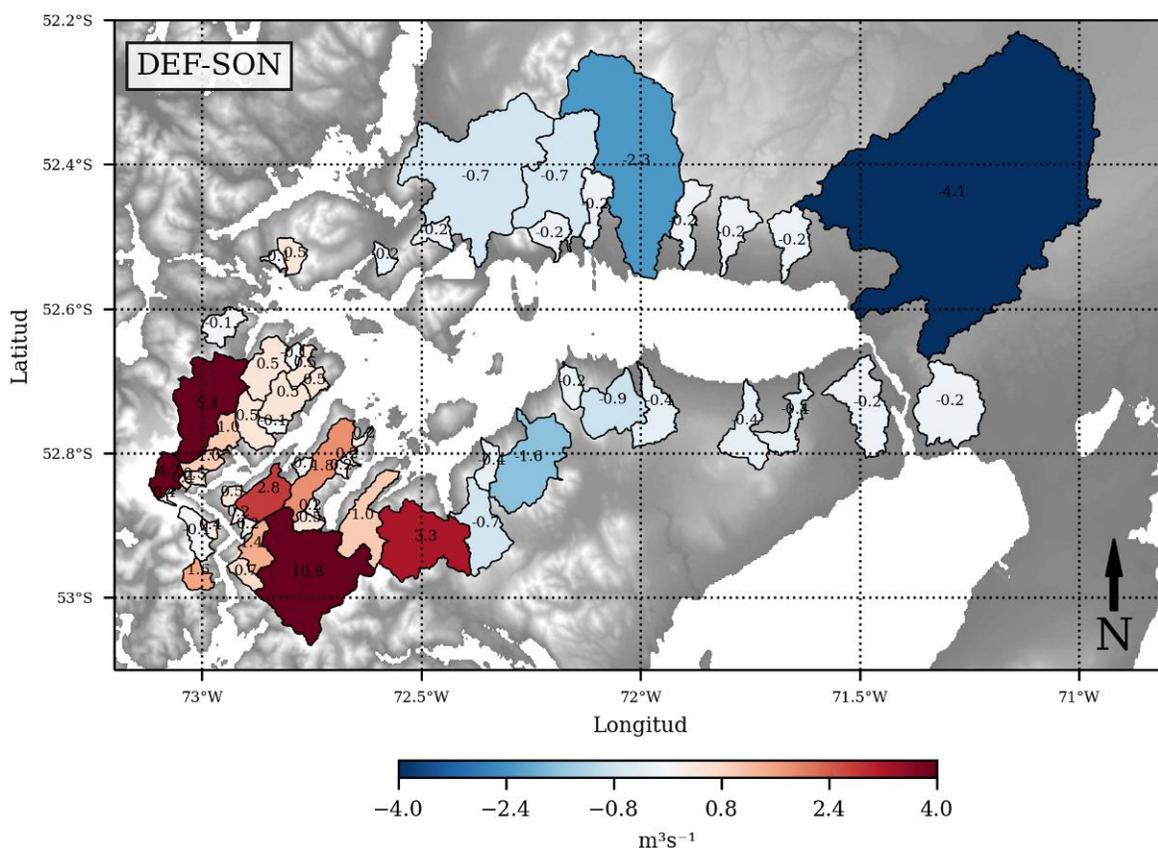


Figura 14. Diferencia entre el caudal medio de verano (DEF) y primavera (SON) para las principales cuencas que aportan agua dulce sobre el sistema de seno Skyring. Caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

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. 15).

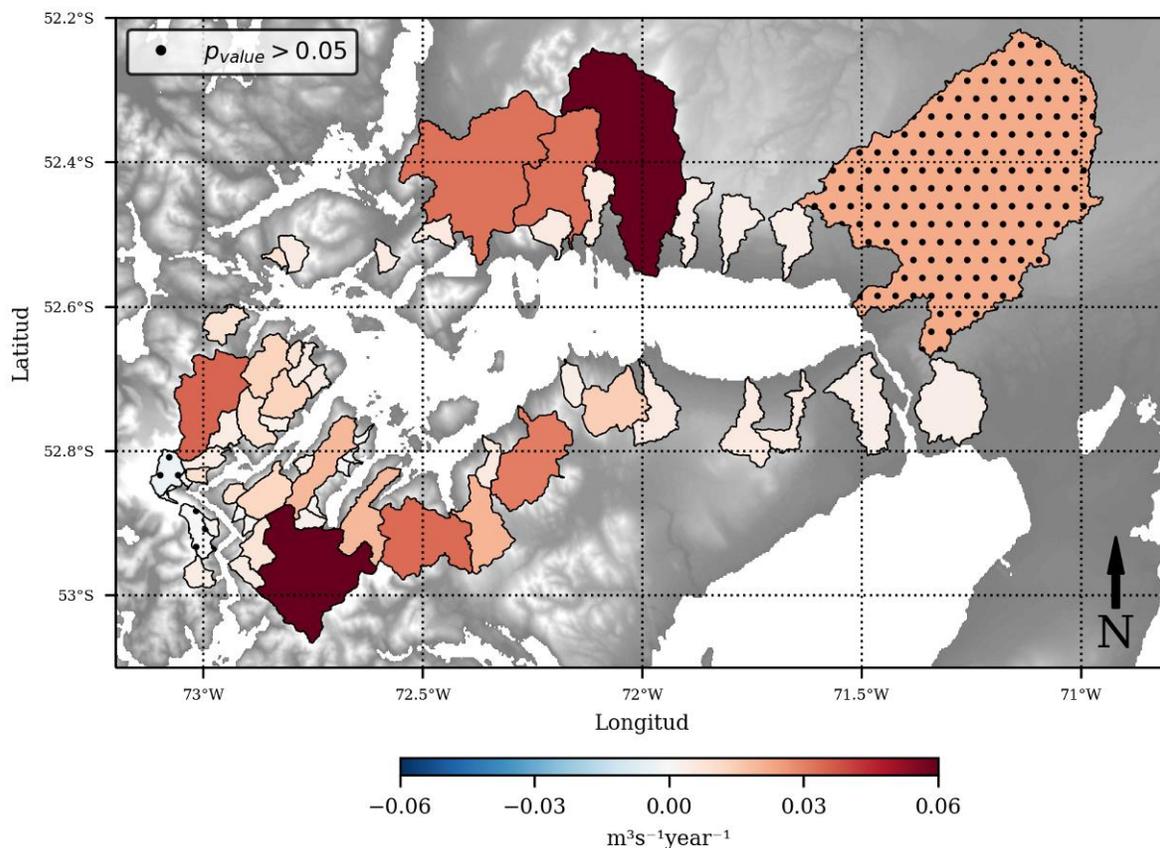


Figura 15. Magnitud de la tendencia en las principales cuencas que aportan agua dulce sobre el sistema de seno Skyring. Los puntos señalan las cuencas que no son estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

4.1.3 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 es entre 0,60 y 1,50 (Fig. 16), indicando que el régimen de marea que presenta sistema Skyring es semi-diurno 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. 17), muestra una disminución de la amplitud 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.

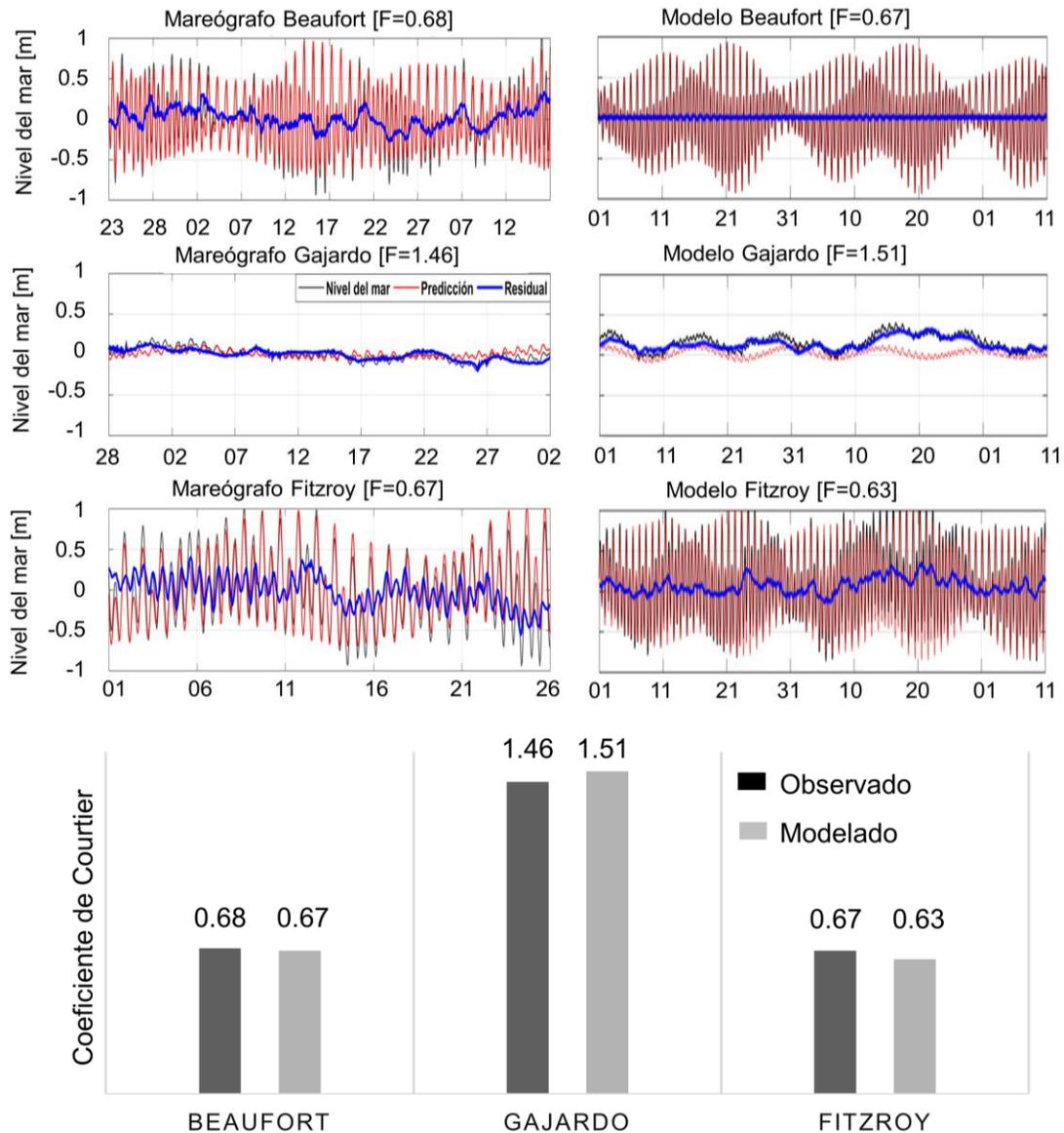


Figura 16. Nivel del mar observado (izquierda) y modelado (derecha), junto al coeficiente de Courtier (F) para cada sector.

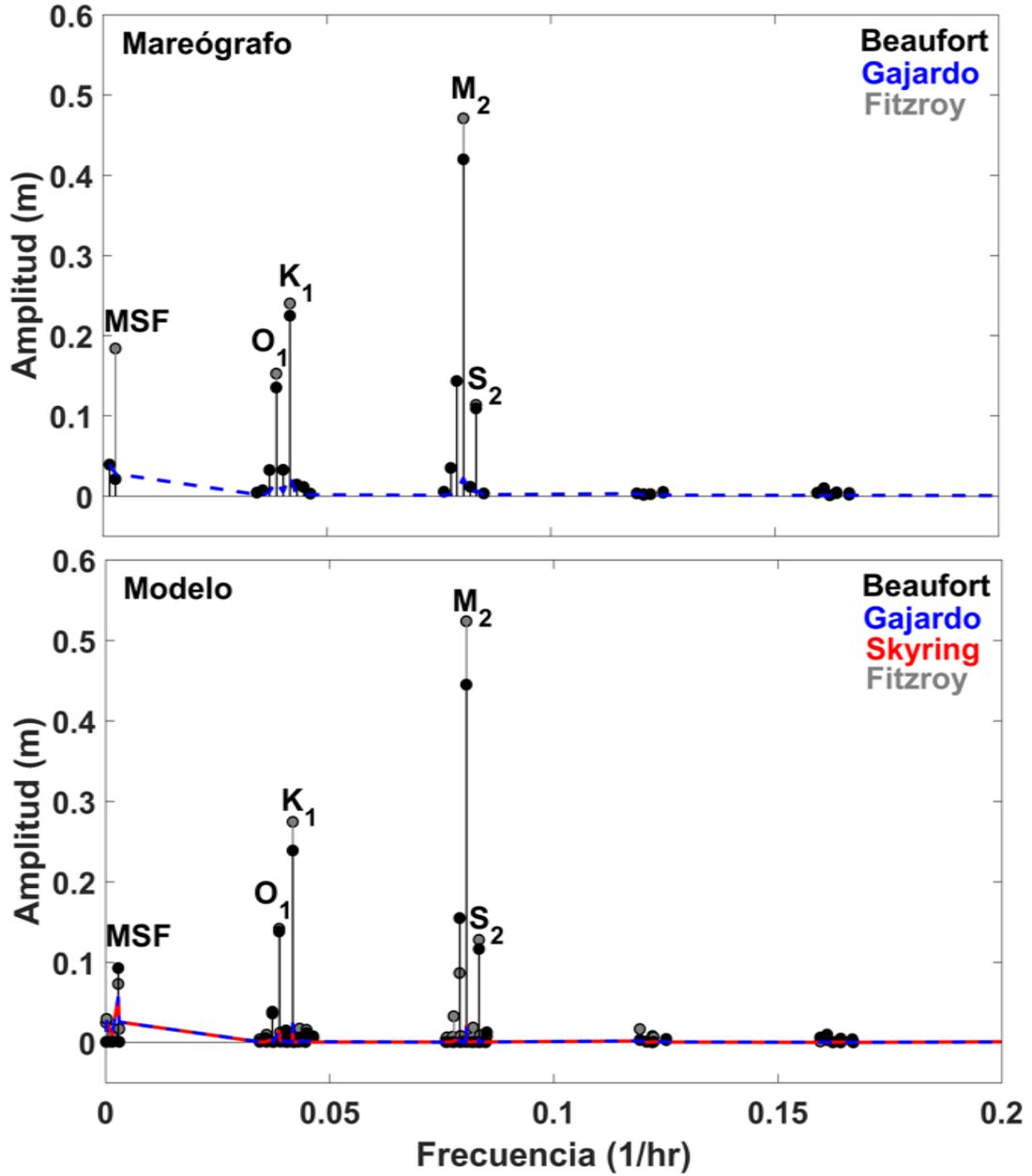


Figura 17. Espectro de Amplitud de marea observada (arriba) del modelada (abajo) de Beaufort, canal Gajardo y canal Fitzroy.

4.1.4 Caracterización hidrográfica.

El seno Skyring es una cuenca semicerrada en la región de Magallanes (Fig. 18) exhibió la formación de 2 micro-cuencas, separadas por los umbrales batimétricos dentro del canal Gajardo (~5 m) y canal Fitz-Roy (~10 m). La zona Este (MCE) exhibió una batimetría irregular y variada, con profundidades de 100 m en la proximidad del canal Fitz-Roy y máximos de 600 m hacia el canal Gajardo, antes de la constricción umbral. La zona oeste (MCO) se caracterizó por exhibir una profundidad entre 150-250 m dentro del canal Gajardo, mientras que golfo Xaultegua reveló profundidades entre 450-650 m. Finalmente, en Paso del Mar se registraron las mayores profundidades entre 600-800m. La conformación batimétrica tiende a exhibir una disminución en sentido oeste-este.

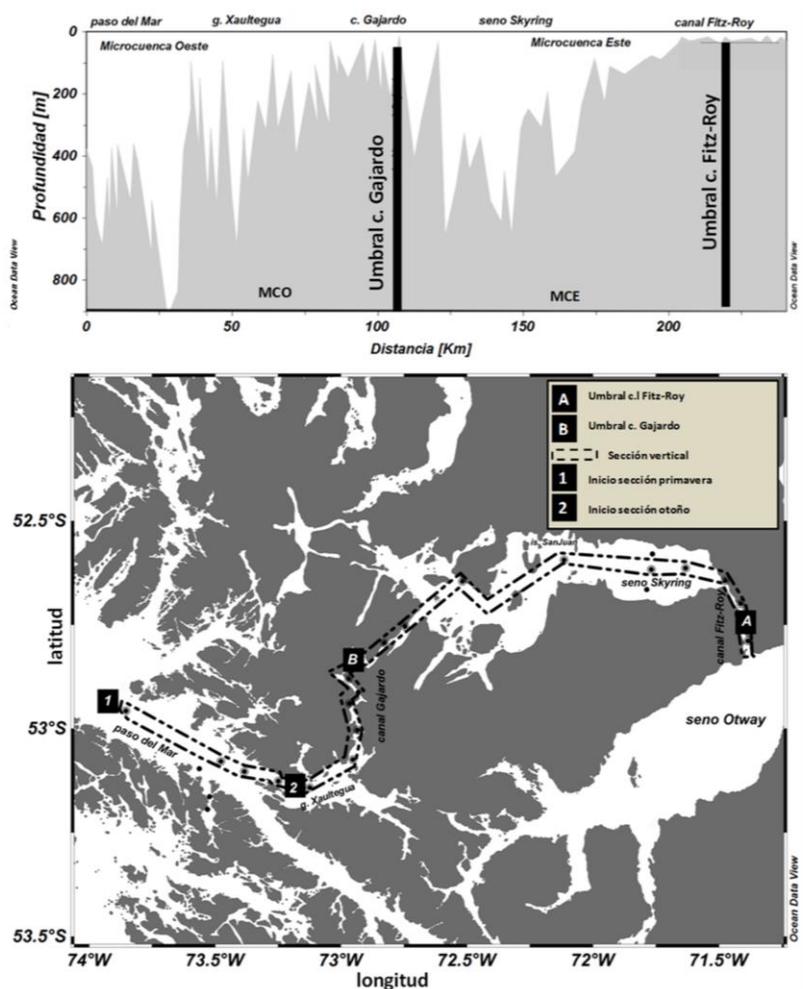


Figura 18: Perfil batimétrico de seno Skyring y zonas aledañas.

Los límites topográficos que separan a seno Skyring de los canales aledaños, se reflejan en las características hidrográficas. La sección vertical salinidad muestra 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 psu, mientras que, a su exterior, estas presentan una salinidad sobre 30 psu, tanto en primavera como en otoño (Fig. 19). 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⁻¹ 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. 20) conformada en una gran proporción por el agua dulce proveniente de glaciares y lluvia, y por aguas mezcladas con remanentes de Agua Subantártica Modificada.

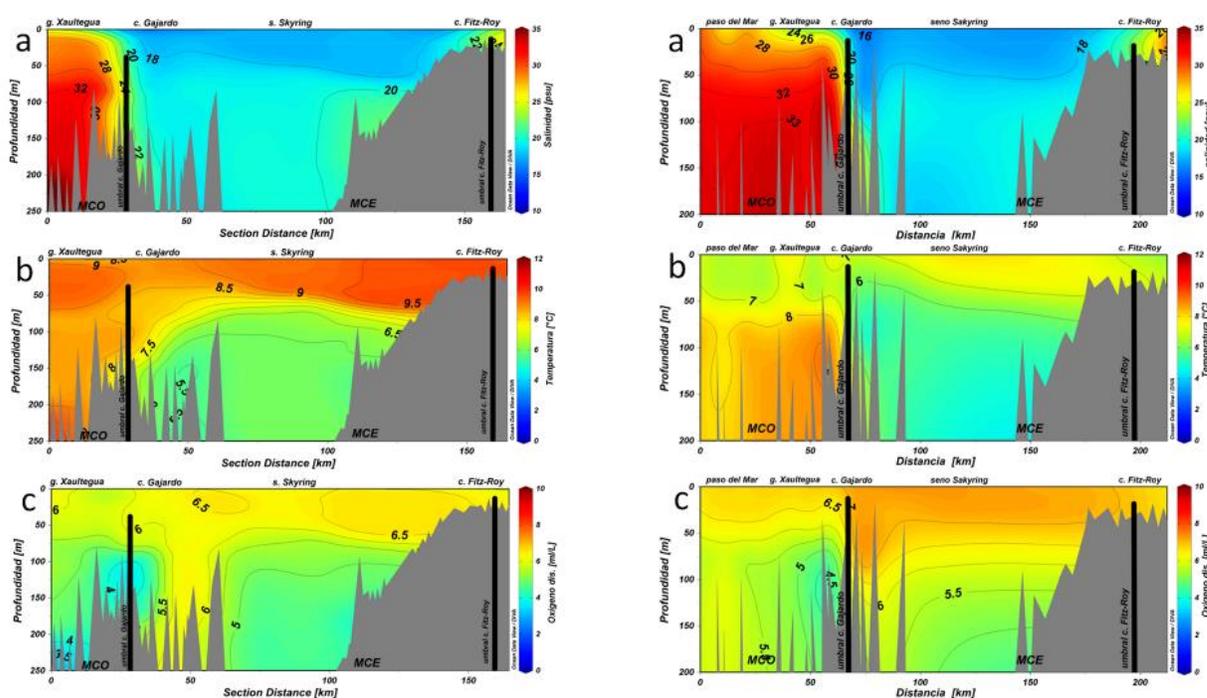


Figura 19: Condiciones hidrográficas en seno Skyring en otoño de 2012 (panel izquierdo) y primavera de 2013 (panel derecho).

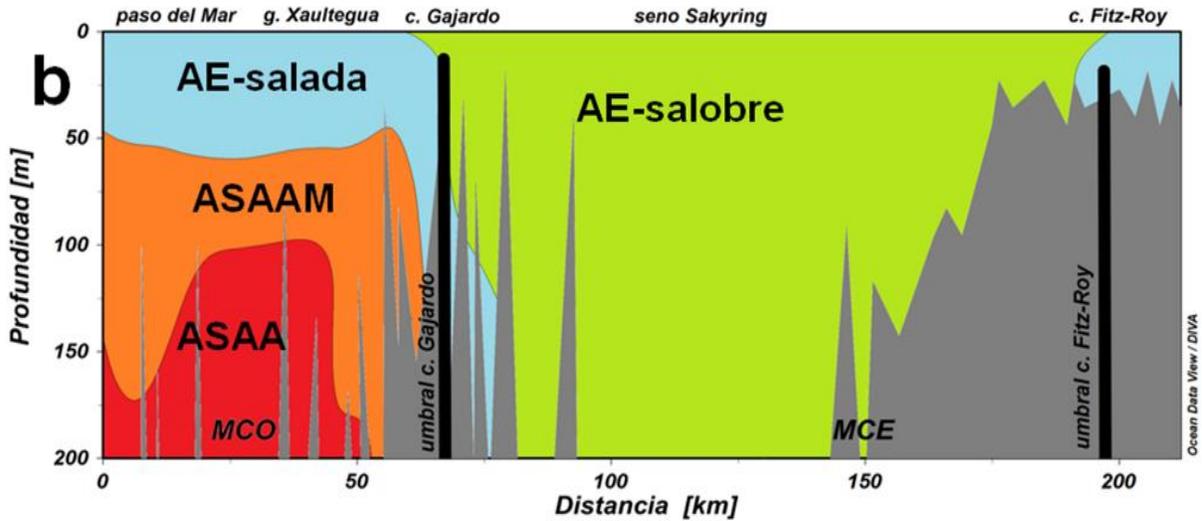


Figura 20: Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

4.1.5 Evaluación de características hidrográficas en modelo hidrodinámico

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 temporal propia de este sistema.

La Fig. 21 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 psu. 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, sobrestimando los valores de temperatura, especialmente en diciembre.

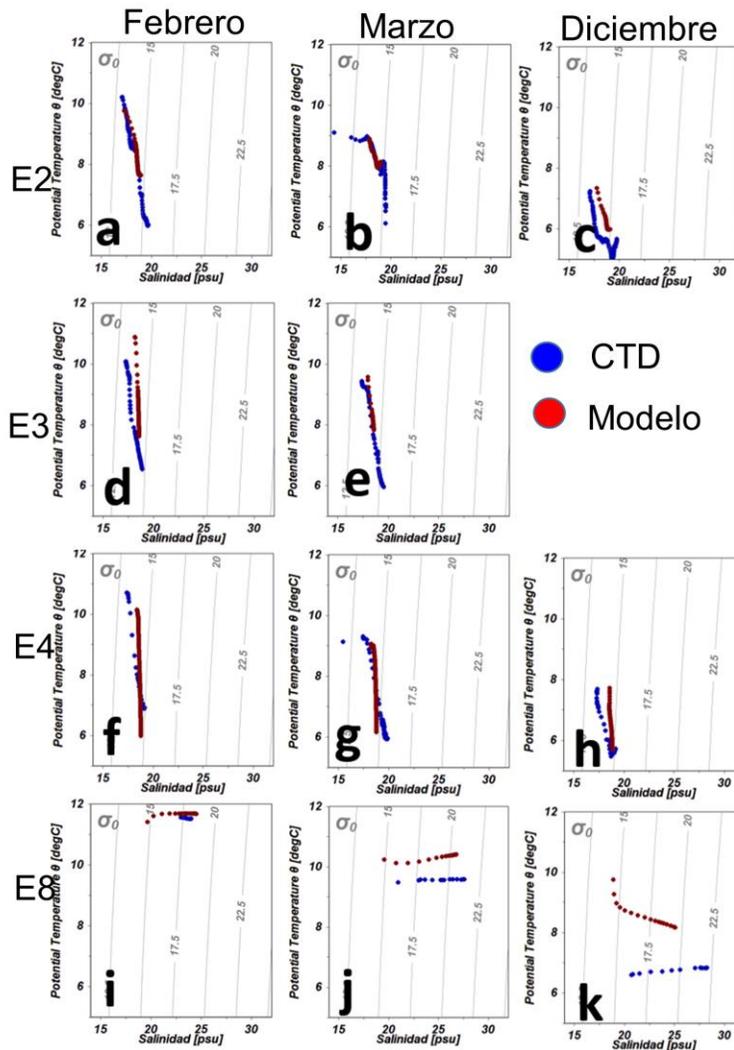
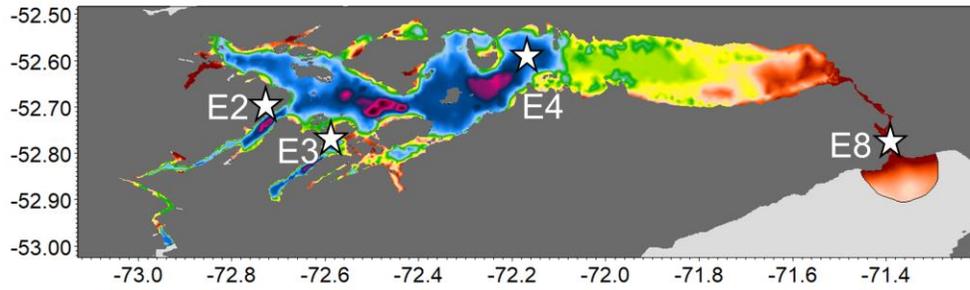


Figura 21: Diagramas TS en distintos sitios en seno Skyring entre estaciones de CTD (azul) y el modelo (rojo)

Uno de los aspectos fundamentales en los cuerpos estuarinos, corresponde a la estratificación, una forma de sencilla de medir el grado de estratificación dentro de un sistema corresponde al parámetro de estratificación (η_S) y que la estima a partir de diferencias entre la salinidad superficial y de aguas más profundas. Una mirada general del comportamiento espacial de la estratificación indica que existe una disposición mayor a estratificación en los canales de conexión y, por el contrario, al interior del seno, esta tiende a disminuir, sin embargo, este comportamiento general tiene matices (Fig. 22). 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 sobrestimando 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. 22). Se insiste en que las mediciones fueron realizadas en un periodo distinto a la modelación, por lo cual, las divergencias podrían no ser necesariamente atribuibles al desempeño del modelo.

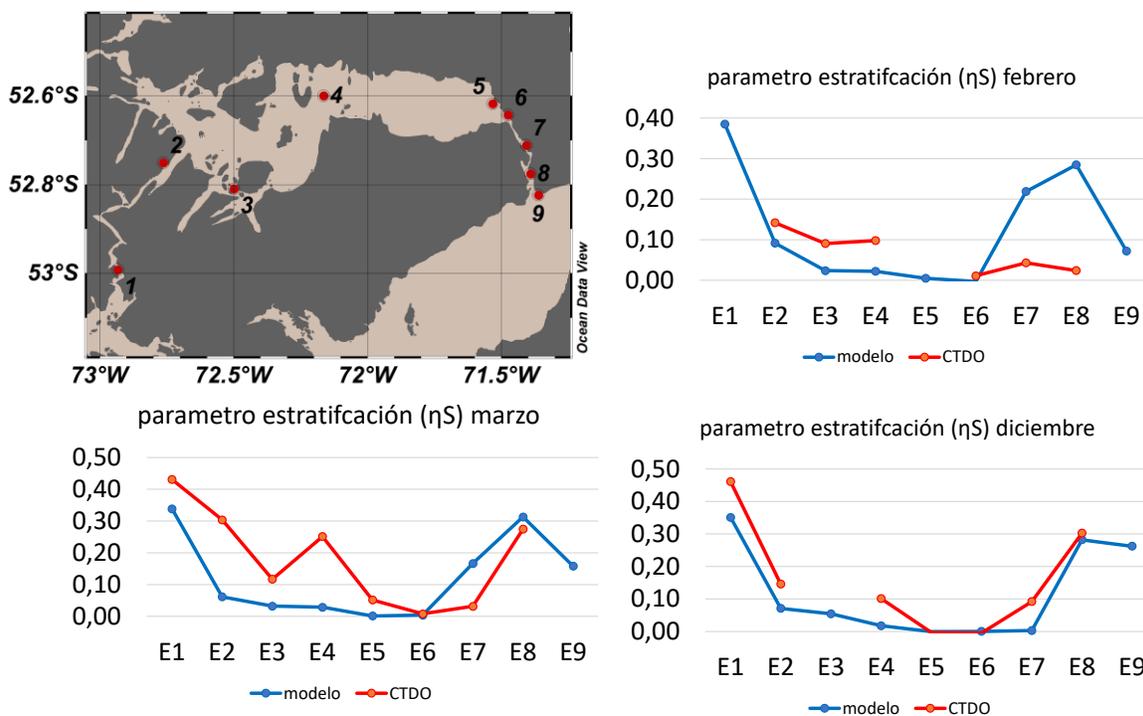


Figura 22: Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

Los valores medios estacionales de la temperatura superficial (0-20m) en seno Skyring (Fig. 23) muestran, 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 psu) esto contrasta con los canales de conexión al seno que alcanzan valores entre 25 a 30 psu (Fig. 24). 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.

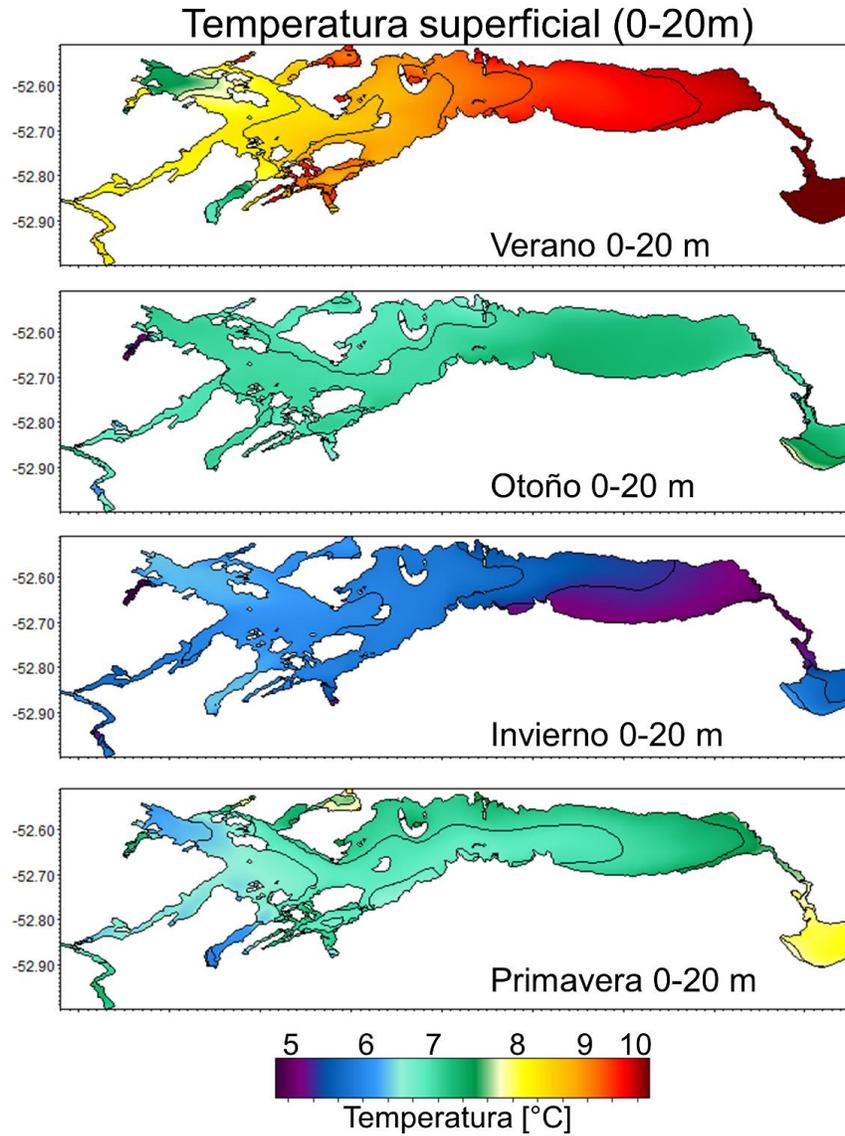


Figura 23: Temperatura superficial (0-20m) para cada estación del año 2017

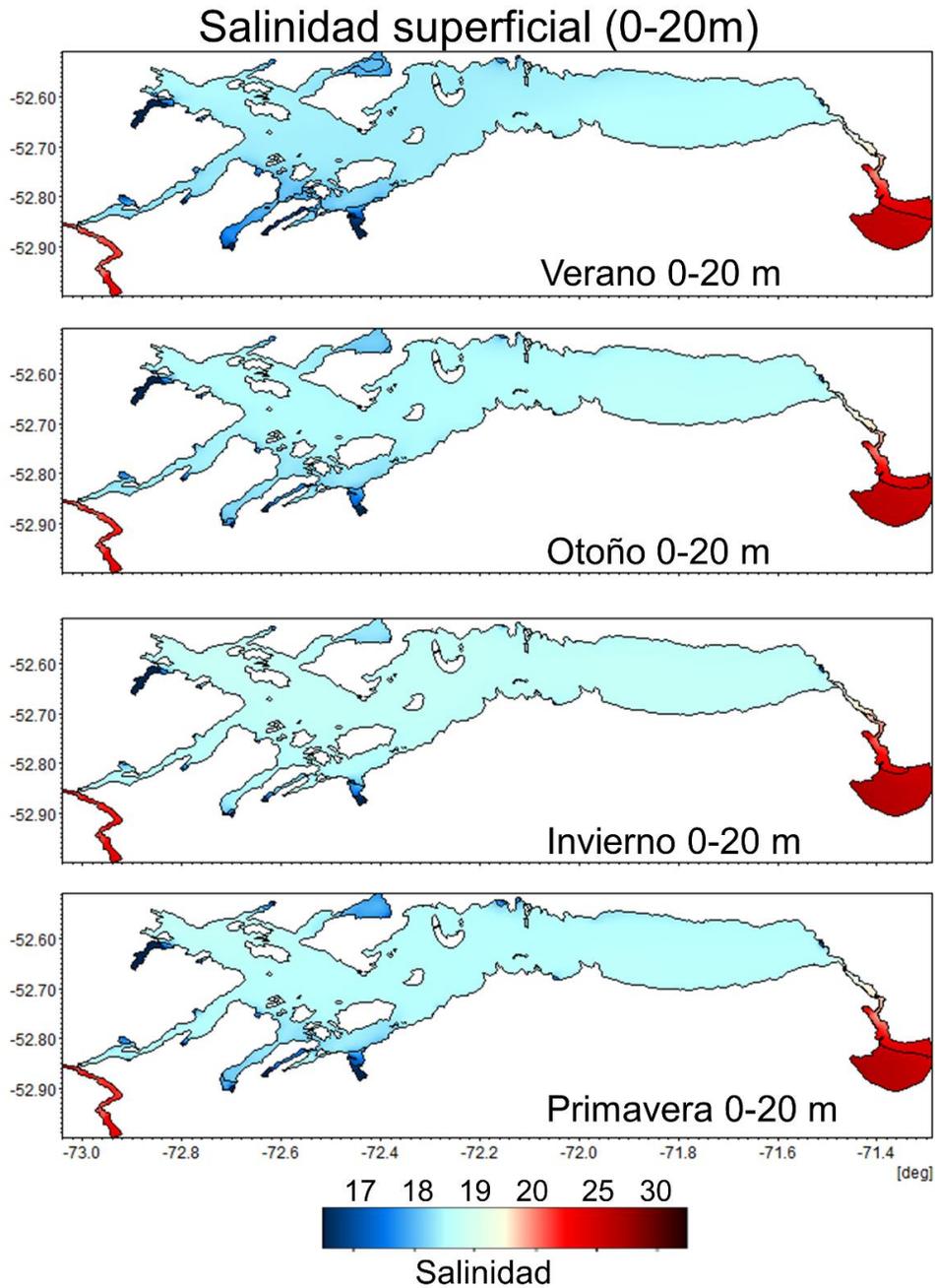


Figura 24: Salinidad superficial (0-20m) para cada estación del año 2017.

4.1.2 Corrientes

Se comparó la salida del modelo (abril - mayo del 2017) con los datos de ADCP (abril – mayo 2013) en base a un análisis de EOF de la corriente submareal a lo largo de seno Skyring. En general, los 3 modos principales de la estructura vertical de la corriente son coincidentes entre el ADCP y el modelo (Fig. 25). El modo 1 muestra una estructura barotrópica hacia el norte que disminuye su amplitud con la profundidad. El modo 1 del modelo explica el 89 % de la variabilidad total, mientras que el modo 1 del ADCP alcanza un 75%. El modo 2 del modelo presenta una estructura baroclínica con una capa sobre los 20m hacia el sur y una capa bajo los 20m hacia el norte, esta estructura se observó en el ADCP explicando un 15% de la variabilidad, el modelo lo hizo en un 8%. El modo 3 presento una estructura de 3 capas; sobre los 10m a 15m la corriente presenta dirección hacia el norte y entre los 10m y 35m la corriente tiene dirección hacia el sur, bajo los 35m la corriente tiene dirección al norte, este modo explica el 1% en el caso del modelo y 4% en el caso del ADCP. El modo 1 explica la mayor parte de la variabilidad tanto en el ADCP como en el modelo, al comparar el modo 1 del modelo con la componente zonal del viento 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. 26).

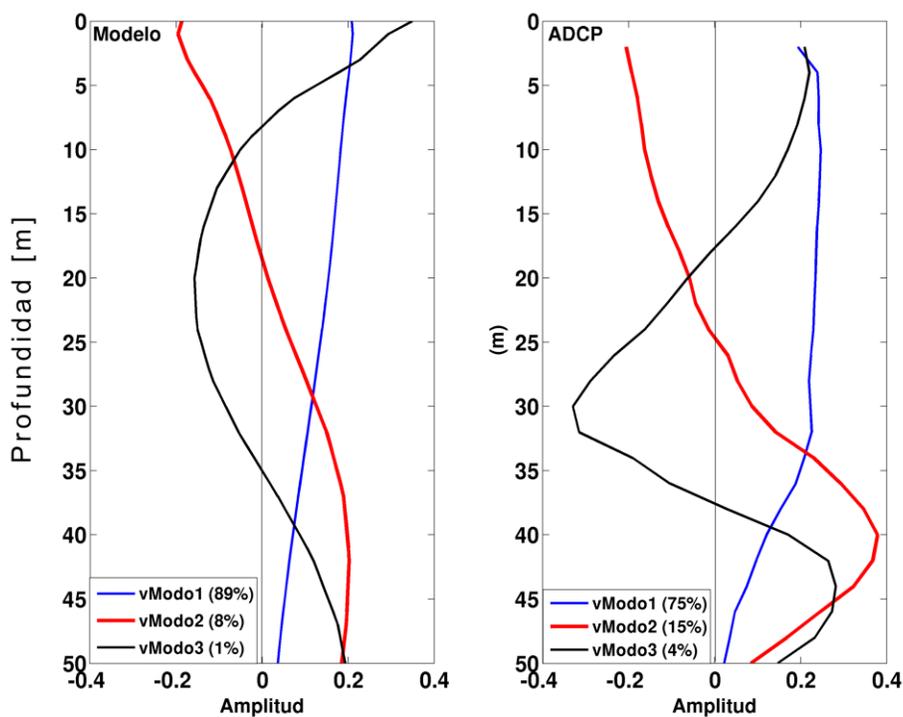


Figura 25: EOF de la componente v del modelo y de ADCP.

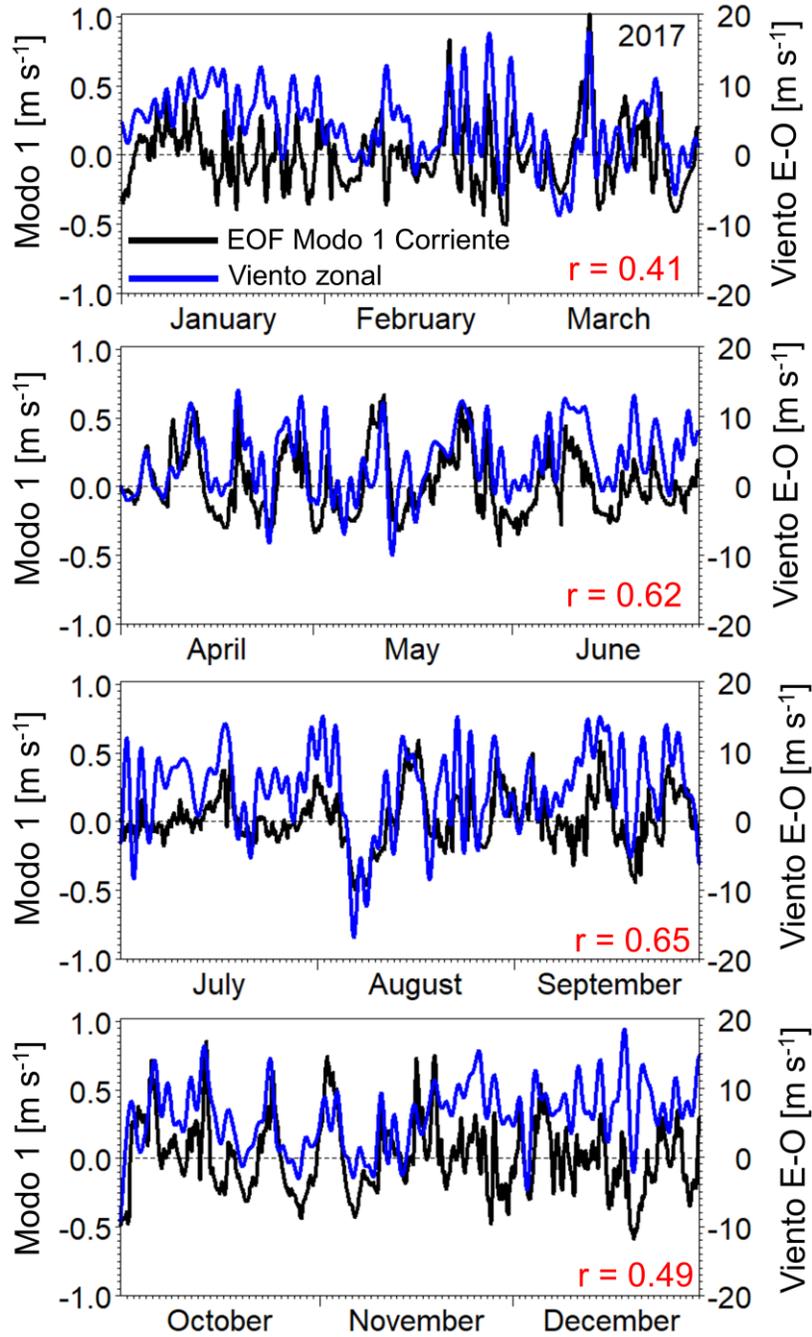


Figura 26: Serie temporal del modo 1 de EOF (negro) y el viento zonal (azul), para cada estación del año 2017 con su respectivo valor de r.

El patrón de circulación superficial de las corrientes (Fig. 27), 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 de las corrientes en seno Skyring.

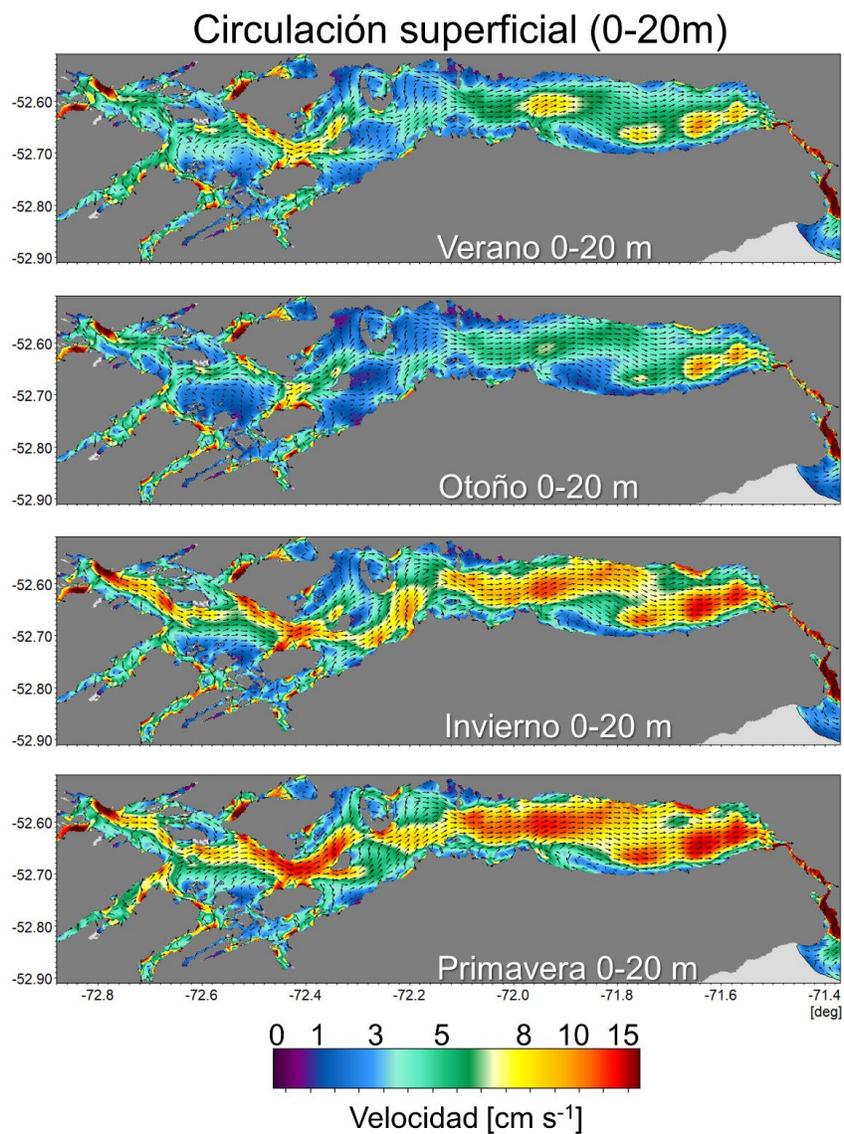


Figura 27: Patrón estacional de corriente superficiales promedio (0-20m) proveniente del modelo hidrodinámico para el año 2017.

4.2 Objetivo 2.2.2. Calcular el intercambio de agua mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico.

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 de seno Skyring (Fig. 28), 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. 28). En tanto la variabilidad temporal para distintas profundidades muestra distintas estructuras (Fig. 29), así los canales de conexión (puntos 1 y 4 Fig. 29), 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. 29), 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 10m 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.

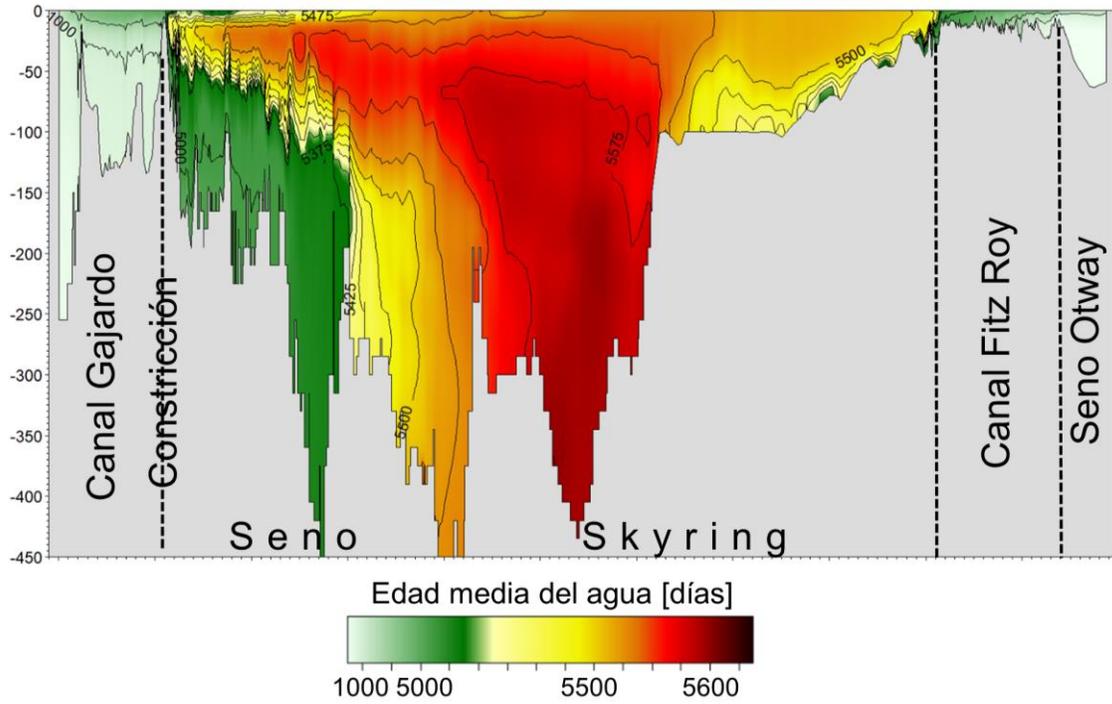
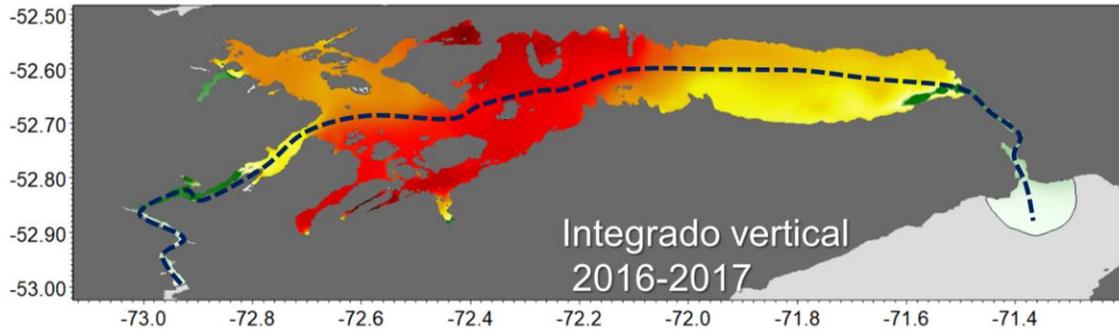


Figura 28: Mapa integrado verticalmente (arriba) y sección vertical de la edad del agua promedio 2016-2017 en seno Skyring.

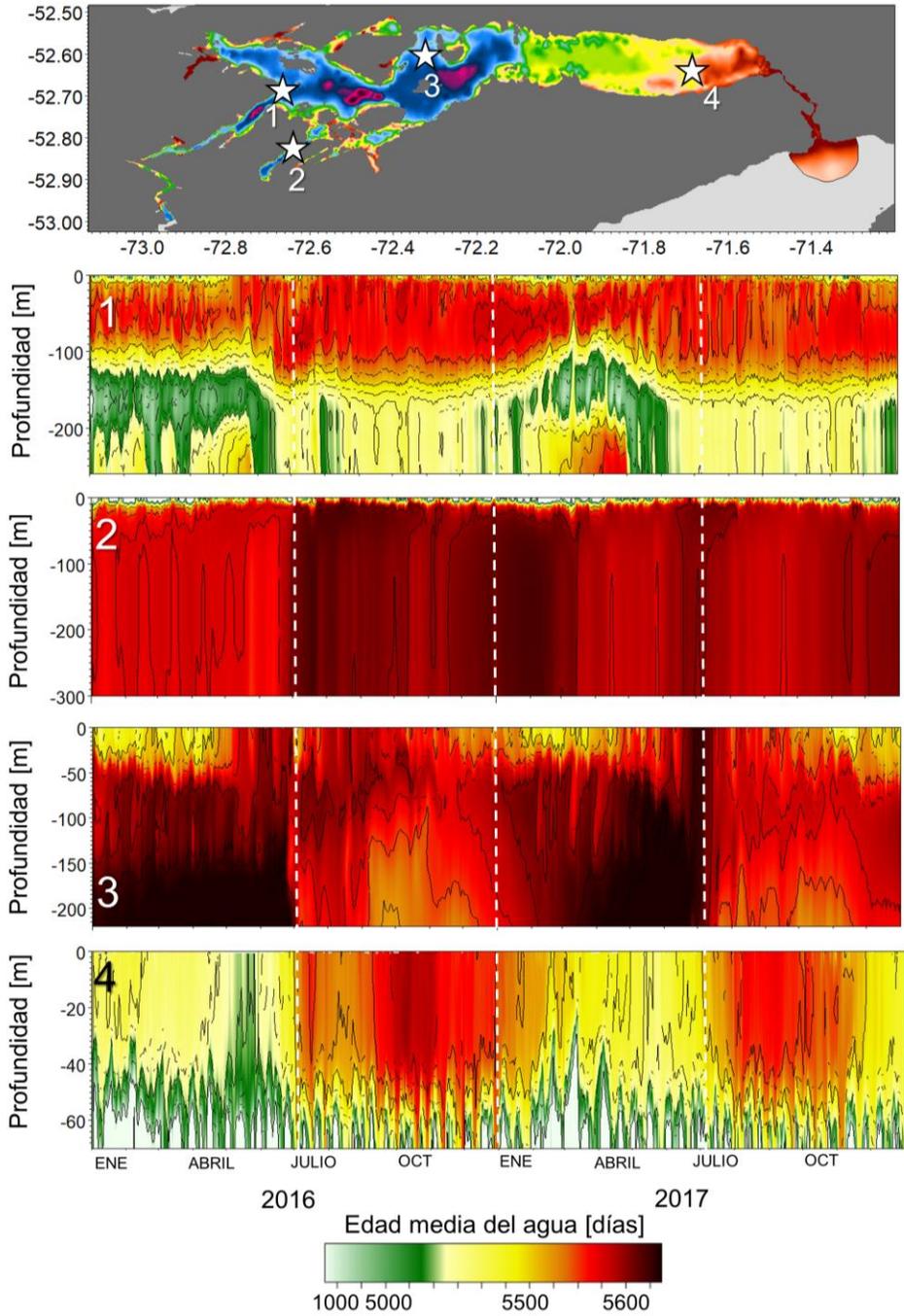


Figura 29: Secciones temporales de la edad del agua para distintos sitios en seno Skyring.

4.3 Objetivo específico 2.2.3 Generar mapas de tiempos de intercambio de agua montados en una plataforma de información geográfica.

Se montó una plataforma en donde es posible 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 30: 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, se 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.

5. DISCUSIÓN

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 distintivas. En este sentido, destaca el canal Fitz-Roy, que presenta bajas profundidades (<10 m) y actúa de conexión limitada con el Seno Otway, donde algunas condiciones observadas en Otway no se registran dentro del seno Skyring, e.g salinidad (Valdenegro & 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 a resolver, ya que puede influenciar de forma dramática los resultados del intercambio de agua entre la cuencas internas y externas.

El seno Skyring, cuenta con una menor cantidad de información oceanográfica respecto de otras zonas dentro de la región y aún más, si se considera a la X y XI región. Por ejemplo, el programa Cimar Fiordos, organizado por Comité Oceanográfico Nacional (CONA) y que ha nutrido e impulsado las investigaciones en ciencias marinas en las aguas interiores del sur de Chile, no ha incluido al seno Skyring como sitio de estudio, esto a pesar de ser una zona con actividad acuícola importante dentro de la región de Magallanes. Por otra parte, el estudio realizado por IFOP durante el año 2012 y 2013 (Pinilla et al. 2013) y financiado por Subsecretaría de Pesca y Acuicultura permitieron mejorar la información hidrográfica para caracterizar este sistema marino, esto sumado a información que está siendo recopilada durante el año 2021 y continuará durante el año 2022, permitirá generar mejor información oceanográfica para la toma de decisiones.

La información hidrográfica recopilada en 2012 y 2013 (Pinilla et al. 2013) mostraba que las aguas oceánicas ingresan de forma muy acotada al seno Skyring, generando cuencas de características oceanográficas distintas, por ejemplo, en términos de salinidad el seno Skyring presentó una relativa baja variabilidad (rango de 15 a 20 psu) en toda la columna de agua, mientras que la zona externa presenta valores superficiales bajos (~15 psu), pero también valores mayores a 30 psu en capas más profundas, dando cuenta de una mayor influencia oceánica. Por otra parte, también era conocida la 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 detalladas, así como también la importancia y característica general de los vientos, y la descarga de agua dulce provenientes principalmente del deshielo de glaciares.

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 grilla 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°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.

Otro aspecto importante de dilucidar es si la propagación de la onda de marea es importante al interior del seno Skyring y si el modelo barotrópico logra reproducir las principales características de esta. La marea ingresa al sistema Skyring por el norte; a través del canal Gajardo y por el sur, por canal Jerónimo, seno Otway, canal Fitzroy. Dentro de Skyring se evidencio una disipación de la marea, lo cual se observó en la disminución de la amplitud de los constituyentes mareales. Esta disipación de marea puede responder a la alta variabilidad de la batimetría en la zona, la reducción de la longitud transversal del canal Gajardo y Fitzroy y lo más relevante es la presencia de constricciones en ambos canales. La constricción de Gajardo alcanza una profundidad $<5\text{m}$ y Fitzroy $\sim 10\text{m}$, por lo que esta característica batimétrica restringe y disipa el paso de la onda de marea. Comparativamente la amplitud de M_2 en el mareógrafo y modelo en el extremo sur del canal Fitzroy (punto previo a la constricción) registro una amplitud 0.45 m mayor a la amplitud que registro 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 si 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 periodo 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 2013, años distintos, pero expresiones similares en su estructura. El análisis mediante EOF revelo 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.

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 a 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 externa 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 ($\sim 120 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$), entonces parecen plausibles valores altos de edad del agua.

Finalmente, la segunda etapa de este estudio en seno Skyring, finalizará el segundo semestre de 2022, aquí se integrará toda la información recopilada durante 2021-2022 y extenderá la simulación periodos más extensos con el fin de verificar la variabilidad interanual del sistema.

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 micro-cuencas 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 si 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.

La edad del agua en seno Skyring presentó valores de ~ 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 (~ 500 días).

La información proveniente del modelo hidrodinámico, como: corrientes, temperatura, salinidad y edad de agua fueron montadas en la herramienta ATLAS en la plataforma CHONOS.

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.

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

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

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

Boynton, W. R., and W. M. Kemp, 1985. Regeneration and oxygen consumption by sediments along an estuarine salinity gradient, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 23, 45–55

Buschmann AH & R Pizarro. 2001. El costo ambiental de la salmonicultura en Chile. *Análisis de Políticas Públicas*, Fundación Terram (Chile) 5: 1-7.

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

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 & N Silva. 2010. 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.

De Brye B., A. de Brauwere, O. Gourgue, E.J.M. Delhez and E. Deleersnijder, 2012. Water renewal timescales in the Scheldt Estuary, *Journal of Marine Systems*, 94, 74-86.

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.

Delhez, E.J.M., 2006. Transient residence and exposure times. Ocean Sci. 2, 1–9. doi.org/10.5194/os-2-1-2006.

DHI, 2019. Mike 3, User guide and reference manual. Danish Hydraulic Institute, Denmark

England, J. H. (1995), The age of water and ventilation timescales in a global ocean model, J. Phys. Oceanogr., 25, 2756–2777

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

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.

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., and J. Shen (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

Kärnä, T., & Baptista, A. M, 2016. Water age in the Columbia River estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 183, 249-259. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.09.001

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. & B. Bang. 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.

Koutitonsky, V. G., T. Guyondet, A. St-Hilaire, S. C. Courtenay, and A. Bohgen (2004), Water renewal estimates for aquaculture developments in the Richibucto Estuary, Canada, *Estuaries*, 27(5), 839–850.

León-Muñoz, J., Urbina, M.A., Garreaud, R. et al. Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Sci Rep* 8, 1330 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>

Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges (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.

Liu, Z., H. Wang, X. Guo, Q. Wang, H. Gao, 2012. The age of Yellow River water in the Bohai Sea. *J. Geophys. Res.-Oceans*, 117 (C11), C11006, doi:10.1029/2012JC008263

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

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.

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>.

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., 2017. Deep ventilation event during fall and winter 2015 in the Puyuhuapi Fjord (44.6°S). *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 45(1): 223-227. DOI: 10.3856/vol45-issue1-fulltext-25.

Pinilla, E., M. Arriagada, G. Soto, C. Ruiz, P. Reche. 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

Pinilla E, Soto G, Soto C, Venegas O, Salas P, Reche P, et al. 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

Pinilla, Elías, Manuel I. Castillo, Iván Pérez-Santos, Oliver Venegas, and Arnoldo Valle-Levinson. 2020. "Water Age Variability in a Patagonian Fjord." *Journal of Marine Systems*, Volume 210 103376. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103376>

Salinas, S., J. Fierro, M. Castillo y J. Letelier. 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.

Salinas, S. y M. Castillo. 2012. Corrientes mareales y submareales en el Canal Desertores (42°42'S, 72°50'W). *Ciencia y Tecnología de Mar*, 35 (1): 5-18.2

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.

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

Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379–1389. doi:10.1080/01621459.1968.10480934

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.

Shen, J., B. Hong, and A. Y. Kuo (2013), Using timescales to interpret dissolved oxygen distributions in the bottom waters of Chesapeake Bay, *Limnol. Oceanogr.*, 58(6), doi:10.4319/lo.2013.58-06.0000.

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

Sievers, H. A., C. Calvete y N. Silva. 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, H. & N. Silva. 2008. Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. En: N. Silva & S. Palma (eds.). *Avances en el conocimiento océano-gráfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos*. Comité Oceanográfico Nacional, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 53 – 58.

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

Silva N., C. Calvete M. & H. A. Sievers 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y laguna San Rafael, Chile (Crucero CIMAR Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21: 17-48.

Silva, N., S. Palma. 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. & A. Valdenegro. 2008. Caracterización oceanográfica de canales australes chilenos entre la boca del Guafo y los canales Pulluche – Chacabuco (CIMAR 8 fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 31 (1): 05 – 44.

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.

Valdenegro A & N Silva. 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., R. L. Swanson, and H. A. Crowley (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.M.E., 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.* 10 (2), 149–191.