



Informe Final
Convenio de Desempeño 2022
Sistema de pronósticos oceanográficos y
atmosféricos, 2022-2023.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Octubre 2023



Informe Final

Convenio de Desempeño 2022.
Sistema de pronósticos oceanográficos y
atmosféricos, 2022-2023.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Octubre 2023

REQUIRENTE SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

Subsecretaria de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Javiera Petersen Muga

EJECUTOR INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Jefe División Investigación en Acuicultura
Gastón Vidal Santana

Director Ejecutivo
Gonzalo Pereira Puchy

JEFE PROYECTO
Osvaldo Artal Arrieta

AUTORES
Osvaldo Artal Arrieta
Valentina Besoain Meneses
Cristian Ruiz Soto
Milton Salas Salas
Pedro Valdebenito Muñoz
Jurleys Vellojin Furnieles
Oliver Venegas Mella

ÍNDICE GENERAL

Resumen ejecutivo.....	9
1. Antecedentes.....	12
1.1 Contexto.....	12
1.2 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA.....	13
2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Metodología.....	18
3.1 Metodología objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	20
3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones meteorológicas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	23
3.3 Metodología objetivo específico 3: Implementar un atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén.....	25
3.5 Metodología objetivo específico 5: Diseñar e implementar un modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén.....	38
4. Gestión del proyecto.....	45
4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA.....	45
4.2 Reuniones técnico-académicas.....	46
4.3 Talleres de difusión y/o capacitación.....	51
4.5 Compra y mantenimiento de equipo:.....	53
4.6 Carta Gantt del proyecto.....	54
5. Resultados.....	56
5.1 Resultados objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	56
5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones meteorológicas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	66
5.3 Resultados objetivo específico 3: Implementar un atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén.....	77
5.4 Resultados objetivo específico 4: Evaluar el modelo MOSA-CROCO para la región de Magallanes y Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas en la región.....	83
5.5 Resultados objetivo específico 5: Diseñar e implementar un modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén.....	89
6. Discusión.....	96
6.1 Modelo operacional MOSA-CROCO.....	96
6.2 Modelo operacional MOSA-WRF.....	98
6.3 Modelo biogeoquímico MOSA-PISCES.....	102
6.4 Modelo operacional MOSA-MAG.....	105
6.5 Modelo oleaje MOSA-WW3.....	108
7. Conclusiones.....	110
Anexo A: Ecuaciones modelo hidrodinámico CROCO.....	113
Anexo B: Modelo operacional MOSA-WRF.....	115
Anexo C: Estadísticos principales para validación.....	120
Anexo D: Módulos Biogeoquímicos.....	124

Anexo E: Recursos computacionales.....	130
Anexo F: Glosario de ACRÓNIMOS.....	132
Referencias bibliográficas.....	134

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo del modelo operacional Sur-Austral, MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.....	14
Figura 2: Esquema actual del Modelo Operacional Sur-Austral, MOSA. Se incluyen módulos operacionales y en desarrollo.....	18
Figura 3: Mapa con las estaciones meteorológicas implementas por IFOP-Putemún utilizadas para evaluar el desempeño del viento en MOSA-WRF.....	24
Figura 4: Datos utilizados para crear una condición inicial a partir de cruceros CIMAR....	28
Figura 5: Estaciones y batimetría del modelo utilizada para los diagramas T-S.....	31
Figura 6: (a) Dominio y batimetría utilizada <i>del</i> modelo MOSA-MAG. (b) Batimetría empleada en los Senos Skyring y Ottway (c) Batimetría empleada en el Golfo Almirante Montt.....	32
Figura 7: Ubicación y promedio anual de los caudales de agua dulce utilizados en el modelo MOSA-MAG.....	35
Figura 8: Diagrama conceptual de la operación diaria y los componentes de MOSA-MAG.	37
Figura 9: Mapa con las zonas que agrupan los <i>perfiles</i> de CTD del programa de Marea Roja de IFOP utilizado para evaluar la columna de agua de MOSA-MAG.....	38
Figura 10: Dominio de las regiones de Los Lagos y de Aysén del modelo operacional de oleaje MOSA-WW3. (panel izquierdo) Grilla no-estructurada, (panel derecho) batimetría.	41
Figura 11: Posiciones de la boya IFOP en Caleta El Manzano y de la boya SHOA en las Islas Desertores sobre la batimetría utilizada en el modelo operacional MOSA-WW3.....	43
Figura 12: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA-CROCO y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y <i>junio</i> 2023. Los datos corresponden al promedio diario en la zona oceánica del modelo.....	57
Figura 13: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA-CROCO y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y <i>junio</i> 2023. Los datos corresponden al promedio diario en la zona del mar interior del modelo.....	58
Figura 14: (a) Coeficiente de correlación (r), (b) Raíz del error cuadrático medio (rmse), (c) sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MOSA-CROCO y VIIRS durante enero 2017 y junio 2023.....	59
Figura 15: Diferencias de salinidad superficial absoluta entre MOSA y los productos ORAS5, SSS-CNR, y ARMOR3D-CLS para los meses de Mayo 2022 y Mayo 2023.....	60
Figura 16: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medición del mapa del panel izquierdo durante marzo 2023. (panel superior) Mediciones de CTD (panel inferior) simulaciones de MOSA.....	61
Figura 17: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medición del mapa del panel izquierdo durante Junio 2023. (panel superior) Mediciones de CTD (panel inferior) simulaciones de MOSA.....	62

Figura 18: Diagramas T-S durante Marzo y Junio del 2023. (paneles superiores) Observaciones de CTD. (paneles inferiores) Simulaciones de MOSA.....63

Figura 19: Series de tiempo de elevación del nivel del mar simulados y observados durante Septiembre del 2022 para las estaciones de Puerto Montt, Ancud, Castro, Melinka, Puerto Aguirre y Puerto Chacabuco.....64

Figura 20: (a) Mapa de la ubicación de los ADCP utilizados. Dispersión y ejes de máxima varianza en las componentes ortogonales de corriente en (b) Fiordo Comau, (c) Canal Costa y (d) Boca del Guafo. Espectros rotatorios de energía a través de componentes cartesianas de corrientes horarias modeladas (negro) y observadas (rojo) en (e) Fiordo Comau, (f) Canal Costa, y (g) Boca del Guafo.....66

Figura 21: Rendimiento del sistema operacional MOSA-WRF durante el período comprendido entre el 1 de enero del 2022 y el 19 de Julio del 2023.....67

Figura 22: Descripción del viento en la estación de Apiao. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.....68

Figura 23: Descripción del viento en la estación de Comau. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.....69

Figura 24: Descripción del viento en la estación Faro Corona. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.....70

Figura 25: Descripción del viento en la estación de Cucao. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.....71

Figura 26: Descripción del viento en la estación de Marimeli. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.....72

Figura 27: Descripción del viento en la estación de Melinka. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.....73

Figura 28: Descripción del viento en la estación de Isla Tranqui. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.....74

Figura 29: Estadísticos utilizados para evaluar MOSA-WRF por cada estación meteorológica, tanto para las series de tiempo de promedios horarios como diarios. (a) Sesgo, (b) Amplitud, (c) Correlación, (d) RMSE y (e) RMSE-SS. Línea discontinua roja indica valor ideal para cada métrica.....75

Figura 30: Diagramas T-S con valores de oxígeno disuelto y nitrato para la zona de Chiloé durante primavera-verano.....78

Figura 31: Diagramas T-S con valores de oxígeno disuelto y nitrato para la zona de Aysén durante otoño-invierno.....79

Figura 32: Valores promedios de los primeros 20 m de oxígeno disuelto y nitrato para los (a, d) datos observados, (b, c) modelados, y (c, f) diferencia entre observado y modelado. 81

Figura 33: Clorofila superficial estacional del satélite Sentinel y del modelo MOSA-PISCES.....82

Figura 34: Estabilidad operacional del modelo MOSA-MAG durante enero de 2022 a julio 2023 (período ejecución de este proyecto).....83

Figura 35: Series de tiempo de la temperatura superficial del mar diaria, promediada sobre el dominio completo de MOSA-MAG y contrastada con datos AVHRR para el mismo dominio, entre enero 2022 y julio 2023.....84

Figura 36: Mapas de diferencias de temperatura superficial del mar mensual entre datos VIIRS y MOSA-MAG, año 2022.....85

Figura 37: Mapas de diferencias de temperatura superficial del mar mensual entre datos VIIRS y MOSA-MAG, año 2023.....86

Figura 38: Diferencias de la temperatura superficial del mar mensual promedio entre datos VIIRS y MOSA-MAG entre los años 2022 y 2023.....86

Figura 39: Diagramas T-S estacionales de simulaciones MOSA-MAG y perfiles CTD para la zona norte, correspondiente a Isla Pizzi y Estero Peer.....87

Figura 40: Diagramas T-S estacionales de simulaciones MOSA-MAG y perfiles CTD para la zona centro, correspondiente al Estrecho de Magallanes y Seno Otway.....88

Figura 41: Diagramas T-S estacionales de simulaciones MOSA-MAG y perfiles CTD para la zona sur, correspondiente al *Canal Beagle*.....88

Figura 42: Comparación de series de tiempo para el mes de abril del 2023 de Hs (primera fila), Dm (segunda fila) y Tp (tercera fila) entre el modelo de oleaje (MOSA-WW3), boya SHOA y modelo de oleaje (MFWAM).....90

Figura 43: Comparación de series de tiempo para el mes de abril de Hs (primera fila), Dm (segunda fila), Dp (tercera fila), Tm (cuarta fila) y Tp (quinta fila) entre el modelo de oleaje (MOSA-WW3), boya IFOP y modelo de oleaje (MFWAM).....92

Figura 44: Comparación de Hs para 4 instantes distintos durante el día 10 de junio del 2023 para (panel superior) MOSA-WW3, y (panel inferior) MFWAM.....93

Figura 45: Comparación de gráficos de dispersión de Hs de los meses de abril y mayo. Comparación entre datos satelitales NOAA-CoastWatch y MOSA-WW3. (a) incluye todos los puntos comprendidos en el periodo temporal de análisis, y (b) sólo incluye los puntos que se encuentran dentro del Mar Interior de Chiloé.....94

Figura 46: Principales cambios efectuados en la configuración del modelo operacional MOSA-CROCO a la fecha.....96

Figura 47: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno. Fuente Skamarock et al. (2005).....116

Figura 48: Grilla Arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).....117

Figura 49: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.....118

Figura 50: Esquema del modelo NPZD.....124

Figura 51: Arquitectura del modelo PISCES extraído de Aumont y Bopp (2006). Este esquema muestra el modelo ecosistémico omitiendo el oxígeno y el sistema de carbonato.125

Figura 52: Esquema del modelo biogeoquímico Fennel.....129

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen con las principales características de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo REDMET en Patagonia norte.....	25
Tabla 2: Descripción de las pruebas de sensibilidad realizadas para el modelo biogeoquímico MOSA-PISCES.....	26
Tabla 3: Descripción de los <i>forzantes utilizados en la simulación biogeoquímica del año 2018 definitiva</i>	29
Tabla 4: Parámetros numéricos y características asociados a la batimetría y coordenadas verticales de la grilla utilizada por el modelo MOSA-MAG.....	33
Tabla 5: Clasificación de oleaje de acuerdo a su profundidad.....	39
Tabla 6: Esquemas y parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo operacional MOSA-WW3.....	41
Tabla 7: Resumen de los principales armónicos de marea diurnos y semi-diurnos de la elevación del nivel del mar modelados y observados.....	65
Tabla 8: Parámetros estadísticos obtenidos a partir de los parámetros espectrales de oleaje de los modelos MOSA-WW3 y MFWAM contra las mediciones de la boya SHOA.....	91
Tabla 9: Parámetros estadísticos obtenidos a partir de los parámetros espectrales de oleaje de los modelos MOSA-WW3 y MFWAM contra las mediciones de la boya IFOP.....	92
Tabla 10: Ubicación de los ríos y valores de nutrientes utilizados para la simulación biogeoquímica del 2018 con PISCES.....	126
Tabla 11: Especificaciones técnicas del servidor de alto rendimiento ubicado en Data Center IFOP en Viña del Mar.....	130
Tabla 12: Especificaciones técnicas servidor web para CHONOS ubicado en Data Center Viña del Mar.....	131
Tabla 13: Especificaciones técnicas del servidor de almacenamiento y respaldo de los pronósticos operacionales ubicado en IFOP-Putemún, Castro.....	131

RESUMEN EJECUTIVO

En este informe se presenta el estado actual de los modelos operacionales de pronósticos oceanográficos y atmosféricos para la región de Los Lagos y Aysén, así como una evaluación de una simulación biogeoquímica del año 2018 para las mismas regiones, un modelo oceanográfico físico para la región de Magallanes, y el desarrollo e implementación de un modelo de oleaje, también para la zona de Chiloé-Aysén. Todos estos modelos numéricos forman parte del sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral de Chile “MOSA”. MOSA es una herramienta web de libre acceso que permite realizar consultas y extraer información de pronósticos oceanográficos y atmosféricos de manera fácil y rápida, desarrollada con el propósito principal de generar información útil y relevante para los organismos tomadores de decisiones ante emergencias ambientales y/o sanitarias. MOSA otorga información ambiental diaria con una proyección de 72 horas de variables oceanográficas como temperatura del mar, salinidad, nivel del mar, corrientes marinas, y meteorológicas como temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y dirección e intensidad de los vientos. Toda esta información es relevante para diferentes estudios, tales como: propagación de olas de calor, variabilidad estratificación de la columna de agua, flujos de agua dulce, dispersión de patógenos, vertidos de hidrocarburos, deriva de objetos flotantes, naufragios, etc. Además, en el largo plazo este sistema nos permite comprender de mejor manera la dinámica estuarina y la circulación costera en las regiones de Los Lagos y Aysén.

En la etapa actual del proyecto se evaluó del modelo oceanográfico operacional basado en el modelo “*Coastal and Regional Ocean COmmunity model*” (CROCO), al cual nos referimos como MOSA-CROCO mediante una validación espacio-temporal de las variables de temperatura, salinidad, altura del nivel del mar y corrientes pronosticadas entre los años 2017 y 2023. Del mismo modo, la evaluación de los vientos del modelo atmosférico operacional basado en el modelo “*Weather Research Forecast*” (WRF), al cual nos referimos como MOSA-WRF, fue realizado con la información de siete estaciones meteorológicas disponibles a la fecha. A su vez, evaluamos un modelo biogeoquímico basado en el módulo “*Pelagic Interactive Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*” para el año 2018 (año en el cual se contaba con mayor cantidad de información). A su vez, se continuó con las mejoras y evaluación del modelo físico de alta resolución (~1.5 km) basado en CROCO para la región de Magallanes. Finalmente, diseñamos, e implementamos un modelo de oleaje operacional para la zona del mar de Chiloé-Aysén basado en el modelo de oleaje Wavewatch III.

A su vez, hay que destacar que se incorporó de manera operacional una nueva grilla con valores de batimetría actualizados para la zona de Aysén y de una climatología de caudales diarios provenientes del modelo hidrológico de IFOP al cual nos referimos como FLOW en el modelo MOSA-CROCO para la región de Los Lagos y Aysén. Cabe destacar que en la etapa

anterior ambos productos fueron evaluados, tanto en las mejoras del modelo como en la estabilidad del mismo, y ahora en enero del 2023 fueron implementados de manera oficial. Así mismo, las principales novedades en la evaluación de MOSA-CROCO fueron (1) utilizar 3 diferentes productos de salinidad superficial para evaluar la variabilidad espacial de la salinidad superficial y las diferencias en los errores al utilizar diferentes fuentes de información disponibles, (2) volver a analizar el desempeño con diferentes estaciones de marea disponibles en la región, con el fin de evaluar el impacto del cambio de grilla y (3) utilizar los datos de IFOP de las campañas Patagonia norte en marzo y junio del 2023, para estudiar la variabilidad estacional en la columna de agua en temperatura y salinidad. En términos generales, todos los análisis muestran un correcto desempeño del modelo y una tendencia a una reducción en los rangos de error.

En la etapa anterior del proyecto, los análisis de MOSA-WRF se centraron en estudiar la capacidad del modelo en reproducir adecuadamente los patrones de meso-escala de 3 estaciones meteorológicas disponibles hasta esa fecha (Marzo 2022). En esta ocasión, estudiamos la variabilidad sinóptica de viento, tanto con promedios horarios como promedios diarios de las 7 estaciones meteorológicas disponibles, diferenciando entre estaciones oceánicas, del mar interior y cordilleranas. En general, las estaciones con mayor registro histórico y una fuerte influencia oceánica mostraron los mejores resultados, mientras que las estaciones en zonas cordilleranas presentaron una habilidad relativa menor para reproducir la variabilidad del viento debido a la complejidad de la topografía y los procesos locales

En el caso de los avances en modelación biogeoquímica, en la etapa anterior encontramos que para mejorar las simulaciones era necesario mejorar (1) batimetría del modelo, (2) las tasas de remineralización y respiración asociadas a zonas con menor recambio de agua, (3) la descarga de los ríos y glaciares y la productividad biológica, y (4) la turbidez. Con estos antecedentes en consideración, se implementó una nueva configuración del modelo basado únicamente en el modelo PISCES y en la misma grilla del dominio de MOSA-CROCO para el período con mayor información de datos disponibles (2018). Si bien, aún faltan ajustes por mejorar en el modelo, este cambio de grilla fue capaz de reproducir diferentes procesos, tales como: la disminución de los niveles de oxígeno disuelto en profundidad, una sobre-estimación del nitrato, y la capacidad de replicar patrones espaciales y temporales de clorofila superficial. Esto nos indica que el modelo es capaz de capturar las tendencias generales de ciertos procesos biogeoquímicos en la compleja región de Patagonia norte.

Finalmente, se continuó con el desarrollo y evaluación del modelo físico de alta resolución para la región de Magallanes, o simplemente MOSA-MAG. Si bien, se han realizado ajustes, el modelo aún muestra un sesgo de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura y de 2 PSU en salinidad, es decir, es más frío y salino que lo observado. El grado de ajuste varía de acuerdo a

la zona, pero los patrones estuarinos se encuentran presentes en las simulaciones. La zona con el mejor ajuste es el estrecho de Magallanes, donde las estructuras verticales suelen estar bien representadas.

1. ANTECEDENTES

1.1 Contexto

El estudio de los sistemas costeros marinos de la zona sur de Chile ha aumentado durante los últimos 20 años, esto debido principalmente a los procesos de industrialización que se han llevado a cabo producto del auge de la salmonicultura (Buschmann et al., 2009). Estos procesos han presionado diversos aspectos sociales, económicos y ambientales, y a su vez, han elevado la necesidad de establecer límites ambientales del entorno natural (Olivares et al., 2015), lo cual obliga a tratar el tema desde un enfoque ecosistémico. Considerando solo el factor ambiental, nace la necesidad de mejorar la gestión y el control de las áreas de explotación marina. Dentro de este enfoque, el conocimiento medioambiental donde se encuentra inserta la industria es un eje principal para la planificación y gestión del territorio.

Los desafíos ambientales en la zona involucran a un amplio conjunto de actores presentes, que van desde zonas portuarias, pescadores artesanales, miticultores, salmoneros y/o operadores turísticos, entre otros. Por su parte, las floraciones de algas nocivas (FAN), documentadas en los años 70' en la región de Magallanes, han extendido su cobertura sistemáticamente en la región de Aysén (Muñoz et al., 1992) y en la región de los Lagos (Lembeye et al., 1998), incluyendo últimamente la región oceánica de Chiloé, presentando brotes masivos en Cucao, Faro Corona y Mar Brava, (Mardones et al., 2010). Estos eventos alzaron su punto máximo de agitación social el año 2016, generando una crisis medioambiental y económica en la pesca artesanal que desembocó en masivas protestas ciudadanas y el cierre de la isla por parte de los pescadores artesanales, exponiendo la necesidad de aumentar el conocimiento acerca de las condiciones ambientales que favorecen el crecimiento de esta especie (Roa, 2015). Por ejemplo, Ávila et al. (2015) estudió los factores abióticos que influyen en el crecimiento de la *Alexandrium catenella*.

A su vez la presencia de *Caligus rogercresseyi* (conocido como piojo de mar) y de esporádicos brotes de patógenos virales tales como el ISAv, causante entre 2007 y 2008 de la mayor crisis ambiental, económica y social de la industria, suponen una constante amenaza sobre la actividad acuícola, pesquera y el medioambiente (Mardones et al., 2009). Estos eventos han dejado en manifiesto carencias en la disponibilidad oportuna de información de calidad del sistema natural que contribuya a una mayor comprensión de la situación ambiental.

Por su parte la acuicultura a nivel global ha fijado su expansión hacia zonas más expuestas, motivada últimamente en parte por el colapso de la salmonicultura en Chile en 2008 (Holmer, 2010). Noruega ya ha comenzado diversos proyectos para migrar sus

cultivos de salmónidos a zonas más alejadas de la costa, lo cual tiene sus ventajas tanto para la industria como para el medioambiente, donde se espera mayor bienestar de los peces debido a una mayor calidad del agua con menos influencia de escorrentía terrestre, actividades costeras, y de residuos procedentes de la actividad antropogénica de la costa. Si bien en Chile aún se encuentra en fase de estudio sobre este último punto, las etapas de diseño a fin de garantizar una operación segura deben considerar herramientas operacionales cuantitativas que otorguen información relevante del estado del mar, tales como oleaje significativo, vientos, anomalías térmicas, flujos de oxígeno disuelto, entre otros.

1.2 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA

En el año 2014 comienza el proyecto “Desarrollo de un sistema de predicción sinóptico de circulación marina para el apoyo de la acuicultura”, dando inicio a un experimento único en oceanografía operacional en el sur de Chile. El objetivo principal de este proyecto es diseñar y comenzar la implementación de simulaciones tipo pronósticos para condiciones oceanográficas en un horizonte de 3 días. Desde un comienzo se establece un trabajo de cooperación con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, quienes asesoran el trabajo realizado. De igual forma se generan convenios de cooperación con la Dirección Meteorológica de Chile que permitan acceder a modelos operacionales atmosféricos para la zona de estudio, elemento indispensable en estos sistemas. Además, se estableció un convenio con el centro COPAS Sur-Austral (www.sur-austral.cl) y MUSELS (www.eula.cl/musels) para aumentar la cobertura de mediciones de variables en terreno. Como se menciona anteriormente, a partir de un modelo operacional podemos obtener 3 tipos de productos: modelos retrospectivos (*Hindcast*), modelos precisos para el estado actual del océano (*Nowcast*) y modelos que representen el estado futuro del océano a través de pronósticos (*Forecast*).

El sistema de predicción sinóptico fue nombrado como “Modelo Operacional Sur-Austral” (MOSA). El diseño conceptual inicial de este sistema diseñado en el año 2014 se muestra en la figura 1. Este diagrama conceptual contenía los módulos que pensábamos en ese momento que podrían ser incorporados al sistema y estaba compuesto por varios módulos o modelos que satisfacían distintas necesidades del modelo en esa fecha. Este esquema propone usar el modelo hidrodinámico de circulación regional ROMS con condiciones de borde desde el modelo atmosférico WRF, un modelo hidrológico y un modelo global Mercator-Ocean (Drévilion et al., 2008). A partir de este modelo hidrodinámico se podría acoplar un modelo biogeoquímico. Además se consideraba un gran volumen de datos para la confección de un sistema de monitoreo, control y asimilación de datos.

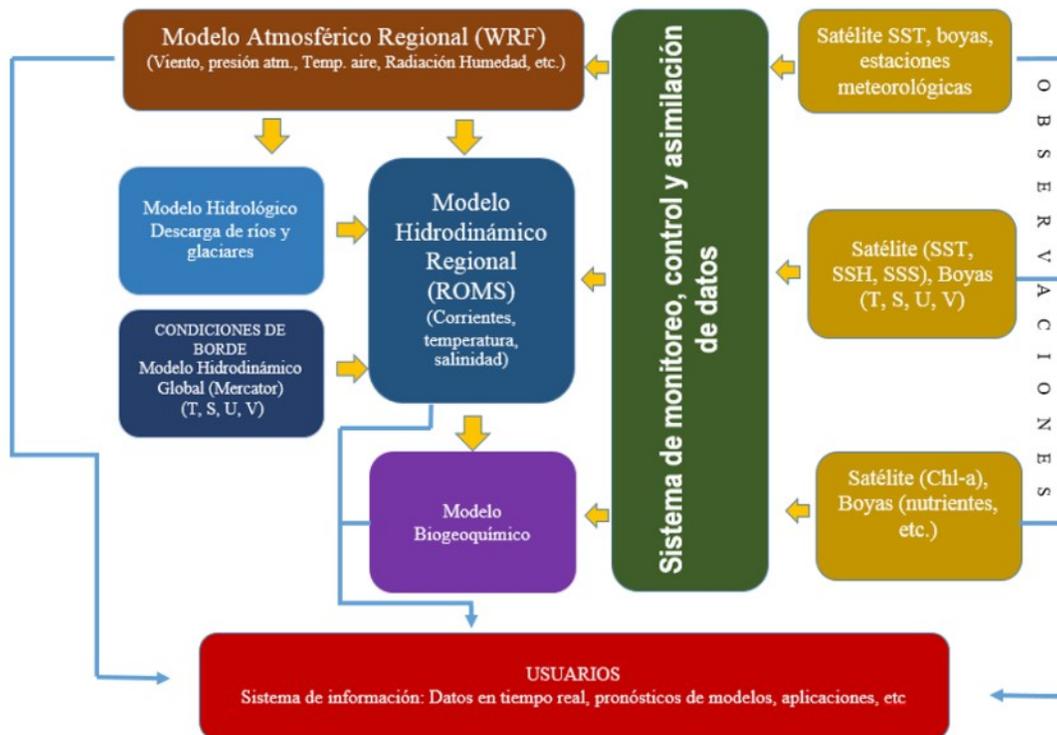


Figura 1: Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo del modelo operativo Sur-Austral, MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.

El desarrollo de este proyecto se encuentra dentro del marco de “Asesoría integral para pesca y acuicultura” (ASIPA) que es un convenio entre Subpesca, el Ministerio de Economía y el IFOP. Este proyecto está encaminado en una perspectiva de desarrollo de mediano y largo plazo en temáticas de gestión costera asociada al conocimiento oceanográfico y desarrollo de herramientas cuantitativas como los modelos numéricos. En otras palabras, se busca mantener un sistema de predicción operacional para la zona sur austral de Chile para aplicaciones a problemáticas asociadas a la acuicultura. A continuación describiremos a grandes rasgos los principales actividades desarrolladas en cada etapa del proyecto y como estas fueron ejecutadas en función del esquema conceptual.

- **Etapa I (2014 – 2015):** En líneas generales, la primera etapa de este proyecto incluyó el diseño del sistema, además de la implementación del modelo hidrodinámico ROMS-AGRIF, denominado para los fines del proyecto como MOSA-ROMS. Su estructura operacional, esta integrado con información del modelo global oceanográfico Mercator-Ocean y con el pronóstico atmosférico *Global Forecast System* (GFS). Este modelo se evaluó preliminarmente con datos históricos. Todo esto acoplado a un sistema que permite visualizar los resultados en línea montados en el servidor web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos).

También se incluyó un diagnóstico de información oceanográfica disponible actualmente para su eventual uso y las perspectivas a corto plazo para generación de nuevos puntos de observación.

- **Etapa II (2015 – 2016):** En esta etapa, el énfasis fue puesto en la calibración y evaluación del modelo para mejorar su calidad y disminuir los rangos de errores encontrados en la etapa previa y así tener un modelo lo más consistente posible. Para esto se realizó una evaluación de patrones oceanográficos generales del sistema a través de información de literatura científica y de observaciones recopiladas por el IFOP y otras instituciones. Además se evaluaron diseños de tecnologías de transmisión de datos en tiempo real en nuevos puntos de observación.
- **Etapa III (2016 – 2017):** En esta etapa y luego del proceso de calibración del modelo en la etapa anterior, se generaron aplicaciones web, principalmente enfocadas a herramientas que permiten calcular el transporte de material disuelto o particulado, esto con el fin de conocer con antelación el posible transportes de materiales riesgosos asociado a la acuicultura (antibióticos, patógenos, etc.).
- **Etapa IV (2017 – 2018):** En esta etapa se agregaron mejoras al modelo oceanográfico operacional MOSA-ROMS, se comenzó la implementación de un modelo atmosférico predictivo exclusivo para el modelo (MOSA-WRF), y se trabajó en la robustez del sistema de plataforma web “CHONOS”.
- **Etapa V (2018 – 2019):** En esta etapa se agregaron nuevas fuentes de agua dulce y se modificó la batimetría en ciertos lugares del modelo MOSA-ROMS. Además, se realizó un diagnóstico del modelo biogeoquímico NPZD.
- **Etapa VI (2019 – 2020):** En esta etapa se agregaron y evaluaron cambios al modelo oceanográfico operacional MOSA-ROMS para mejorar su desempeño en la reproducción de los principales procesos oceanográficos de la zona. Desde octubre del 2019 se actualizó el modelo ROMS a su nueva versión CROCO. Las salidas del modelo MOSA-CROCO fueron implementadas como condiciones de borde para el modelo de dispersión de partículas Parti-MOSA. El modelo operacional MOSA-WRF también fue evaluado. A su vez, se implementaron y evaluaron dos modelos biogeoquímicos: NPZD y PISCES. Finalmente, se realizó un diagnóstico a un modelo físico para la región de Magallanes.
- **Etapa VII (2020 – 2021):** Durante esta etapa se evaluaron los modelos operacionales MOSA-CROCO y MOSA-WRF con la información ambiental

disponible a la fecha. A su vez, se realizó una evaluación de los modelos biogeoquímicos NPZD y PISCES. Finalmente, se realizó un diagnóstico del modelo físico operacional para la región de Magallanes.

- **Etapa VIII (2021 – 2022):** Durante esta etapa se realizó la evaluación de los modelos MOSA-CROCO y MOSA-WRF para las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes con la información ambiental disponible a la fecha. A su vez, se continuaron con las mejoras y evaluaciones de los modelos biogeoquímicos NPZD, PISCES y FENNEL. Finalmente, se mejoró la batimetría en la zona de Aysén, Comau y canal Moraleda dentro del modelo MOSA-CROCO.
- **Etapa IX (2022 – 2023):** Corresponde a la etapa actual del proyecto. Los objetivos de esta etapa son mencionados en la siguiente sección.

Los resultados de cada una de las etapas del proyecto pueden ser consultadas en los respectivos informes técnicos previos. Estos informes pueden ser descargados desde la página web del IFOP (<https://www.ifop.cl/busqueda-de-informes/>).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Mejoramiento, calibración y evaluación del sistema operacional oceanográfico regional para la zona Sur-Austral de Chile, MOSA.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

2.2.2 Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones meteorológicas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

2.2.3 Implementar un atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén.

2.2.4 Evaluar el modelo MOSA-CROCO para la región de Magallanes y Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas en la región.

2.2.5 Diseñar e implementar un modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén.

3. METODOLOGÍA

El modelo de pronóstico operacional Sur-Austral (MOSA) puede dividirse de manera general en un sistema de pronósticos oceanográficos y en un sistema de pronósticos atmosférico. Actualmente, estos sistemas están basados en los modelos *Coastal and Regional Ocean COmmunity model* (CROCO, Debreu et al., 2012) y *Weather Research Forecast* (WRF, Skamarock et al., 2005) para la parte oceanográfica y atmosférica, respectivamente. El modelo CROCO es desarrollado por el *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) en Francia. CROCO es un modelo de circulación oceánica hidrostático (y no hidrostático) que resuelve las ecuaciones primitivas de conservación de momento, energía y masa sobre una grilla rectangular estructurada (Anexo A). El modelo WRF tiene un módulo no hidrostático que permite el libre movimiento de las parcelas de aire en la columna de aire (Anexo B). En términos generales nos referiremos como MOSA-CROCO cuando se refiera netamente al modelo oceanográfico o MOSA-WRF cuando es exclusivo al modelo atmosférico.

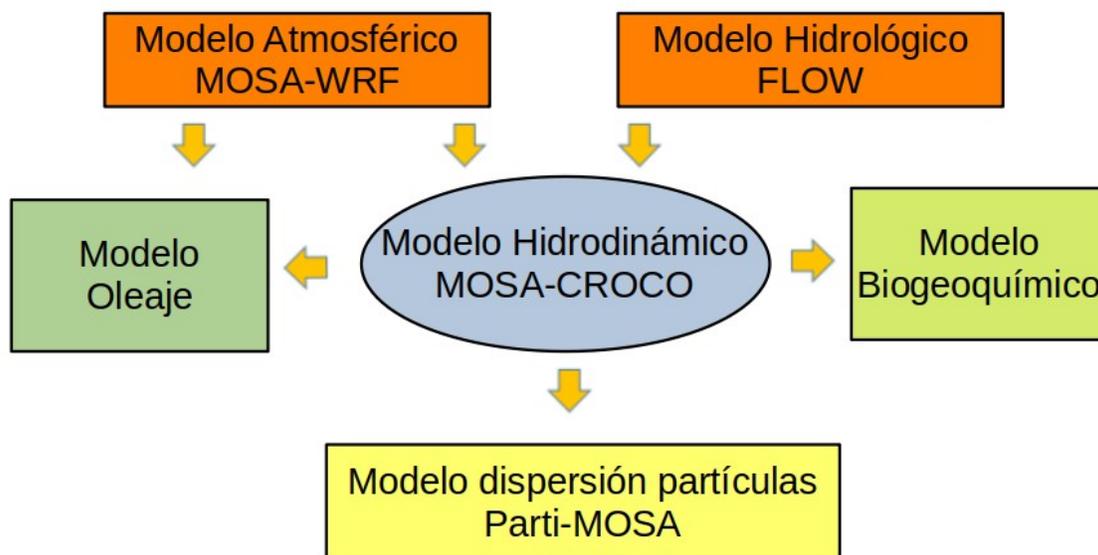


Figura 2: Esquema actual del Modelo Operacional Sur-Austral, MOSA. Se incluyen módulos operacionales y en desarrollo

Para el funcionamiento diario, MOSA-CROCO utiliza condiciones de borde atmosféricas del modelo MOSA-WRF e información de caudales de los principales ríos de la Patagonia del modelo hidrológico FLOW (Fig. 2). Así mismo, MOSA-CROCO está siendo usado como condiciones de borde para un modelo biogeoquímico y un modelo de dispersión de partículas (Parti-MOSA). En otra línea, con la información de MOSA-CROCO y MOSA-WRF se está diseñando e implementando un modelo de predicción de

oleaje. Los principales avances del modelo de oleaje forman parte de la etapa actual de este proyecto (2022-2023).

Cabe destacar que desde el inicio de este proyecto (enero del 2014) hasta septiembre del 2019 MOSA estaba basado en el modelo *Regional Ocean Model System* (ROMS) versión AGRIF (modelo antecesor de CROCO). Desde octubre 2019, MOSA utiliza el modelo CROCO, debido al fin del soporte y mejoras de los códigos del modelo ROMS-AGRIF. Con esta actualización podemos acceder a los últimos cambios y actualizaciones del modelo físico, así como también a los diferentes módulos complementarios como por ejemplo los modelos biogeoquímicos.

En el presente informe nos referiremos a 2 dominios del modelo MOSA-CROCO. El primero corresponde a las regiones de Los Lagos y de Aysén, el cual lleva funcionando operativo desde el 2014 a la fecha (desde el 2018 con resultados más confiables). El segundo corresponde al modelo para la región de Magallanes, el cual su desarrollo comenzó el 2019 y las pruebas operacionales durante el 2021. Ambos modelos tienen una resolución espacial aproximada de 1 km y utilizan un modelo de elevación digital construido con datos batimétricos de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), complementada con información del producto *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) y proyectos locales de mediciones multihaz.

Por otra parte, es necesario contar con información de las variables del sistema tanto horizontal como verticalmente para resolver las ecuaciones primitivas del modelo en cada paso de tiempo. Estas variables son velocidad de la corriente, temperatura, salinidad y nivel del mar. Este conjunto de variables con una cierta variabilidad temporal es lo que conocemos como condiciones de borde o de frontera. En nuestro caso particular, la información de estas variables es entregada al modelo con una variabilidad temporal diaria solo en los bordes abiertos del dominio. Los bordes abiertos son aquellos límites por los cuales existe un transporte de agua asociado. A su vez, a lo largo los bordes abiertos se utiliza una capa esponja de un ancho de 10 km, para evitar ruidos y generación de ondas ficticias producidas por reflexión de ondas en los bordes (Penven et al., 2006). Actualmente tanto el modelo para las regiones de Los Lagos y Aysén, como el modelo para la región de Magallanes utilizan condiciones de borde interpoladas desde el producto Mercator-Ocean (Drévillon et al., 2008) y una condición inicial creada a partir del pronóstico generado el día anterior. De esta manera, MOSA-CROCO es capaz de construir estructuras termohalinas de largo plazo y de reproducir variabilidad estacional en las condiciones oceanográficas. En el caso de la onda de marea, esta fue amortiguada al comienzo de las pruebas del pronóstico operacional, para evitar grandes inestabilidades en el campo de presión. Actualmente se utilizan 10 armónicos de marea sin amortiguamiento. Estos datos

son derivados desde el producto de modelación inversa de mareas barotrópicas TPXO7 (Egbert & Erofeeva, 2002).

Para el caso de la superficie libre del agua se necesita información atmosférica como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor de onda larga y onda corta, precipitación, y humedad. El forzante atmosférico es una parte fundamental de cualquier modelo oceánico, ya que la circulación y la distribución de propiedades conservativas y no conservativas presentes en niveles superficiales y subsuperficiales están altamente relaciones con el viento y los flujos de calor. Los campos de las variables atmosféricas actualmente son obtenidos del pronóstico operacional atmosféricos MOSA-WRF de 3 km de resolución espacial para el modelo MOSA-CROCO de las regiones de Los Lagos y Aysén. En el caso del modelo para Magallanes, se está usando la información del modelo *Global Forecast System* (GFS, Kalnay et al., 1990).

Finalmente, mencionar que un forzante relevante en los modelos de la Patagonia es el aporte de agua dulce al sistema. Estos caudales modifican la estructura de la pycnoclina en las zonas costeras y en la zona de fiordos, cumpliendo un rol fundamental en la circulación estuarina dado que desarrollan flujos gravitacionales que transportan aguas de baja salinidad desde la cabeza a la boca de los fiordos. Actualmente, se utilizan 35 fuentes puntuales con un flujo con variabilidad mensual obtenidos desde datos climatológicos de la Dirección General de Aguas (DGA). Se espera prontamente incorporar datos del modelo hidrológico FLOW, el cual es un producto numérico que contiene información de caudales de toda la Patagonia Chilena con una resolución diaria.

3.1 Metodología objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

Las información oceanográfica observacional juega un papel fundamental en la evaluación de los pronósticos operacionales, ya que permite comparar los registros observacionales *in situ* con las estimaciones de los modelos numéricos implementados en el sistema. A lo largo del desarrollo de MOSA-CROCO se han utilizado productos satelitales y campañas de monitoreo ejecutadas por IFOP para evaluar el desempeño del pronóstico operacional. Por un lado, los productos satelitales disponibles casi en tiempo real, han permitido llevar un monitoreo continuo de la habilidad del modelo en representar la estacionalidad de la temperatura y salinidad superficial en la región y como estas variables se han ido ajustando a lo largo del desarrollo del sistema. Sin embargo, debido a la resolución espacial y a la alta cobertura nubosa presente en la región la información satelital no permite reproducir de manera completa la variabilidad dentro del mar interior de Chiloé y el canal Moraleda, así también como en la zona de fiordos y canales. Por otro lado, se cuenta con información de sensores oceanográficos de las campañas de monitoreo

de IFOP del proyecto “Monitoreo y Modelación de la Variabilidad Espacial y Temporal de Procesos Oceanográficos en Canales y Fiordos Australes”, el cual se enmarca en el convenio de desempeño entre el Ministerio de Economía, Subpesca e IFOP que se suscribe anualmente. Los registros contienen información a lo largo de la columna de agua lo que permiten observar la presencia de las distintas masas de agua y su reproducibilidad por el modelo.

Análisis previos revelaron que al construir productos medios para los pronósticos a 24, 48 y 72 h los campos estimados no cambian de manera significativa, por esta razón los análisis de la evaluación son operados sobre el producto construido a partir de un promedio de las primeras 24 h. El desempeño del modelo operacional fue evaluado mediante una validación espacio-temporal de las variables pronosticadas entre 2017 y 2023. Las herramientas a utilizar constan principalmente de relaciones estadísticas entre bases de datos, las cuales permiten cuantificar la calidad del modelo (detalles de los estadísticos en Anexo C). Los resultados se presentan esquemáticamente mediante mapas y series de tiempo permitiendo una interpretación intuitiva. Las salidas del modelo operacional de la última semana junto con información de las principales variables pronosticadas se encuentran disponibles en el sitio web del proyecto MOSA (<https://chonos.ifop.cl/mosa/index/>) dentro del sistema de observación oceanográfica CHONOS.

Las variables evaluadas en este informe final corresponden a temperatura superficial del mar (TSM) usando el producto *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*. AVHRR es un sistema construido por una combinación de información de diversas plataformas (océano y satelitales) con el fin de obtener la mejor interpolación posible a una resolución de 0.25°. Mediante la metodología *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)* desarrollada por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA). La fuente satelital está disponible en <https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/>.

En el caso de análisis de salinidad superficial, en este informe optamos por comparar el modelo con 3 diferentes productos de reanálisis o satelitales. Los productos corresponden al producto de reanálisis ORAS5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-oras5?tab=overview>), a los productos satelitales SSS-CNR (https://data.marine.copernicus.eu/product/MULTIOBS_GLO_PHY_S_SURFACE_MYNR_T_015_013/description), y ARMOR3D (https://data.marine.copernicus.eu/product/MULTIOBS_GLO_PHY_TSUV_3D_MYNRT_015_012/description). Debido a los últimos cambios implementados en los valores de flujo de agua dulce (revisar informe final anterior, 2021-2022), la comparación fue realizada con

los resultados correspondientes a mayo 2022 y mayo 2023. En este sentido, se realizaron diferencias absolutas entre MOSA-CROCO y los 3 productos, calculando los estadísticos r y $rmse$ (Anexo C).

De forma complementaria, se cuenta con un conjunto de datos observacionales recolectados por el equipo de terreno de IFOP-Putemún en el marco del proyecto mencionado anteriormente. Esta base de datos cuenta con mediciones de salinidad y temperatura mediante estaciones de CTD a lo largo de las regiones de Los Lagos y Aysén, tomadas en los meses de marzo y junio del 2023. Con esta información se construyó 1 transecta para cada período de medición y se comparó con el pronóstico de MOSA para las mismas fechas y posiciones.

Para evaluar el nivel del mar se utilizaron 6 estaciones de mareógrafos disponibles en la zona de estudio, obtenidas del portal del “*Sea Level Station Monitoring Facility*” de la Unesco (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/list.php>). Estas estaciones corresponden a los mareógrafos instalados en Puerto Montt, Castro, Ancud, Melinka, Puerto Chacabuco y Puerto Aguirre. En este caso, realizamos la correlación entre los datos observados y simulados y a su vez, un análisis de armónicos para determinar las amplitudes de los principales constituyentes de marea con sus errores asociados.

Finalmente, para las corrientes oceánicas utilizamos 3 perfiladores de corrientes doppler acústicos (ADCP de su sigla en inglés) disponibles a la fecha. Los ADCP se encontraban ubicados en la Boca del Guafo (73.758° O, 43.589° S), Canal Costa (73.539° O, 45.537° S) y Fiordo Comau (72.501° O, 42.212° S). Los 3 ADCPs se configuraron con mediciones tomadas cada 30 minutos y celdas de 4 m de resolución. Se registraron datos entre 3 y 51 m de profundidad entre noviembre de 2020 y septiembre de 2021 en el Fiordo Comau. En la boca del Guafo se registraron mediciones entre 10 y 66 m de profundidad durante agosto de 2018 y junio de 2019. En Canal Costa, las mediciones se efectuaron entre 4 y 84 m de profundidad entre noviembre de 2018 y febrero de 2019. Los datos de los tres ADCP se descompusieron en componentes ortogonales y se llevaron a promedios horarios, para después integrarlos en la columna de agua. Los componentes ortogonales se utilizaron para producir gráficos de dispersión de las corrientes observadas y modeladas. La variabilidad de las corrientes en el dominio de la frecuencia mediante un análisis de densidad espectral se calculó utilizando el periodograma medio modificado de Welch (Thomson & Emery, 2014). Para la fiabilidad estadística de las estimaciones espectrales, cada serie temporal se dividió en segmentos no solapados para generar estimaciones espectrales de 16 grados de libertad con un 95% de significancia.

3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones meteorológicas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

El presente objetivo, se centró en evaluar el desempeño del pronóstico operacional atmosférico MOSA-WRF en relación al viento sobre los fiordos y canales de la zona Sur-Austral de Chile. El viento desempeña un papel fundamental como forzante en el sistema hidrodinámico, por lo que comprender su comportamiento en detalle es esencial para aumentar el conocimiento en esta área y la vez, mejorar la calidad de los pronósticos del sistema general de pronósticos MOSA.

Para este análisis se descompuso el vector bidimensional del viento en sus componentes perpendiculares U y V, las cuales fueron sometidas a la metodología de rotación de los ejes a los ejes de máxima varianza, obteniendo el angulo de rotación a través de la técnica de componentes principales (Gonella, 1972), la cual permitió descomponer el vector bidimensional del viento en dos componentes ortogonales y determinar la dirección en que los datos tienen la máxima variación. La rotación de los ejes de máxima varianza es un método comúnmente utilizado en el análisis de datos multivariados para encontrar una nueva base de coordenadas que maximice la varianza de los datos en cada una de las nuevas variables. En el caso del viento, esto implica encontrar la dirección en la que los datos presentan la mayor variación, capturando así la mayor parte de la información (para más detalle de esta metodología, revisar informe de etapa anterior, año 2021-2022). Posteriormente, se dividió el análisis en dos casos: promedios horarios y promedios diarios de cada serie de tiempo. Esto permitió evaluar la capacidad del modelo para reproducir los procesos en diferentes frecuencias.

Los datos de referencia para la evaluación MOSA-WRF, se obtuvieron de estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de monitoreo atmosférico implementada por el equipo de Oceanografía de IFOP-Putemún. Estos instrumentos han sido instalados en diferentes etapas de este proyecto y actualmente se encuentran operativas 7 estaciones en la región de la Patagonia Norte (Fig. 3). Esta red almacena información cada 10 minutos y se envía a través de tecnología de comunicaciones móviles (*Global System Mobile communications*, GSM) cada 1 hora. Además, cada una de las estaciones está equipada con paneles solares, lo que les permite un funcionamiento completamente autónomo. Toda la información registrada por estas estaciones está alojada en la herramienta REDMET, disponible en la plataforma de libre acceso CHONOS, a la cual se puede acceder a través del sitio web <https://chonos.ifop.cl/redmet/>.

Las estaciones están dotadas con sensores que miden diferentes variables atmosféricas, incluyendo la magnitud y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, luz par y precipitación. Cada estación se

encuentra posicionada estratégicamente para lograr una mayor cobertura espacial. Algunas estaciones se encuentran ubicadas en áreas más oceánicas, como Melinka, Cucao y Corona; otras en condiciones de mar interior, como Apiao y Tranqui; y las otras en zonas más cordilleranas, como Marimeli y Comau. Esta distribución permite capturar información atmosféricas en diferentes entornos geográficos y así describir la variabilidad espacial presente en esta zona. Además, esta información nos permite evaluar el desempeño de MOSA-WRF, en términos espacial y temporales.

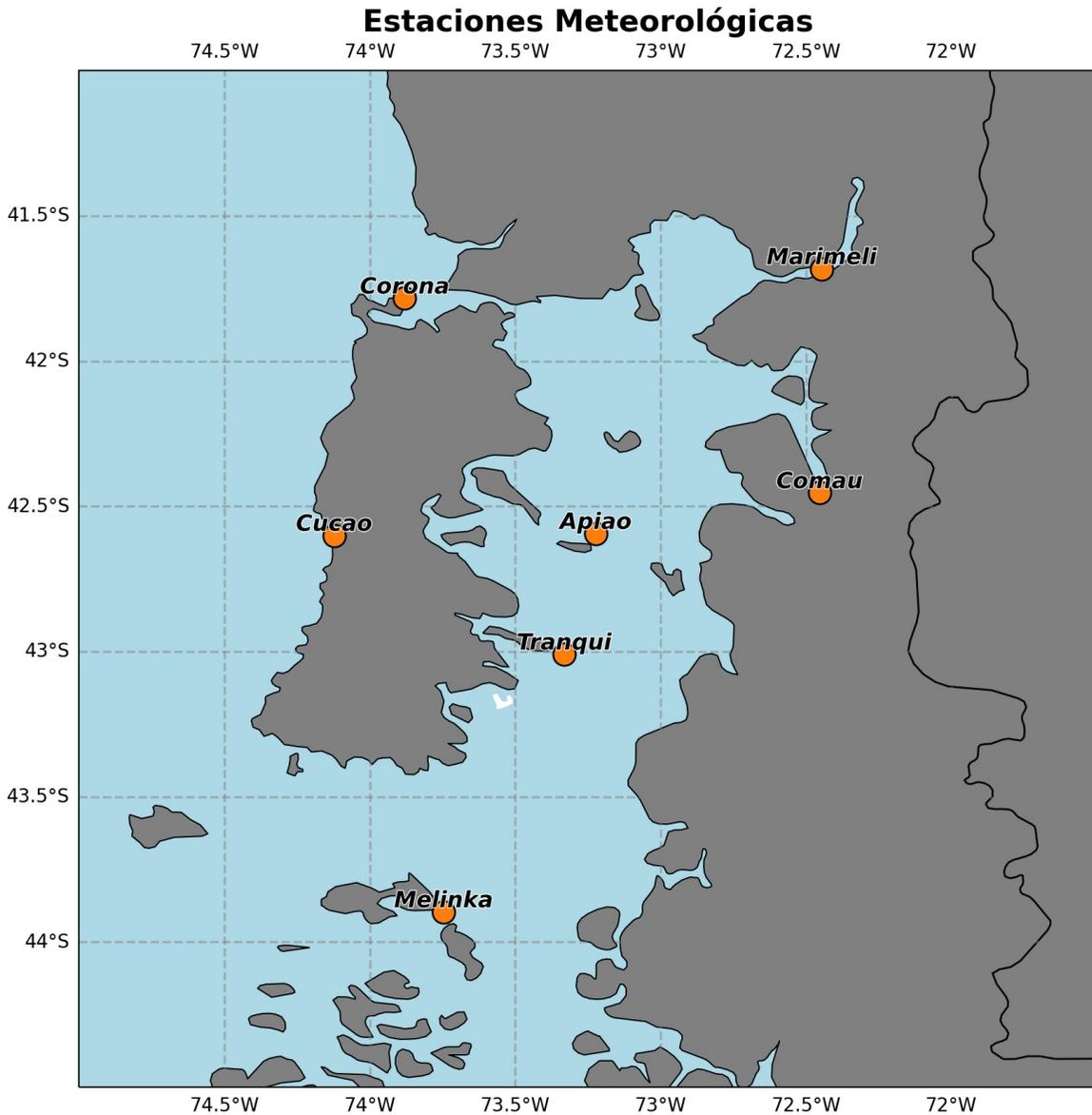


Figura 3: Mapa con las estaciones meteorológicas implementadas por IFOP-Putemún utilizadas para evaluar el desempeño del viento en MOSA-WRF.

Las estaciones más antiguas son Cucao, Isla Apiao y Melinka, que comenzaron a registrar datos en agosto, septiembre y diciembre de 2017, respectivamente. Posteriormente, se instalaron estaciones en el fiordo Comau, Isla Tranqui, Faro Punta Corona y Isla Marimeli en diferentes fechas. Por lo tanto, el período de estudio para cada estación se determinó según la disponibilidad de datos desde el inicio del pronóstico, que se remonta al 20/07/2018. Sin embargo, en los casos de Apiao y Corona, no fue posible realizar el análisis desde el inicio de los registros debido a cambios en el sensor de viento por obstáculos cercanos en Apiao y fallas técnicas en Corona. Los periodos de estudio establecidos, además de un resumen general de cada estación, se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen con las principales características de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo REDMET en Patagonia norte.

Estación	Posición (°S,°O)	Altura viento (m)	Fecha instalación	Período estudio
Cucao	42.600, 74.122	9	03/08/2017	20/07/2018 - 16/07/2023
Melinka	43.900, 73.746	10	11/12/ 2017	20/07/2018 - 16/07/2023
Apiao	42.594, 73.223	7	01/09/2017	20/12/2022 - 16/07/2023
Tranqui	43.010, 73.332	7	27/07/2021	01/08/2021 - 16/07/2023
Marimeli	41.683, 72.446	7	31/01/2023	08/02/2023 - 16/07/2023
Comau	42.454, 72.453	9	04/11/2020	05/11/2020 - 16/07/2023
Corona	41.784, 73.880	7	30/08/2022	19/04/2023 - 16/07/2023

Finalmente se utilizaron diversos indicadores estadísticos para llevar a cabo una evaluación más completa y poder medir diferentes aspectos del desempeño del modelo MOSA-WRF en la simulación del viento. Estos indicadores pueden encontrarse en el Anexo C. Estos indicadores estadísticos permiten evaluar la precisión y habilidad del modelo MOSA-WRF en la simulación del viento en la región de la Patagonia Norte. Proporcionan información sobre posibles errores sistemáticos, la correlación entre los resultados simulados y observados, la amplitud de los datos modelados y el desempeño relativo del modelo en comparación con una referencia.

3.3 Metodología objetivo específico 3: Implementar un atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Dado el progreso logrado en las etapas anteriores de este proyecto y la notoria mejora en los recursos computacionales, que ha significado una reducción significativa en los tiempos de cálculo, se optó por la implementación del modelo biogeoquímico PISCES para simular el año 2018. La elección de este año en particular se sustentó en el hecho de

que durante ese período se disponía del conjunto más amplio de observaciones de nutrientes y clorofila en las regiones de los mares de Chiloé y Aysén.

El modelo biogeoquímico PISCES (Aumont et al., 2003), abarca la simulación de diversas variables, incluyendo nanofitoplancton, diatomeas, dos clases de materia orgánica que se hunden y se remineralizan diferenciadamente, dos clases de zooplancton y la química del sistema carbonato del océano. Además, el modelo resuelve las concentraciones de oxígeno (O₂), nitrógeno (NO₃), amonio (NH₄), fósforo (PO₄), silicato (Si), carbono orgánico disuelto (DOC) y carbono inorgánico disuelto (DIC).

A pesar de haber establecido el modelo biogeoquímico en base a la estructura hidrodinámica predefinida del modelo MOSA-CROCO, que incluía elementos como la batimetría y revisada en diferentes zonas del dominio, parametrizaciones físicas evaluadas para el modelo hidrodinámico, información climatológica de caudales mensuales provenientes de 35 fuentes fluviales y otros datos, se llevaron a cabo pruebas de sensibilidad específicas para potenciar los resultados del modelo biogeoquímico. Estas pruebas que se encuentran resumidas en la Tabla 2, se limitaron al mes de enero de 2018, y obedecieron a la estrategia de obtener el mejor escenario para enero, a fin de que la simulación anual subsiguiente fuera lo más representativa posible.

Tabla 2: Descripción de las pruebas de sensibilidad realizadas para el modelo biogeoquímico MOSA-PISCES.

Nombre Simulación	Objetivo
croco_bat	Grilla croco_grd_PAN_v11b
croco_Y2018M1_3_Cdiario_2a	Valores de los ríos con valor promedio
croco_Y2018M1_3_Cdiario_2b	Valores de ríos valor promedio en ríos que no se conoce y valores para los ríos descritos
croco_Y2018M1_3_Cdiario_2c	Cambio en el valor promedio.
croco_3	Simulación con 50 ríos
croco_Y2018M1_3_Caudal	Caudales con promedio mensual de enero 2018
croco_Y2018M1_3_Cdiario	Caudal diario de enero del 2018
croco_exp	Descarga de agua dulce exponencial
croco_F1	Esquema de advección lateral spline
croco_F2	Esquema de advección lateral WENO5
croco_Y2018M1_3_Cdiario_2_rad	Aumento del 10% radiación de onda corta
croco_Y2018M1_3	Disminución de condiciones iniciales de sílice en 8
croco_inic	Condición inicial construida con datos CIMAR

Una de las primeras pruebas de sensibilidad que se realizó consistió en probar el modelo PISCES con la última grilla utilizada por MOSA-CROCO. Si bien, esta grilla tiene el mismo número de elementos que versiones anteriores, la diferencia radica en que la batimetría en la zona de Canal Moraleda, específicamente en los canales de Puyuhuapi y Jacaf es más precisa. Actualmente esta grilla se usa de manera operacional en MOSA-CROCO desde enero del 2023 (ver discusión).

Un aspecto de importancia para mejorar el desempeño del modelo PISCES en las regiones de Chiloé y Aysén fue realizar pruebas numéricas relacionados con los ríos. En este contexto, los flujos de agua dulce y los correspondientes aportes (tales como nutrientes, oxígeno, hierro, materia orgánica, entre otros) desempeñan un papel esencial al modular los patrones de productividad primaria y la distribución de nutrientes y oxígeno disuelto en el área costera. Por lo tanto, el objetivo de estas pruebas fue establecer valores adecuados para los ríos, considerando la restricción existente en cuanto a la disponibilidad de datos.

Los valores seleccionados para variables como nitrato, fosfato, silicato, hierro y amonio se basaron en información obtenida a partir de los muestreos realizados en los cruceros Patagonia Norte y muestreos del programa *Didymo* ambos realizados por IFOP, así como en los datos recolectados durante los cruceros CIMAR. Además, se tomaron en cuenta los valores publicados por Pryer et al. (2020), Curra-Sánchez et al. (2022) y León-Muñoz et al. (2021). Dado que se emplearon 50 fuentes de agua dulce y no todos contaban con información detallada sobre estas variables, se llevaron a cabo pruebas con diferentes enfoques. Para aquellos ríos donde no se disponía de información específica acerca de estas variables, se optó por realizar pruebas utilizando un valor promedio como punto de partida. Por otra parte, para los ríos que contaban con descripciones detalladas y mediciones específicas, se utilizó información precisa para establecer los valores correspondientes.

Un aspecto adicional de gran importancia fue la cantidad de ríos considerados. Con el propósito de abordar este aspecto, se llevaron a cabo pruebas que ampliaron el número de aportes provenientes de fuentes de agua dulce, haciendo uso de los caudales diarios proporcionados por la herramienta FLOW de CHONOS (<https://chonos.ifop.cl/flow/>). Otro aspecto significativo durante este proceso se relaciona con la forma de descarga de los ríos. En este sentido, se realizaron pruebas exploratorias que involucraron dos enfoques distintos: uno con descargas de agua dulce distribuidos en la vertical de manera uniforme, y la otra con una liberación de agua de manera exponencial con mayor aporte en superficie y una disminución hacia el fondo. Estas exploraciones adicionales resultaron útiles para capturar de manera precisa los efectos de los aportes fluviales en el entorno costero y para determinar la configuración más apropiada en cuanto a la forma y profundidad de las descargas.

Adicionalmente, con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos, se llevaron a cabo pruebas con diferentes esquemas físicos de advección y con el aumento de un 10% de la radiación de onda corta. Finalmente, otro aspecto de suma relevancia se relacionó con las pruebas de las condiciones iniciales del modelo. En este sentido, se exploraron diversas aproximaciones. Una de estas pruebas se realizó empleando las condiciones iniciales del producto global de biogeoquímico *hindcast* de Mercator-Ocean con una resolución de $1/4^\circ$ (GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029). Otro enfoque implicó reducir en una octava parte las concentraciones de silicio del producto de Mercator. Por último, se llevaron a cabo pruebas utilizando condiciones iniciales construidas a partir de los datos provenientes de los cruceros CIMAR (Fig. 4).

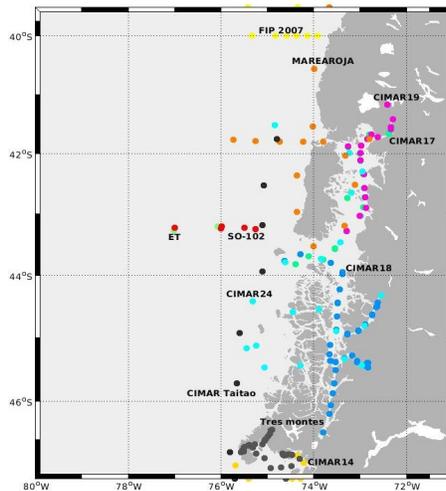


Figura 4: Datos utilizados para crear una condición inicial a partir de cruceros CIMAR.

Finalmente, la configuración adoptada para la simulación correspondiente al año 2018 (Tabla 3) se basó en la utilización de 42 niveles verticales y la grilla última grilla estable del modelo operacional MOSA-CROCO (*croco_grd_PAN_v11b.nc*). Para los forzantes atmosféricos se tomaron datos del reanálisis ERA5 y para el nivel del mar se utilizaron datos del modelo global TPX07. En relación a las condiciones iniciales y de borde de las variables hidrodinámicas, como la temperatura, salinidad y corrientes, se utilizaron datos diarios del producto GLORYS12V1 proporcionado por el *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) con una resolución de $1/12^\circ$.

En lo que respecta a las variables biogeoquímicas, como el oxígeno disuelto, fosfato, nitrato y silicato, se construyeron las condiciones iniciales a partir de la interpolación de datos obtenidos de los cruceros CIMAR (Fig. 4). Para las condiciones de borde, se emplearon datos diarios del modelo global biogeoquímico *hindcast* de Mercator-

Ocean con una resolución de 1/4° (GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029). Además, la simulación incorporó 50 fuentes de agua dulce con descarga diaria, cuyos datos diarios se obtuvieron a través de la herramienta FLOW.

Tabla 3: Descripción de los forzantes utilizados en la simulación biogeoquímica del año 2018 definitiva.

Variable		Descripción
Coordenadas verticales		42 capas sigma
Fuentes de agua dulce		
Caudales diarios		FLOW
Forzantes atmosféricos		
Temperatura superficial del aire		ERA5- Interim
Humedad relativa del aire		
Precipitación		
Radiación onda corta		
Radiación onda larga		
Componentes del viento (u y v)		
Forzantes hidrodinámicos		
Armónicos de marea		TPX07
Temperatura		GLORYS12V1
Salinidad		
Componentes de la corriente (u y v)		
Forzantes biogeoquímicos		
Condiciones iniciales	Nitrato	CIMAR-Fiordo
	Oxígeno	
	Fosfato	
	Silicato	
Condiciones de borde	Nitrato	GLOBAL_MULTIYEAR_BG C_001_029
	Oxígeno	
	Fosfato	
	Silicato	

Para los ríos que no se contó con información se utilizó un promedio de los valores de nitrato, fosfato, silicato, hierro y amonio obtenidos disponibles para los otros ríos. Es importante señalar, que estos valores se mantuvieron constantes y no experimentaron cambios en los meses subsiguientes. Los detalles específicos de estos valores se encuentran en la Tabla 10 del Anexo D. En lo que respecta al oxígeno disuelto, se optó por utilizar un valor constante e igual para todos los ríos, estableciendo una concentración de 327 μM .

Es relevante subrayar que como parte de la estrategia para garantizar la estabilidad del modelo, se repitió la simulación del mes de enero 3 veces para mezclar la condición inicial y lograr un equilibrio numérico en el modelo. Sin embargo, cabe destacar que no fue factible extender este número de simulaciones debido a las limitaciones en los recursos

computacionales, específicamente al tiempo de cálculo. El proceso de simulación implica un consumo significativo de recursos computacionales, con cada mes de simulación demandando un lapso de tres días para completarse. A pesar de la aspiración inicial de realizar un mayor número de iteraciones, se adoptó un enfoque pragmático en consideración de los recursos computacionales disponibles.

Con el propósito de evaluar el rendimiento del modelo a lo largo del año 2018, se realizaron comparaciones empleando diagramas T-S (temperatura-salinidad). Esta metodología se aplicó con el objetivo específico de determinar si el modelo fue capaz de representar adecuadamente las condiciones de oxígeno disuelto y nitrato en las masas de agua características en la zona de estudio. Es relevante destacar, que los datos de nitrato son más limitados en comparación con los datos de oxígeno disuelto ya que se obtienen a través de muestras discretas recogidas mediante botellas oceanográficas. Esta restricción en la disponibilidad de datos de nitrato se debe al método de muestreo que implica la recopilación puntual de muestras en ubicaciones específicas y en momentos determinados, a diferencia de los datos de oxígeno disuelto que su registro es realizado con CTDO.

Los diagramas T-S fueron categorizados en dos áreas: la zona de Chiloé y la zona de Aysén (Fig. 5). Para la creación del diagrama T-S correspondiente a la zona de Chiloé, se utilizaron datos recopilados durante la campaña del proyecto de seguimiento ambiental de IFOP realizada en marzo de 2018. En lo que respecta al diagrama T-S de la zona de Aysén, se basó en información obtenida de las campañas del proyecto Modelación de alta resolución aplicada al transporte hidrodinámico en la región de Aysén (Soto et al., 2018) de IFOP, las cuales tuvieron lugar en junio y agosto de 2018. Para la comparación, se seleccionaron los puntos del modelo más cercanos a las estaciones de muestreo reales y en la misma fecha. Esto permitió una evaluación directa y precisa del desempeño del modelo en la reproducción de las condiciones de temperatura y salinidad observadas en las áreas de Chiloé y Aysén durante el año 2018.

Con el objetivo de evaluar el desempeño espacial del modelo, se implementó un enfoque que involucró el promedio de los primeros 20 metros de profundidad de los datos de oxígeno y nitrato utilizados en los diagramas T-S. Estos datos tanto de las campañas observacionales como del modelo se interpolaron y se graficaron al igual que la diferencia entre lo observado y lo modelado. Es relevante señalar que, aunque los dos diagramas están presentados en una misma figura, los datos de Chiloé corresponden al mes de marzo, mientras que los datos de Aysén corresponden a los meses de junio y agosto.

Finalmente, con el propósito de evaluar la capacidad del modelo para representar la concentración superficial de clorofila, se llevó a cabo una comparación utilizando datos estacionales del satélite Sentinel 3A

(<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directdataaccess/Level-3%20Mapped/S3A-OLCI/2018/>) con resolución de 4km. Para ello, se calculó la cobertura de datos estacionales utilizando información diaria del satélite Sentinel 3A. Esto implicó determinar la cantidad de días en los cuales se disponía de datos observacionales válidos y se procedió a calcular un promedio de los valores de clorofila de los píxeles que tenían una cobertura de datos superior al 10%. Esto aseguró que solo se incluyeran en el promedio aquellos píxeles con una cantidad suficiente de datos disponibles para un análisis significativo. En cuanto al modelo se promediaron los datos diarios de clorofila de las diatomeas y nanofitoplancton.

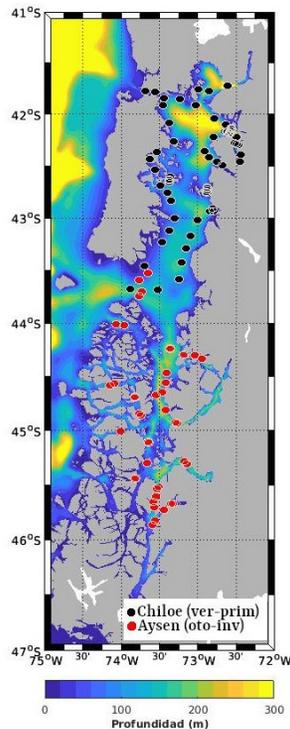


Figura 5: Estaciones y batimetría del modelo utilizada para los diagramas T-S.

3.4 Metodología objetivo específico 4: Evaluar el modelo MOSA-CROCO para la región de Magallanes y Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas en la región.

Entre las etapas anteriores de este proyecto (2019 - 2021) se ha trabajado en la construcción de un modelo oceanográfico estable para la región de Magallanes. A la fecha, se ha avanzado en la construcción de una batimetría equilibrada entre los aspectos topográficos y la estabilidad numérica del modelo. A su vez, se han evaluado los posibles forzantes y condiciones de borde para la zona de estudio. Así mismo, se realizó un diagnóstico de los recursos computacionales necesarios y los tiempos de cómputo involucrados para la ejecución de este modelo de manera operacional. El objetivo de

MOSA-MAG es tener un modelo operacional que sea capaz de generar pronósticos a un horizonte a definir para la región de Magallanes, que sea capaz de resolver los principales procesos oceanográficos que presenta esta región, en especial las zonas de mares interiores. A lo largo de esta etapa del proyecto, así como en la parte anterior se han realizado numerosas pruebas para probar diferentes aspectos que componen un modelo de pronósticos. En las secciones previas hemos presentado como se ha ido construyendo paso a paso las diferentes partes del modelo.

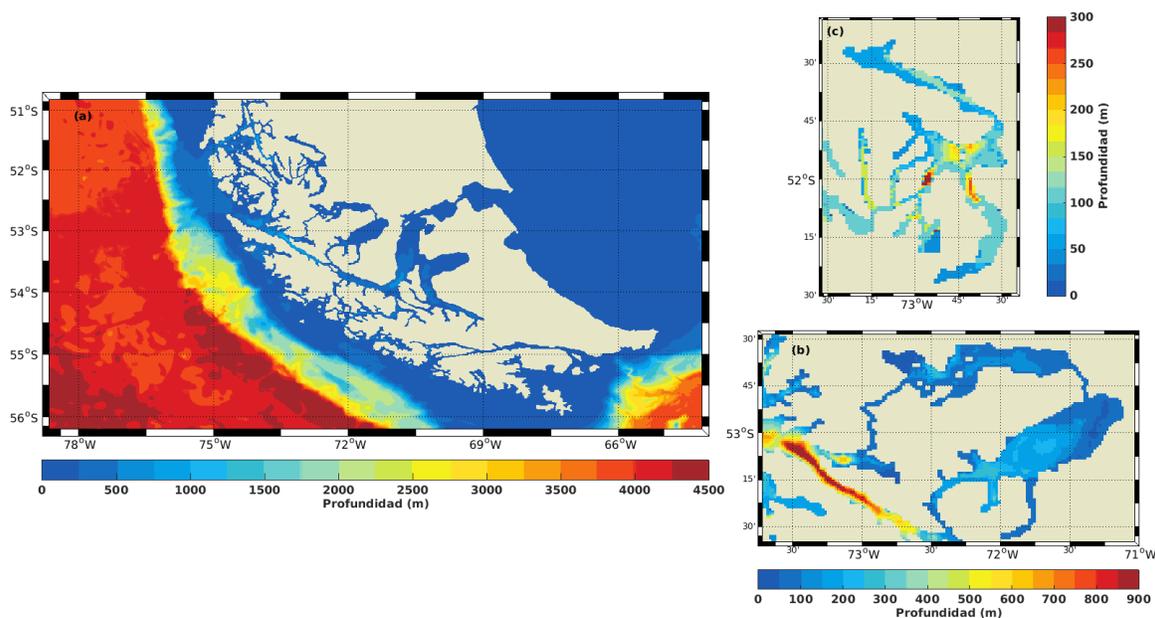


Figura 6: (a) Dominio y batimetría utilizada del modelo MOSA-MAG. (b) Batimetría empleada en los Senos Skyring y Otway (c) Batimetría empleada en el Golfo Almirante Montt.

Debido a la extensión geográfica de la región se optó por la implementación de un modelo que cubra parcialmente la región. Este dominio abarca por el norte desde el estrecho Nelson ($\sim 51^\circ\text{S}$), hasta el sur del archipiélago de Cabo de Hornos ($\sim 57^\circ\text{S}$). A su vez, también contiene las salidas occidentales y orientales del estrecho de Magallanes, por lo que se debe abarcar condiciones de borde para los océanos Pacífico, Atlántico y Antártico, lo que implica un modelo con bordes abiertos en los 4 puntos cardinales (Fig. 6a). Consideramos que la extensión del dominio debe contener zonas de interés para futuros modelos anidados de mayor resolución espacial como el seno Otway, seno Skyring (Fig. 6b) y Golfo Almirante Montt (Fig. 6c), estrecho de Magallanes, canal Beagle e Isla Navarino.

En relación a la batimetría, inicialmente se generó una grilla con la fuente batimétrica Etopo 2, que es la misma que utiliza CROCO para la generación de grillas de manera predeterminada. Sin embargo, estos valores en la mayoría de los casos son

altamente subestimados en las zonas costeras (solo en algunas excepciones son sobrestimados), conduciendo a perfiles poco realistas para la zona. De este modo, reemplazamos la batimetría por datos de la base mundial de datos batimétricos GEBCO_2020 (<https://www.gebco.net>) para la zona más oceánica y datos de sondas de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) para las zonas interiores. Este último paso se realiza de forma manual, modificando píxel por píxel lo cual conlleva un trabajo largo y sinuoso que ha tomado gran parte del desarrollo del modelo. Notar que existen grandes zonas donde se ha debido suavizar fuertemente los perfiles batimétricos para obtener gradientes de profundidad pequeños. Esto se realiza para lograr que el modelo sea estable en la propagación de condiciones de borde hacia el interior. MOSA-MAG usa 42 niveles verticales del tipo sigma, los cuales siguen la batimetría del dominio en base a parámetros lineales. Para la distribución de los niveles verticales, se usaron parámetros que buscan mantener una mayor resolución en superficie, y por ende una menor resolución en capas intermedias y profundas. Esto debido a que en capas superficiales y subsuperficiales ocurren los procesos de mezcla e intercambio más relevantes de la circulación. Un resumen de los parámetros del dominio son presentados en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros numéricos y características asociados a la batimetría y coordenadas verticales de la grilla utilizada por el modelo MOSA-MAG.

Dimensiones		Batimetría		Niveles verticales	
LLm	813	Profundidad máxima	5000	Theta_s	7
MMm	518	Profundidad costa	10	Theta_b	2.5
Mínima resolución	1.12 km	Profundidad mínima	10	hc	20
Máxima resolución	1.27 km	Gradiente máximo	0.33	Tipo transformada	2
Niveles verticales	42	# filtro profundo	1		
		# filtro hanning	2		

La condición inicial y de borde utilizadas para la temperatura, salinidad y corrientes fueron obtenidas del modelo operacional global Mercator-Ocean (<https://marine.copernicus.eu>). Específicamente se utilizará el producto *Global Analysis Forecast Physics* 001-024 con una resolución espacial de $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ (~ 9.5 km)

distribuidos sobre 50 niveles verticales entre 0 y 5500 m, el cual genera diariamente salinidad, temperatura del mar, corrientes, y nivel del mar, entre otras variables con un pronóstico a 10 días. Para el caso de la condición inicial, MOSA-MAG utilizará como condición inicial cada día la condición pronosticada el día anterior, de este modo logramos conservar la estratificación obtenida con las descargas de ríos persistentes sobre el dominio. Una condición inicial interpolada desde Mercator-Ocean solo se utilizará una única vez al inicio del pronóstico.

Para el caso de la superficie libre del agua se necesita información atmosférica como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor de onda larga y onda corta, precipitación, y humedad. El forzante atmosférico es una parte fundamental de cualquier modelo oceánico, ya que la circulación y la distribución de propiedades conservativas y no conservativas presentes en niveles superficiales y subsuperficiales están altamente relacionadas con el viento y los flujos de calor. Se usaran como condiciones de borde superficiales de flujos de calor, magnitud y dirección del viento datos del modelo operacional *Global Forecast System (GFS, Kalnay et al., 1990)*. Este producto contiene pronósticos de variables atmosféricas cada 6 horas a una resolución de 0.25° (~ 25 km), con un horizonte de 10 días y está disponible en (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>).

La región costera de Magallanes se denomina como una región de influencia de agua dulce o ROFI (*Region Of Freshwater Influence*). ROFI consiste en una zona estuarina de gran escala, donde predominan flujos de alta boyantes provenientes de agua dulce deshielos glaciares y nieve, y ríos. El grado de estratificación del sistema (y por ende la circulación a gran escala) estará fuertemente modulado por la presencia de glaciares y campos de hielo. Por esta razón, utilizaremos 25 caudales mensuales de descarga de agua dulce obtenidos del modelo de agua dulce FLOW (<http://chonos.ifop.cl/flow/>). FLOW está basado en el modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity (VIC, Liang et al., 1994; Hamman et al., 2018)*, y cuenta con caudales diarios entre 1980 y 2018 y las descargas por deshielo de gran parte de las cuencas entre las regiones de Los Lagos y Magallanes.

La ubicación de las fuentes puntuales junto con sus valores de caudales mensuales utilizadas en el dominio de MOSA-MAG se presentan en la figura 7. Notar que para no inducir una distorsión en la figura de las series, el caudal del río Serrano (fuente N°1 en el mapa) en el fiordo Ultima Esperanza dentro del Golfo Almirante Montt (GAM) se presenta por separado. El río Serrano, tiene caudales máximos cercanos a los $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, siendo la mayor fuente de agua dulce ingresada al modelo. La dinámica del GAM es sumamente relevante, puesto que es la zona por donde se drena el sistema de lagos del parque Torres del Paine. Del mismo modo, la información presentada en FLOW indica una alta presencia de caudales menores en la zona, que combinados pueden ser altamente significativos, por lo

que estos valores no serán considerados como definitivos entendiendo que podrían estar altamente subestimados. Sin embargo se debe tener en cuenta que el ingreso de caudales al modelo debe ser cauteloso y debe resguardar la estabilidad, puesto que el ingreso del volumen extra de agua presiona al modelo a mantener su conservación de masa en una zona de estrechos canales, lo que puede dar lugar a errores numéricos e inestabilidad numérica.

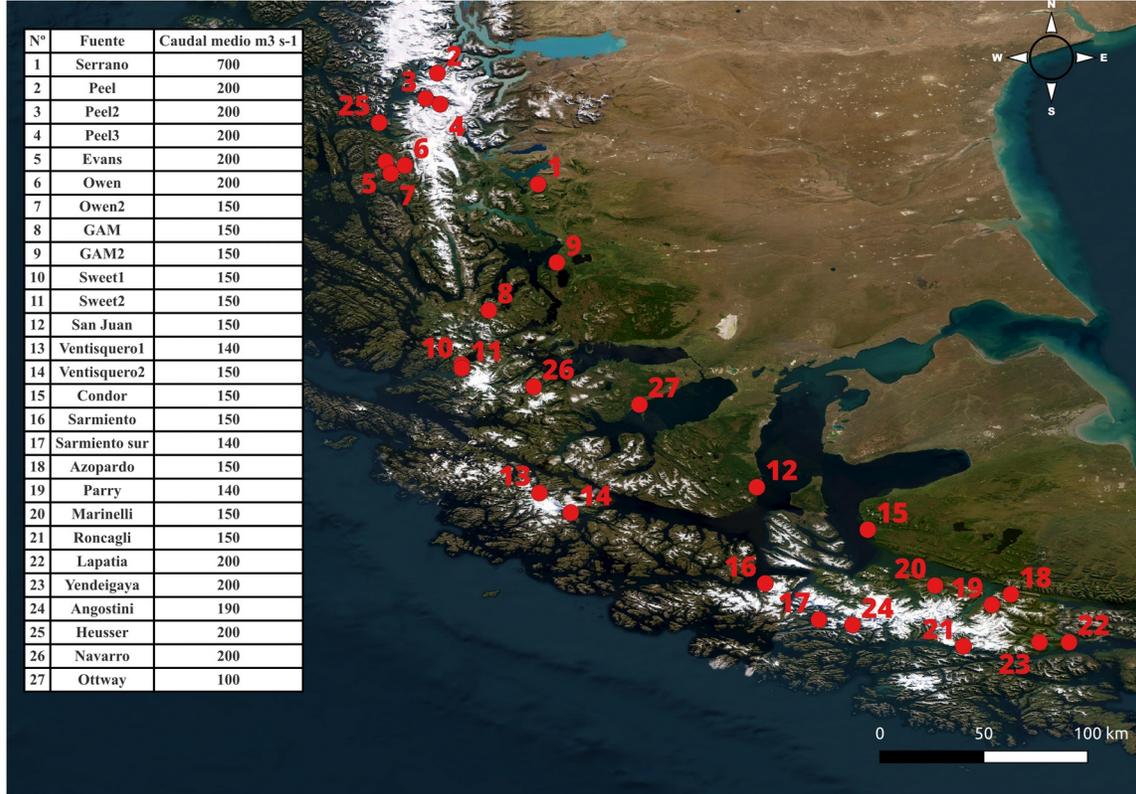


Figura 7: Ubicación y promedio anual de los caudales de agua dulce utilizados en el modelo MOSA-MAG.

MOSA-MAG fue configurado para simular 3 días de pronósticos oceanográficos, resolviendo las ecuaciones primitivas de Navier-Stokes (Anexo A) cada 20 segundos. MOSA-MAG registra información de las variables oceanográficas físicas de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar. Las salidas numéricas son almacenadas en una frecuencia horaria (archivos con un tamaño de 5.5 GB comprimido) y en forma de promedios diarios (archivos con un tamaño de 265 MB comprimido). El modelo se ejecuta en un servidor de alto rendimiento ubicado en un DataCenter de IFOP en Viña del Mar (Anexo E). Cada simulación de pronóstico utiliza 2 nodos de calculo con 24 núcleos de procesamiento cada uno. El modelo es paralelizado utilizando una configuración de memoria distribuida tipo MPI, dividiendo el dominio y asignando un procesador (núcleo) para calcular a cada uno de los 48 pequeños sub-dominios divididos. Notar que en este mismo servidor es donde se ejecutan y funcionan diariamente los otros modelos

operacionales de MOSA, por lo que la capacidad de este queda limitada al utilizar este modelo, no haciendo posible su uso para un modelo de mayor horizonte temporal o para futuros anidados de mayor resolución espacial.

El modelo conceptual de la operación diaria de MOSA-MAG se puede resumir en 5 pasos (Fig. 8):

1. **Inicialización del modelo:** Consiste en activar las rutinas que comienzan a generar los directorios de trabajo y las variables de entorno para cada pronóstico. Este proceso se considera instantáneo.
2. **Descarga de datos y creación condiciones de borde:** Se obtienen los datos de modelos globales para la creación de condiciones de bordes hidrodinámicas y atmosféricas. Por una parte se descargan los datos del modelo Mercator-Ocean el cual contiene información en la columna de agua de temperatura, salinidad, y corrientes diarias. El tiempo aproximado para este proceso es de 2 horas 30 minutos. Por otra parte, se descargan los datos atmosféricos de GFS, el cual contiene información de temperatura del aire, precipitación, radiación y dirección e intensidad de vientos. El tiempo aproximado para este proceso es de 2 horas.
3. **Incorporación de datos estáticos:** En este paso se agregan las fuentes de agua dulce al archivo de configuración del pronóstico diario. Este proceso se considera instantáneo.
4. **Inicio de simulación:** Una vez generado todos los archivos necesarios, se ejecuta el modelo numérico CROCO para la región de Magallanes. El tiempo de simular 3 días de pronóstico con almacenamiento de variable a una frecuencia horaria es de aproximadamente 4 horas con 50 minutos.
5. **Almacenamiento y visualización de resultados:** Las salidas del modelo generadas diariamente, incluidos los archivos de condiciones de borde pesan aproximadamente 8 GB comprimidos. Estos datos se respaldan diariamente a las 21:30 UTC en el storage del proyecto (Tabla 13, Anexo E).

Para evaluar el desempeño del MOSA-MAG, se utilizaron los datos de temperatura superficial del radiómetro VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*). Al igual que el dominio de Magallanes, utilizamos el producto de promedios mensuales, los cuales fueron comparados con promedios mensuales del modelo entre enero de 2022 y junio de 2023 (<https://oceansci.gsfc.nasa.gov/directaccess/VIIRS-SNPP/>). También usamos datos diarios del producto de TSM satelital AVHRR para evaluar la evolución diaria del

campo de TSM y poder mostrar los resultados del modelo en el mismo periodo de simulación (enero 2022 y julio 2023).

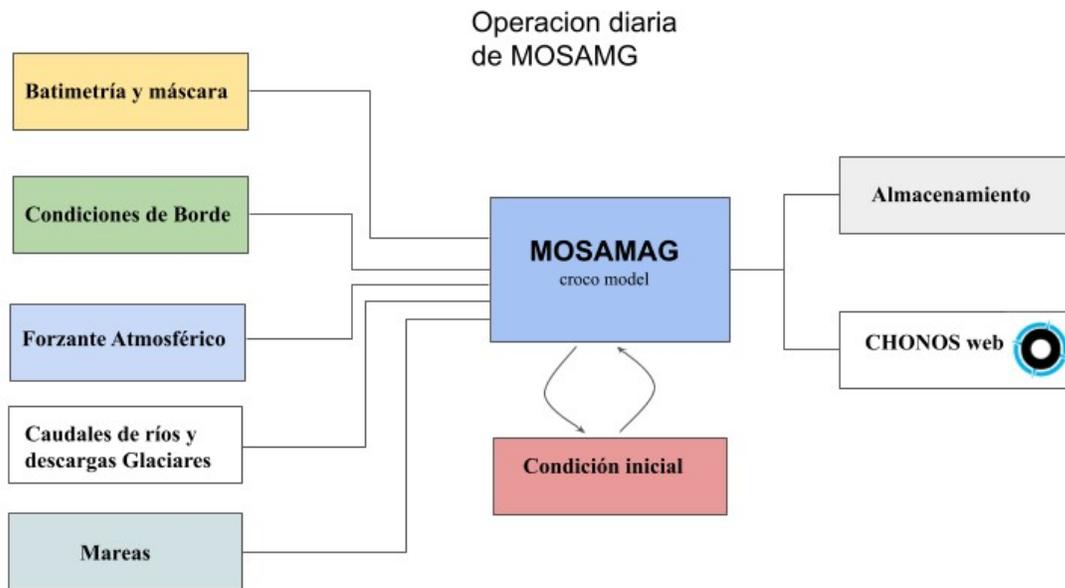


Figura 8: Diagrama conceptual de la operación diaria y los componentes de MOSA-MAG.

Finalmente, utilizamos perfiles de CTD realizados por el programa de Marea Roja del IFOP en la región de Magallanes. Estos perfiles suelen ser semiperiódicos, con una frecuencia casi mensual que abarcan gran parte de la región y logran capturar la variabilidad estacional de la temperatura y salinidad. Sin embargo, producto de la naturaleza del programa de Marea Roja, estos perfiles suelen ser en zonas sumamente costeras y de baja profundidad, donde se captan gran parte de la condición local la zona y no necesariamente refleja la condición promedio del lugar. De acuerdo a los datos disponibles, se seleccionaron perfiles en 3 zonas: La zona norte que corresponde a la Isla Pizzi y al Estero Peer; La zona centro que cubre Seno Ottway y Estrecho de Magallanes; La zona sur que cubre el Canal Beagle (Fig. 9).

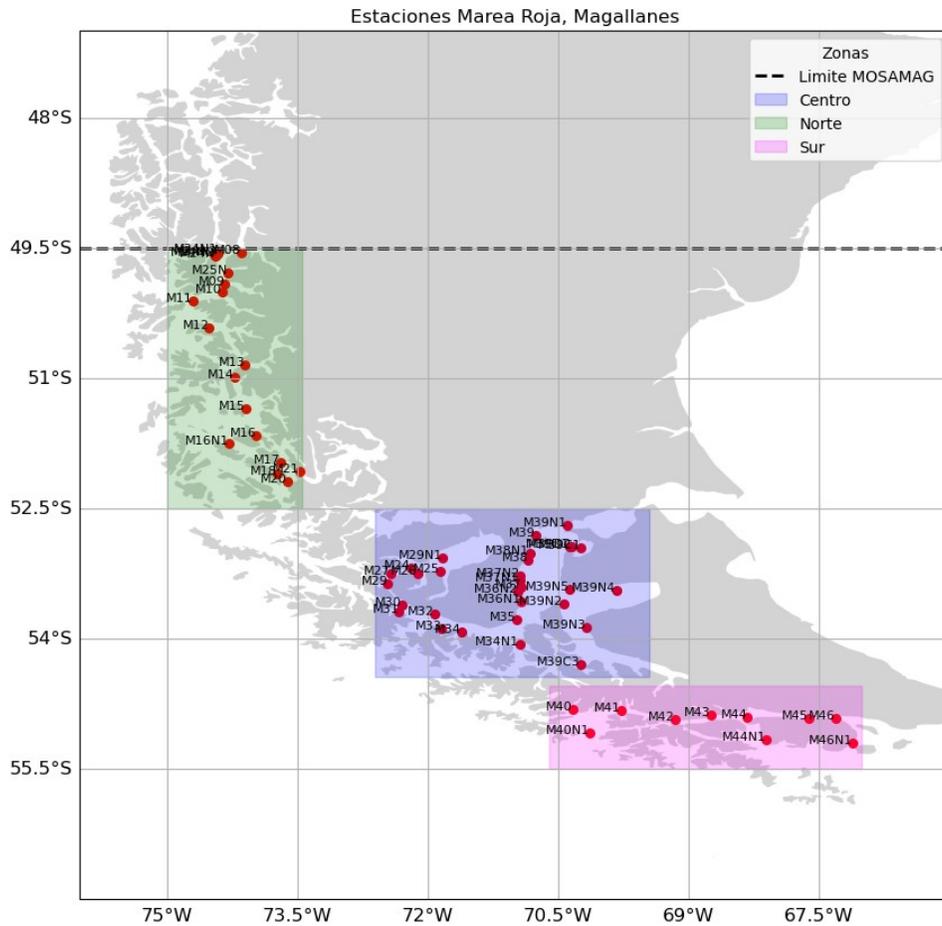


Figura 9: Mapa con las zonas que agrupan los perfiles de CTD del programa de Marea Roja de IFOP utilizado para evaluar la columna de agua de MOSA-MAG.

3.5 Metodología objetivo específico 5: Diseñar e implementar un modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén.

La modelación de oleaje al interior de las regiones de Los Lagos y Aysén fue realizada con el modelo de oleaje WaveWatch III (WW3, Tolman 2009) v6.07.1. WW3 es un modelo de oleaje de tercera generación desarrollado en la NOAA/NCEP. WW3 difiere de sus predecesores en muchos puntos importantes, como en las ecuaciones gobernantes, la estructura del modelo, los métodos numéricos y las parametrizaciones físicas. WW3 resuelve la ecuación de equilibrio de densidad de acción espectral de fase aleatoria para los espectros de número de onda y dirección. La suposición implícita de esta ecuación es que las propiedades del medio (profundidad del agua y corriente) así como el propio campo de ondas varían en escalas de tiempo y espacio que son mucho mayores que las escalas de variación de una sola onda.

El sistema de pronóstico de oleaje operacional (MOSA-WW3) se compone de dos dominios anidados enfocados en el Océano Pacífico y en las Regiones de Los Lagos y de Aysén. El primer modelo, de larga escala (dominio padre), se realiza bajo el propósito de forzar con energía proveniente del océano el borde oeste del modelo regional. El modelo de mayor resolución (dominio hijo), considera la propagación de dicha energía, la generación de oleaje de carácter local y la interacción con la zona costera de los alrededores de la Isla Grande de Chiloé. Ambos modelos fueron configurados para ser ejecutados diariamente en el servidor del proyecto.

El oleaje que interactúa en la zona de interés se puede considerar de generación distante (oleaje tipo “sea”) o de generación local (oleaje tipo “swell”). La representación del sistema considera el oleaje distante iniciado en el hemisferio norte y en el hemisferio sur del Océano Pacífico que viaja hacia el sur de Chile, además del oleaje generado frente a sus costas y dentro del territorio marítimo. Asimismo, se simula la propagación del fenómeno considerando los procesos de disipación de energía producidos al interactuar con la geografía de la zona. En este sentido, se reconstruye el oleaje de la zona como ondas irregulares teniendo en cuenta las distintas frecuencias de las ondas de oleaje generadas en diferentes lugares.

El comportamiento del oleaje será distinto dependiendo de la zona donde se encuentre. Las perturbaciones del fondo marino afectan las ondas orbitales que se producen cuando la columna de agua siente la energía de la ola. Comúnmente, se usa el concepto de profundidad relativa para clasificar las zonas en aguas profundas, intermedias y someras. La profundidad relativa es la relación entre la profundidad (d) y la longitud de onda (L), también conocida como celeridad de la ola (d/L). Si este valor es mayor a 0.5 se considera aguas profundas, si es menor a $1/20$ se considera aguas someras, de estar entre estos dos límites, se considera aguas intermedias. Cuando es mayor a la mitad de la longitud de la onda la perturbación de la profundidad en la columna de agua no afecta al oleaje. Sin embargo, en aguas someras la propagación de la onda está controlada por el fondo marino (Tabla 5).

Tabla 5: Clasificación de oleaje de acuerdo a su profundidad.

Clasificación	d/L	Celeridad de Fase
Aguas profundas	$1/2$ a ∞	Influenciada solo por período
Aguas intermedias	$1/20$ a $1/2$	Influenciada por el período y la profundidad
Aguas someras	0 a $1/10$	Influenciada solo por profundidad

El oleaje se puede caracterizar mediante parámetros de resumen espectrales. Estos parámetros son indicadores del comportamiento del oleaje y son derivados a partir de la energía espectral bidimensional. Entre ellos destacan la altura significativa de oleaje (H_s), periodo medio (T_m), periodo peak (T_p), dirección media (D_m) y dirección peak (D_p). Cabe destacar, que la aproximación realizada para obtener los parámetros de resumen en ocasiones no traduce de manera robusta las características de las componentes de oleaje que se desarrollan en cierto lugar.

Esta primera versión de modelo de oleaje operacional, consideramos un dominio estructurado padre que cubre la cuenca del Océano Pacífico con una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, en el cual se genera el oleaje oceánico (tipo “sea”) para alimentar a un dominio anidado para las regiones de Los Lagos y Aysén, definido por una grilla triangular de resolución variable (Fig. 10). El dominio hijo, centrado en torno a la Isla Grande de Chiloé se extiende desde 72.3° O a 75.9° O y desde 40.9° S a 46.9° S y utiliza datos batimétricos del producto global GEBCO. La grilla no-estructurada del dominio hijo se basa en triángulos con 17414 nodos y 26625 elementos, cuya resolución puede alcanzar los 500 m. El dominio padre genera el primer pronóstico de gran escala y desde este se obtienen las condiciones de borde para el dominio hijo a partir de 10 puntos espectrales extraídos cada 0.5° en torno a la longitud 76° O entre 41.5° S y 46° S con una frecuencia de 30 minutos.

Para las condiciones de borde superficiales, este modelo de oleaje utiliza los resultados del modelo operacional MOSA-WRF de 3 km de resolución espacial. Para ello, se consideran las componentes zonales y meridionales de la velocidad del viento a 10 msnm extraídas cada 1 hora. Las variables de posición, tiempo y velocidad de viento son procesadas en Matlab mediante paquetes NetCDF para obtener un formato compatible con el módulo `ww3_prnc`. Cabe destacar, que la variable de tiempo de las salidas MOSA-WRF contienen 6120 minutos de simulación, es decir 4 días y 6 horas de pronóstico, limitando al quinto día de pronóstico de oleaje a sólo contar con 6 horas de viento local.

El modelo operacional de oleaje resuelve espectros direccionales discretizados en 32 bandas de frecuencias comenzando desde 0.0373 Hz con un factor de incremento de 1.1 Hz y 24 direcciones posibles con un factor de incremento de 15° . En modelo utiliza un paso de tiempo de 200 s para el dominio global y 100 s para la propagación espacial, 50 s para la propagación infra-espectral y 10 s para la integración de términos fuentes. Las parametrizaciones físicas incluidas para representar los términos fuentes y sumideros de la ecuación de gobierno del modelo son resumidas en la Tabla 6:

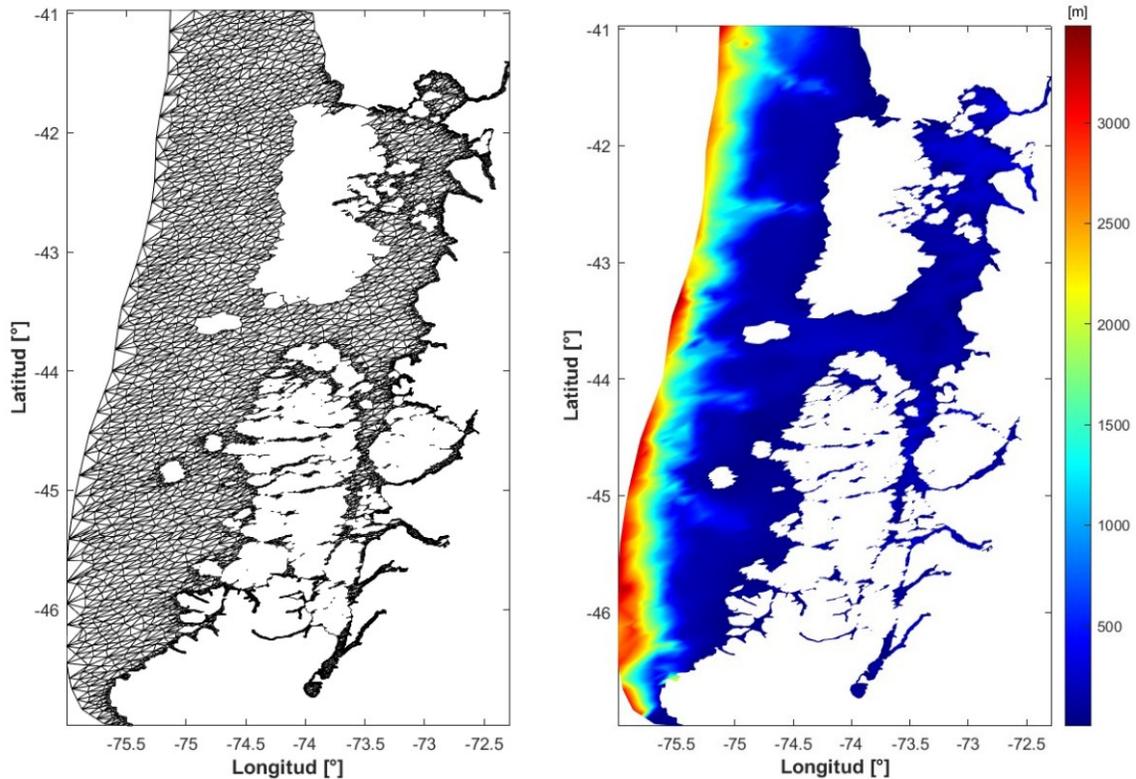


Figura 10: Dominio de las regiones de Los Lagos y de Aysén del modelo operacional de oleaje MOSA-WW3. (**panel izquierdo**) Grilla no-estructurada, (**panel derecho**) batimetría.

Tabla 6: Esquemas y parametrizaciones físicas utilizadas en el modelo operacional MOSA-WW3.

Nombre esquema	Descripción esquema
PR3	Técnica de Alivio del efecto Garden Sprinkler (GSE) mediante la promediación de Tolman.
UQ	Esquema de propagación de tercer orden
FLX2	El cálculo de flujos viene asociado en los términos fuentes de Tolman y Chalikov.
ST6	Nueva física en términos de crecimiento y disipación no lineal de la energía de oleaje.
NL1	Método de aproximación por interacción discreta (DIA, en inglés) del oleaje.
BT1	Formulación de JONSWAP para la fricción del fondo.
DB1 y MLIM	Rompimiento inducido por el fondo.
TR1	Se consideran las interacciones entre triadas de oleaje.
BS0	Se desprecia la dispersión inducida por el fondo.
IC0	Se desprecia la interacción con icebergs.

REF1

Parámetro de reflexión del oleaje debido a la costa

El pronóstico operacional de oleaje regional se lleva a cabo diariamente una vez finalizada la simulación oceánica aproximadamente a las 12:15 PM (UTC). Para esto, se ejecuta el módulo *ww3_shel* empleando 12 núcleos de cálculo y finaliza una vez transcurrido entre 830 s y 1300 s de cómputo, es decir a los 20 minutos aproximadamente. Por cada día de simulación, se genera un archivo *restart* de 52 MB con las condiciones iniciales para ser utilizados en el pronóstico del día siguiente, un archivo con campos de parámetros de resumen cada 1 hora de 4.7 MB, y archivos de espectros de frecuencia cada 30 minutos de 80 KB para los puntos donde se tiene información de boyas. Los archivos de salida son almacenados en carpetas nombradas con el año, mes y día de pronóstico.

La ejecución del modelo de oleaje ha quedado operativa desde el 1 de Abril del 2023, pero sin considerar viento local, solamente considerando la propagación de energía proveniente del Océano Pacífico. Durante el mes de abril, el modelo no se ejecutó los días 7, 8, 12 y 26. La inclusión del viento regional proveniente de MOSA-WRF fue implementada el 26 de mayo del 2023. No obstante, se simulan los meses de abril y mayo con viento regional para usarlos de periodo de control y hacer comparación con mediciones de boyas de oleaje disponibles. Es preciso señalar, que no se cuenta con los días 7 y 8 de abril debido a que el modelo MOSA-WRF no funcionó durante esos días.

El modelo operacional fue evaluado mediante la comparación de los resultados con mediciones de boyas de oleaje, productos de datos satelitales y un modelo operacional de libre acceso. La información de boyas de oleaje es facilitada por IFOP y fue financiada por el proyecto “Centro de datos oceanográficos y ambientales en la zona Sur-Austral de Chile” ubicada en el sector de caleta El Manzano y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) para el sector de las Islas Desertores, ambos en la Región de Los Lagos. Además, se utilizan productos de altura significativa del oleaje provenientes de NOAA-CoastWatch del LSA (*Laboratory for Satellite Altimetry's*). Finalmente, se utiliza como referencia al Sistema Operativo Mundial de Análisis y Pronóstico de los Océanos Meteo-France de la organización Mercator.

La boya Spotter (boya IFOP), se encuentra instalada en caleta El Manzano (42.025° S y 72.642° O) (Fig. 11). La información registrada se almacena cada 30 minutos y comprende valores de altura de ola significativa, periodo peak, periodo medio, dirección peak, dirección media, velocidad del viento, dirección del viento, entre otras. La profundidad utilizada por el modelo en la ubicación de la boya es de 30.18 m. Por otra parte, al sur de las islas Desertores se encuentra instalada una boya WatchKeeper administrada por el SHOA (boya SHOA) ubicada en 42.771° S y 73.244° O a una profundidad de 184 m (Fig. 11) La información es registrada en intervalos horarios y

contiene datos de altura de ola significativa, periodo medio, dirección media, temperatura del agua, presión atmosférica, temperatura del aire, velocidad del viento y dirección del viento. Si bien, la profundidad indicada por la boya es de 184 m, la profundidad utilizada en el modelo es de 111.39 m de acuerdo a la generación de la batimetría. Cabe destacar, que los datos descargados corresponden a series de tiempo transmitidas en tiempo real sin control de calidad.

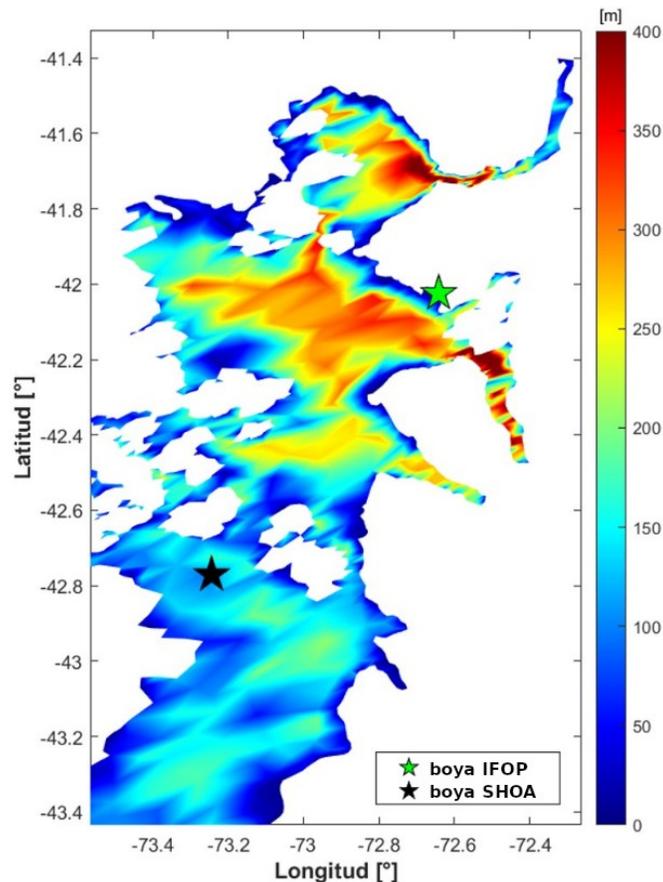


Figura 11: Posiciones de la boya IFOP en Caleta El Manzano y de la boya SHOA en las Islas Desertores sobre la batimetría utilizada en el modelo operacional MOSA-WW3.

Los productos satelitales a lo largo de un recorrido NOAA-CoastWatch se basan en las mediciones realizadas por las campañas Jason2 (j2), Jason3 (j3), Sentinel-3A (3a), Sentinel-3B (3B), Sentinel-6 (6a), CryoSat-2 (c2) y SARAL (sa). Información de altura significativa de ola, velocidad del viento superficial y anomalías de la altura de superficie marina están disponible desde el Septiembre del 2016 hasta el presente para todos los satélites, menos para el j2 que terminó en Septiembre del 2019.

Es preciso señalar, que no fue programada la extracción de datos puntuales por parte del modelo MOSA-WW3 que coincidan con la obtención de datos de los satélites debido a

la gran cantidad de posibilidades en el tiempo y en el espacio de estos últimos. Los recorridos de las campañas c2 y sa cubren varios puntos del dominio simulado. Asimismo, se tiene una frecuencia de muestro de hasta 1 s, pero no vuelven a pasar por un punto cercano hasta aproximadamente 35 horas después. De esta forma, disponer de un archivo con información puntual de oleaje para cada tiempo y ubicación de extracción de los satélites conlleva una gran cantidad de archivos, de los cuales un bajo porcentaje de ellos va a coincidir con el recorrido de los satélites. Por lo tanto, se decide interpolar los resultados de campos de parámetros de resumen para obtener alturas de ola en los recorridos satelitales.

Finalmente, el sistema operacional Meteo-France está basado en el modelo de oleaje de tercera generación MFWAM (Meteo France Wave Model). Este modelo tiene $1/12^\circ$ de resolución espacial, utiliza batimetría ETOPO2/NOAA y es forzado cada 3 horas con vientos de pronósticos desde el modelo IFS-ECMWF (*Integrated Forecasting System – European Center for Medium Range Weather Forecasts*). Su producto está disponible en intervalos de 3 horas y cuenta con campos de parámetros de ola espectrales, destacando la altura de ola significativa, periodo medio, periodo peak, dirección media, dirección peak, entre otras variables. Diariamente se proporcionan pronósticos de oleaje de 10 días y se almacena la información después de realizar técnicas de asimilación de datos mediante información satelital. En este sentido, el modelo MOSA-WW3 es comparado con los datos de MFWAM re-analizados para los meses de abril y mayo, además de datos de pronóstico para los días 7, 8, 9 y 10 de junio.

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA

Estas reuniones entre el ejecutor del proyecto (División Investigación en Acuicultura, IFOP) y la contra-parte técnica (Departamento de Acuicultura, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura) tienen como propósito reforzar y conducir el desarrollo del proyecto hacia los temas más relevantes que dieron origen a este estudio, es decir, metodologías y grado de avance de las principales actividades asociadas al proyecto. Por otra parte, para un mejor desarrollo de las actividades comprometidas y para lograr una mayor cobertura participativa, se utilizaron distintos medios como correo electrónico, telefonía y videoconferencias. La aplicación de esta modalidad de trabajo facilita la posterior colaboración ante requerimientos específicos que se generen en el desarrollo del proyecto.

Reunión coordinación 1

Fecha: 14 Julio, 2022.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 2

Fecha: 11 Octubre, 2022.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 3

Fecha: 22 Diciembre, 2022.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 4

Fecha: 30 Diciembre, 2022.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)
3. Pablo Reche (IFOP)
4. Gabriel Soto (IFOP)

Reunión coordinación 5

Fecha: 12 Abril, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 6

Fecha: 17 Mayo, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 7

Fecha: 17 Julio, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 8

Fecha: 28 Julio, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)
3. Pablo Reche (IFOP)
4. Gabriel Soto (IFOP)

4.2 Reuniones técnico-académicas

El proyecto contempla una serie de asesorías científicas, talleres cerrados y visitas entre IFOP, y diferentes investigadores o asesores tales como el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción y Meteodata. Estas reuniones son de carácter científico y están enfocadas a resolver problemas técnicos de la modelación y la operación del sistema.

Reunión 1

Se realizó una reunión técnica con el asesor Andrés Arriagada a través de videoconferencia el día 16 de Marzo del 2022. En esta reunión se discutieron configuraciones técnicas del servidor MOSA.

Fecha: 16 Marzo, 2022.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Arriagada (Meteodata)

Reunión 2

Se realizó una reunión técnica con el investigador Facundo Barrera a través de videoconferencia el día 11 de Abril del 2022. En esta reunión se discutieron posibilidades de cooperaciones a futuro en temas relacionados con biogeoquímica en el Seno del Reloncaví.

Fecha: 11 Abril, 2022.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Jurleys Vellojin (IFOP)
3. Elias Pinilla (IFOP)
4. Valentina Besoain (IFOP)
5. Gabriel Soto (IFOP)
6. Facundo Barrera (Center for Climate and Resilience Research (CR)2)

Reunión 3

Se realizó una reunión técnica con el asesor Andrés Arriagada y Diego Gutiérrez a través de videoconferencia el día 13 de Abril del 2022. En esta reunión se discutieron configuraciones técnicas del modelo de oleaje WaveWatch 3.

Fecha: 13 Abril, 2022.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Arriagada (Meteodata)
3. Diego Gutiérrez

Reunión 4

Se realizó una reunión técnica con el asesor Dr. Andrés Sepúlveda y colaboradores internacionales de manera presencial en IFOP sede castro (CTPA-Putemún) el día 22 de Abril del 2022. En esta reunión se discutieron aspectos técnicos y teóricos de modelación numérica y sistemas acoplados océano-atmósfera-oleaje.

Fecha: 22 Abril, 2022.

Lugar: CTPA-Putemún

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)

3. Elias Pinilla (IFOP)
4. Vera Oerder (PUCV-IMO)
5. Swen Jullien (IFREMER - Francia)

Reunión 5

Se realizó una reunión técnica con colaboradora Dra. Odette Vergara y estudiante Valentina Mundaca a través de Google-Meet 11 de Noviembre del 2022. En esta reunión se discutieron aspectos técnicos y teóricos de la modelación biogeoquímica para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Fecha: 11 Noviembre, 2022.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Valentina Besoain (IFOP)
3. Jurleys Vellojin (IFOP)
4. Odette Vergara (Universidad del Biobio)
5. Valentina Mundaca (Universidad de Concepción)

Reunión 6

Se realizó una reunión técnica con investigador del departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción Dr. Martin Jacques a través de Google-Meet el día 15 de Diciembre del 2022. En esta reunión, se conversó sobre posibles estrategias de colaboración para mediciones atmosféricas en el contexto del cambio climático.

Fecha: 11 Noviembre, 2022.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Martin Jacques (Universidad de Concepción)

Reunión 7

Se realizó una reunión técnica presencial con investigador Dr. Lars Asplin del Institute of Marine Research (IMR) de Noruega en las instalaciones de IFOP-Putemún el día 28 de Noviembre. En esta reunión, se intercambiaron visiones y metodologías acerca de temáticas en común entre Chile y Noruega, en especial en materia de gestión de la industria por problemáticas bio-sanitarias relacionadas con la dispersión de patógenos en la salmonicultura.

Fecha: 28 Noviembre, 2023.

Lugar: IFOP-Putemún

1. Osvaldo Artal (IFOP)

2. Pablo Reche (IFOP)
3. Gabriel Soto (IFOP)
4. Pedro Valdebenito (IFOP)
5. Javiera San Martín (IFOP)
6. Luis Avello (IFOP)
7. Lars Asplin (IMR-Noruega)

Reunión 8

Se realizó una reunión técnica con colaboradora Dra. Odette Vergara a través de Google-Meet el día 19 de Diciembre del 2022. En esta reunión, continuamos con la discusión de aspectos técnicos y teóricos de la modelación biogeoquímica para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Fecha: 19 Diciembre, 2022.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Valentina Besoain (IFOP)
3. Jurleys Vellojin (IFOP)
4. Odette Vergara (Universidad del Biobío)

Reunión 9

Se realizó una reunión técnica presencial con asesor Dr. Mark Falvey en las instalaciones de Meteodata en Santiago los días 19 y 20 de Enero. En estas reuniones, se analizaron los diferentes aspectos técnicos actuales y en el corto plazo del sistema de observación CHONOS. Dentro de las temas abordados, y en lo que respecta a este proyecto se analizaron las herramientas de MOSA y Parti-MOSA.

Fecha: 19 y 20 Enero, 2023.

Lugar: Oficina de Meteodata. (Domeyko 1864, Santiago, Región Metropolitana)

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Mark Falvey (Meteodata)

Reunión 10

Se realizó una reunión con investigador Dr. Ricardo Giesecke del Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas de la Universidad Austral de Chile a través de Google-Meet el día 24 de Marzo. En esta reunión, se analizaron las diferentes líneas de colaboración de estudios oceanográficos en la Región de Magallanes

Fecha: 24 Marzo, 2023.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Ricardo Giesecke (Universidad Austral de Chile)

Reunión 11

Se realizó una reunión técnica presencial con asesor Dr. Andrés Sepúlveda en las instalaciones del departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción el día 30 de Marzo. En esta reunión, se analizó el estado de avance de modelación de oleaje para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Fecha: 30 Marzo, 2023.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Sepúlveda (DGEO)

Reunión 12

Se realizó una reunión con investigadora Dra. Vera Oerder de la Universidad de Concepción a través de Google-Meet el día 11 de Abril. En esta reunión, se analizaron las diferentes líneas de colaboración con respecto a modelación atmosférica en la Patagonia Chilena.

Fecha: 11 Abril, 2023.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Oliver Venegas (IFOP)
3. Vera Oerder (Universidad de Concepción)

Reunión 13

Se realizó una reunión con investigadora Dra. Andrea Piñones de la Universidad Austral de Chile a través de Google-Meet el día 18 de Abril. En esta reunión, se analizaron las diferentes líneas de colaboración con respecto a modelación biofísica en la región de Magallanes.

Fecha: 18 Abril, 2023.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrea Piñones (Universidad Austral)
3. Valentina Bernald (Universidad Austral)

Reunión 14

Se realizaron una serie de reuniones técnicas y traspaso tecnológico de manera presencial con asesor Dr. Andrés Sepúlveda en las instalaciones del departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción entre los días 18 y 23 de Junio. En estas reuniones, se analizó el estado de avance de modelación de oleaje para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Fecha: 18-23 Junio, 2023.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Pablo Reche (IFOP)
3. Andrés Sepúlveda (DGEO)

Reunión 15

Se realizó una reunión con investigadora Dra. Vera Oerder de la Universidad de Concepción a través de Google-Meet el día 2 de Agosto. En esta reunión, se analizaron los avances y colaboraciones con respecto a modelación atmosférica en la Patagonia Chilena.

Fecha: 2 Agosto, 2023.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Oliver Venegas (IFOP)
3. Vera Oerder (Universidad de Concepción)

4.3 Talleres de difusión y/o capacitación

El proyecto contempla la realización de talleres de difusión sobre el estado de avance del modelo operacional MOSA, así como también de sus productos asociados. También se incluyen capacitaciones de la plataforma web CHONOS. Estos talleres pueden ser abierto a la comunidad o cerrados a la discusión académica exclusivamente con diversos especialistas en modelación y oceanografía en Chile.

Taller difusión 1

El miércoles 22 de marzo del 2023 se realizó un taller de difusión con los principales resultados de los proyectos de oceanografía de la División de Acuicultura. El taller se efectuó de manera telemática a través de la plataforma Google-Meet con el nombre "Oceanografía y Modelación Numérica en Fiordos y Canales de la Patagonia", convenio de desempeño 2021-2022. En el taller se presentaron las perspectivas de los modelos sinópticos en la zona Sur-Austral de Chile.

Fecha: 22 de Marzo, 2023.

Lugar: Google-Meet

Expositores:

1. Leonardo Guzman (IFOP)
2. Javier Cortes (IFOP)
3. Cristian Ruiz (IFOP)
4. Osvaldo Artal (IFOP)
5. Camila Soto (IFOP)
6. Gabriel Soto (IFOP)

Taller difusión 2

El jueves 14 de septiembre del 2023 se realizará el taller de difusión con los resultados finales de los proyectos de oceanografía de la División de Acuicultura. El taller se realizará de manera telemática a través de la plataforma Google-Meet con el nombre “Oceanografía y Modelación Numérica en Fiordos y Canales de la Patagonia”, convenio de desempeño 2022-2023.

4.4 Presentaciones en congresos/seminarios/talleres nacionales o internacionales

2022. Jurleys Vellojin. Modelación biogeoquímica en un océano cambiante: avances y desafíos en la Patagonia Norte. *XLI Congreso de Ciencias del Mar*. Concepción. 23 – 27 de Mayo del 2021

2022. Jurleys Vellojin. Seasonal variability of the air-sea CO₂ flux in a sub-Antarctic glacier fjord (Chile, 53°S): Patagonia southernmost fjords as a CO₂ sink region?. *The 5th Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World*. Lima, Perú, 2022.

2022. Osvaldo Artal. FLOW: Un explorador y visualizador de agua dulce en la Patagonia Chilena dentro de CHONOS. *XVI Congreso Nacional Sociedad Chilena de Limnología (SCL)*. Coyhaique. 11 – 14 de octubre 2022.

2022. Osvaldo Artal, Oscar Pizarro, Héctor H. Sepúlveda, Elias Pinilla & Manuel Castillo. Efecto de la variabilidad mareal en la estratificación de la columna de agua en un sistema de constricción. *VI Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima del Pacífico Sur Oriental*. Puerto Montt. 22 – 25 Noviembre 2022.

2022. Oliver Venegas & Osvaldo Artal. Modelo operacional atmosférico para la zona Sur-Austral de Chile. *VI Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima del Pacífico Sur Oriental*. Puerto Montt. 22 – 25 Noviembre 2022.

2022. Camila Soto-Riquelme & Cristian Ruiz. Registro de hielo marino y comparación hidrográfica; Caso de estudio fiordo Navarro Seno Skyring. *VI Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima del Pacífico Sur Oriental*. Puerto Montt. 22 – 25 Noviembre 2022.

2023. Osvaldo Artal. Un modelo Lagrangeano para la gestión costera de la Patagonia Chilena: Desarrollo y Perspectivas. *Ciclo de charlas CONA. Dinámica Océano-Atmósfera (GT-DOCA)*. Online, 17 de Abril del 2023.

2023. Osvaldo Artal. Herramientas Numéricas para la gestión de la costa en la Patagonia Chilena. *Ciclo de charlas Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción*. 22 de Junio del 2023.

2023. Osvaldo Artal. Uso del sistema de información oceanográfica CHONOS. Mar de Chile zona norte y sur. Seminario Internacional: *Desafíos Normativos y Ambientales para la Acuicultura de Zonas Expuestas o de Alta Energía*, Puerto Varas, 4 – 5 de Julio del 2023.

2023. Osvaldo Artal. Sistemas de observación en tiempo real, campañas históricas y desafíos en modelación. Seminario interno CEQUA-IFOP. Punta Arenas, 25 de Julio del 2023.

2023. Cristian Ruiz. Modelación en la zona de Magallanes: Estado actual y próximos desafíos. Seminario interno CEQUA-IFOP. Punta Arenas, 25 de Julio del 2023.

4.5 Compra y mantenimiento de equipo:

En este proyecto se ha buscado contar con alternativas para montar puntos de observación en línea para conocer el grado de error que tiene el modelo operacional MOSA u otros modelos numéricos derivados de este en la zona. A su vez, se busca que el sistema operacional sea estable en el tiempo. En esta búsqueda se han realizado las siguientes actividades al respecto:

1. **Mantención e instalación de estaciones meteorológicas:** Desde la etapa V de este proyecto IFOP ha adquirido estaciones meteorológicas con la capacidad de transmisión de información en tiempo real. A la fecha se cuentan con 14 estaciones meteorológicas, de las cuales 9 estaciones se encuentran transmitiendo totalmente operativas, 2 estaciones están listas para ser instaladas y 2 estaciones se encuentran en bodega con fallas, por lo que deben ser enviadas a servicio técnico, y 1 estación fue dada de baja.
2. **Servidor de almacenamiento:** Durante la etapa anterior de este proyecto se adquirió un servidor de almacenamiento (Anexo E). Durante la ejecución de este proyecto se lograron respaldar todos los años de simulación del modelo operacional MOSA, tanto las salidas del modelo CROCO (antes ROMS) y WRF. Además se adquirieron 6 nuevos discos duros de 8 TB para ser conectados en configuración RAID 1, es decir, como sistema espejo de respaldo.

3. **Ampliación Sistema de Computo:** Debido a la creciente demanda y la evolución natural del sistema integrado de información es necesario aumentar el poder computacional existente para continuar con el desarrollo de modelos operacionales entre la región de Los Lagos y Magallanes. Se adquirió un nuevo servidor servidor Supermicro basado en procesadores AMD de 3ª generación (EPYC). Las principales características de este servidor son las siguientes:

- SuperServer 1024US-TRT 1U, 4x 3.5" Hot-swap Drive Bays, Dual 10GBase-T LAN ports via Intel® X710-AT2, 1000W Redundant Power Supplies Titanium Level (96%+)
- 2x AMD Milan 7543 DP/UP 32C/64T 2.8G 256M 225W SP3
- 16x 16GB DDR4-3200 2Rx8 ECC REG DIMM (256GB)
- 1x AOC-S3008L-L8i Controlador RAID 0, 1, 10
- 2x Intel D3-S4610 480GB SATA 6Gb/s 3D TLC 2.5" 7mm 3DWPD Rev.3
- 1x Intel D3-S4610 3.8T SATA 6Gb/s 3D TLC 2.5" 7mm 3DWPD Rev.3

4. **Continuación Convenio Colaboración FCFM – NLHPC – IFOP.** El objetivo del presente convenio fue establecer una relación de colaboración mutua duradera entre las partes, en el campo de la modelación oceanográfica y atmosférica de alta resolución, basada en la igualdad, en la reciprocidad y el beneficio mutuo. IFOP actualmente utiliza a través del acceso remoto, la capacidad de cómputo del súper-computador administrado por el NLHPC para desarrollo numérico.

4.6 Carta Gantt del proyecto

El proyecto tiene una duración total de 20 meses, comenzando en enero del 2022 y finalizando en agosto del 2023.

Actividades	E22	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E23	F	M	A	M	J	J	A
1. Evaluación MOSA-CROCO v/s observaciones								X	X						X	X	X	X	X	
2. Evaluación MOSA-WRF v/s observaciones								X	X						X	X	X	X	X	
3. Mejoras modelos biogeoquímicos existentes.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
4. Implementación atlas biogeoquímico													X	X	X	X	X	X	X	
5. Evaluación modelo								X	X						X	X	X	X	X	

Magallanes																						
6. Implementación modelo oleaje	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7. Evaluación modelo oleaje								X	X					X	X					X	X	
8. Taller difusión									X													
9. Reuniones de coordinación								X														X
10. Documento de Avance 1									X													
11. Documento de Avance 2																	X					
12. Informe Final																						X

5. RESULTADOS

5.1 Resultados objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

La escasez de información observacional, la baja resolución de los productos satelitales globales sumada a la persistente nubosidad, la geomorfología abrupta y accidentada de la batimetría, entre otras cosas vuelven compleja la tarea de validación de un sistema operacional desarrollado para el sistema de fiordos y canales de la Patagonia Chilena. Para poder abordar este objetivo, se reúne información satelital disponible de manera superficial en los mares interiores del dominio y se complementa con la información observacional de la columna de agua recolectada por el equipo de terreno de IFOP-Putemún. El modelo operacional MOSA-CROCO entrega diariamente un pronóstico a 3 días de las variables de temperatura, salinidad, densidad, corrientes y altura del nivel del mar. Estos resultados se comparan con la información oceanográfica disponible en la región mediante estadísticos que permiten cuantificar el desempeño del modelo. Las variables evaluadas en este informe final corresponden a temperatura y salinidad superficial utilizando información satelital, a la columna de agua utilizando datos de CTD, nivel del mar provenientes de mareógrafos disponibles y finalmente a corrientes oceánicas provenientes de ADCP anclados.

Para el análisis espacio-temporal de la superficie del océano, se utilizan fuentes de información satelital. Estas fuentes continuas de información nos han permitido llevar un seguimiento de la habilidad del modelo a lo largo de su período de desarrollo, logrando monitorear la variabilidad del sistema y como el modelo se esta se ha ido ajustando a esta variabilidad en el tiempo. En el caso de la TSM, esta se ha evaluado y comparado con el producto satelital AVHRR. En informes anteriores, hemos comparado la media espacial diaria de todo el dominio, pero en esta ocasión el análisis separaremos este análisis en la parte oceánica y en el mar interior. Las diferencias nos muestran el grado de ajuste entre el pronóstico operacional y los campos satelitales y nos permiten discriminar entre estas 2 zonas.

Durante el primer año de implementación operacional, el modelo mostró el menor grado de ajuste, apreciándose una diferencia de amplitud entre las señales con un error de más de 1 °C. En aquella etapa, la configuración implementada buscaba mantener un modelo estable priorizando la continuidad del pronóstico por sobre la exactitud de reproducir la variabilidad espacio-temporal de la región. Por esta razón, la estabilidad se alcanzó a partir del segundo año de operación tanto en la parte oceánica como en el Mar interior superando el 98% de los días pronosticados y logrando ajustar la amplitud del modelo a un error menor a 0.5 °C. Si bien se ha logrado mantener una alta relación lineal durante todo el

período (correlación de 0.98) en la parte oceánica, es en la amplitud donde se han notado los cambios más significativos, con un error de 0.46 °C (Fig. 12). La parte oceánica se relaciona similar a los análisis de los informes previos, donde se consideraba todo el dominio en el promedio espacial.

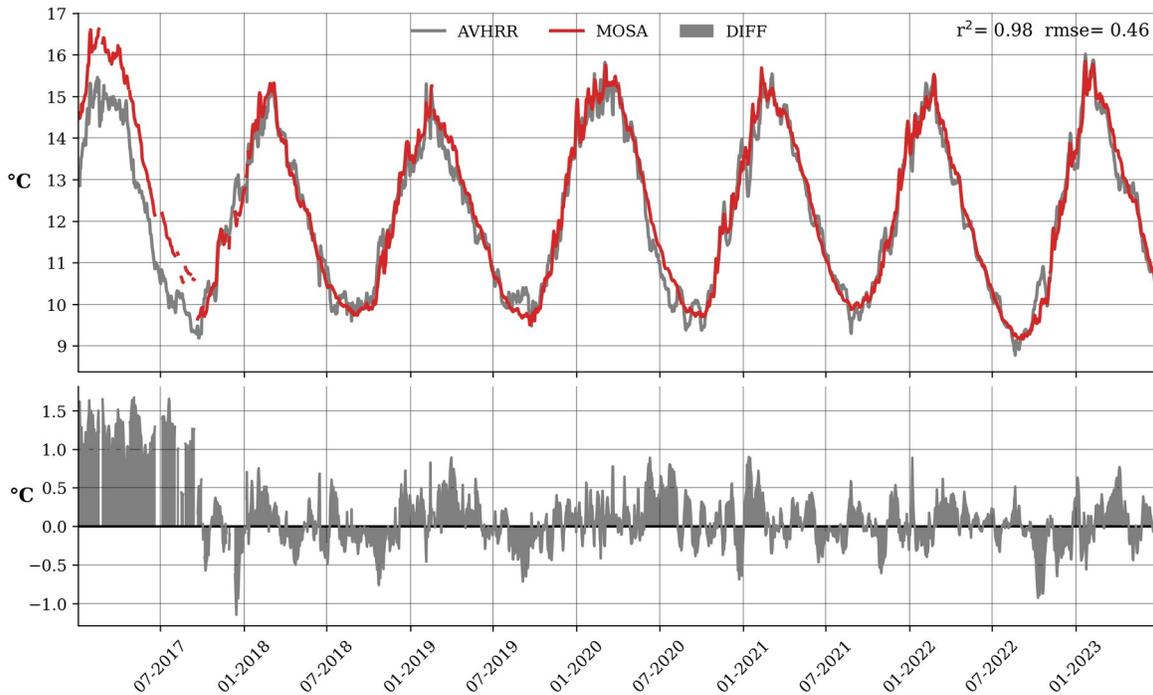


Figura 12: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA-CROCO y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y junio 2023. Los datos corresponden al promedio diario en la zona oceánica del modelo.

Las principales diferencias se logran apreciar a separar el promedio diario de todo el dominio de estudio en un promedio para la parte oceánica y del mar interior. Lo primero que logramos apreciar en el mar interior es que el modelo comenzó a ajustarse mejor durante el año 2020, posiblemente asociado al cambio del forzante atmosférico de MOSA-WRF de 5 km de resolución por el producto MOSA-WRF de 3 km de resolución. También es posible apreciar que los principales desfases se encuentran en el período de transición de invierno-primavera (septiembre-octubre), posiblemente asociado al aporte de agua dulce. El valor de correlación en esta parte es de 0.93, un valor levemente menor a la parte oceánica, pero alta considerando la complejidad de esta zona (Fig. 13). Así mismo, el valor de rmse es de 0.59 °C, valor levemente superior a la parte oceánica, pero bajo considerando los errores en los que fluctúan los modelos globales de baja resolución en esta zona. En resumen, estas medidas reflejan la capacidad del modelo de reproducir de manera óptima la

variabilidad estacional de la temperatura superficial en fase como en amplitud, tanto en la parte oceánica como en el mar interior.

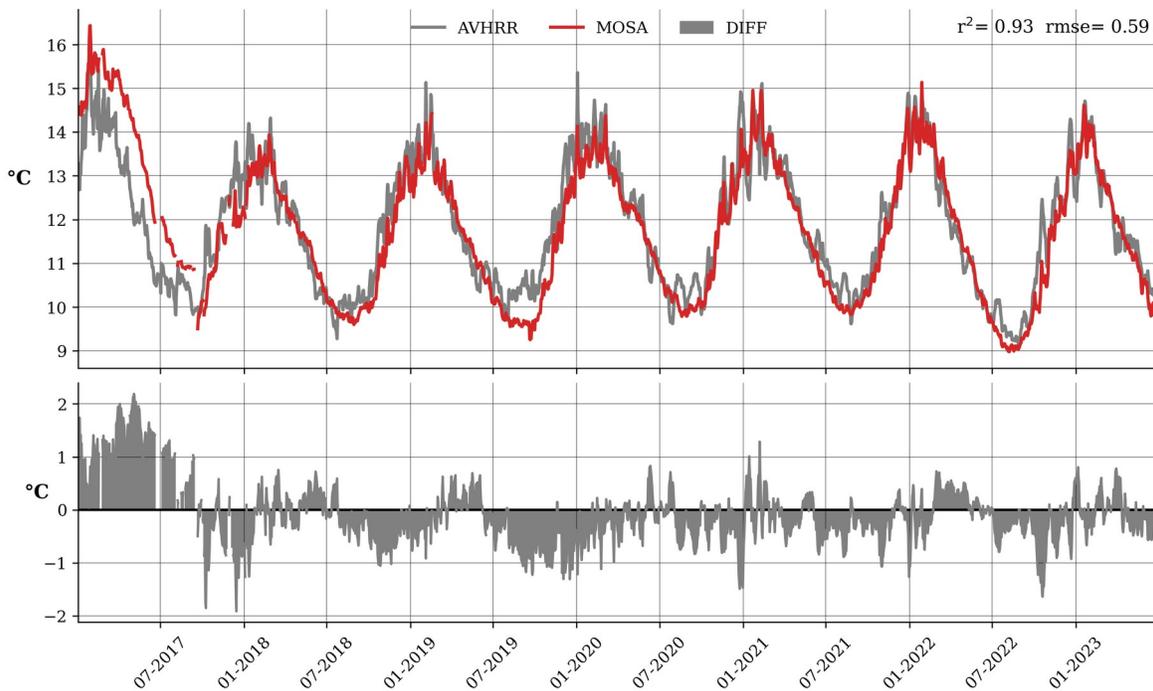


Figura 13: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA-CROCO y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y junio 2023. Los datos corresponden al promedio diario en la zona del mar interior del modelo.

Por otra parte, se construyeron promedios mensuales con los valores diarios de MOSA-CROCO para comparar con datos mensuales de VIIRS y así determinar cambios en la variabilidad espacial y como es el desempeño del modelo a lo largo de las regiones de Los Lagos y de Aysén. El pronóstico de temperatura superficial se mantiene presentando un alto ajuste, con un mejor desempeño en mar abierto donde se han mantenido correlaciones por sobre 0.9 (Fig. 14a). Como es de esperar, la calidad del pronóstico continúa con una menor habilidad hacia el mar interior de Chiloé-Aysén, debido en parte a la complejidad de simular el sistema por las características conocidas de la zona y a la resolución de las imágenes satelitales que no representan adecuadamente la región. Sin embargo, las correlaciones son suficientemente significativas donde actualmente alcanzan valores entre 0.8 y 0.9, logrando reproducir la variabilidad estacional de la temperatura. Por otra parte, el rmse y el sesgo presentan un patrón espacial similar. Por lo general el error se mantiene por debajo de 1 °C en todo el dominio, salvo por algunos máximos locales presentes en el mar interior de Chiloé-Aysén, particularmente en la zona del canal Moraleda, Isla Tranqui y

Seno de Reloncaví, donde se observan valores aproximados de 1.3 °C (Fig. 14b). Mientras que el sesgo alcanza un máximo de ~1 °C en el sector del paso Desertores (Fig. 14c) y valores mínimos casi nulos en mar abierto, que evidencian una mejor calidad del pronóstico en esta parte de la región.

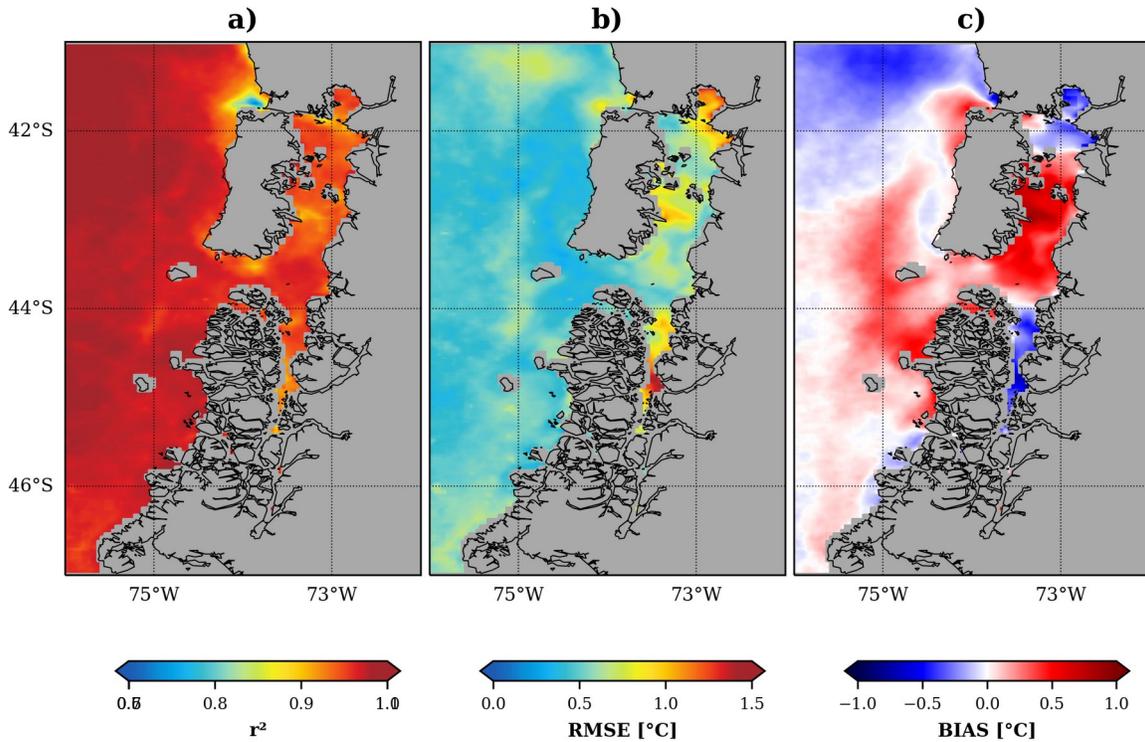


Figura 14: (a) Coeficiente de correlación (r), (b) Raíz del error cuadrático medio (rmse), (c) sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MOSA-CROCO y VIIRS durante enero 2017 y junio 2023.

En el caso de la SSM la información satelital disponible es escasa. Los productos satelitales, por lo general no cuentan con una resolución espacial suficiente para captar la variabilidad en el interior de los canales y fiordos. Por este motivo, utilizaremos 3 productos (ver metodología 3.1): ORAS5, SSS-CNR y ARMOR3D-CLS. Dado que el mayor cambio que se realizó en esta etapa del modelo fue actualizar los flujos de agua dulce de las 35 fuentes puntuales y pasar de una variabilidad mensual a una variabilidad diaria, nos centraremos en las diferencias absolutas entre modelo y los diferentes productos para 1 mes con la configuración antigua y la nueva. Por lo tanto, veremos las diferencias absolutas de los meses de mayo 2022 (flujos de agua dulce con promedios mensuales) y mayo 2023 (flujos de agua con promedios diarios). Para las comparaciones, los datos fueron interpolados desde MOSA-CROCO a la resolución de cada producto. La diferencia corresponde al promedio mensual de MOSA-CROCO menos el promedio mensual de cada producto.

Cabe destacar que existen diferencias entre cada producto de salinidad, por lo que notamos diferencias evidentes en la comparación con cada producto. En todos estos productos, MOSA-CROCO es más salino, especialmente en la zona del mar interior de Chiloé-Aysén. En términos generales, MOSA-CROCO tiene una mejor correlación cuando se compara con el producto ORAS5 y la menor con el producto ARMORD3D-CLS (Fig. 15). Así mismo, el rmse en todos los caso es del orden de los 0.41-0.48 PSU, a excepción del rmse de 0.33 PSU del producto ARMOR3D-CLS de mayo del 2023, en donde se observa un menor error especialmente en la zona oceánica. Análogamente, para mayo 2023 no notamos diferencias significativas con el producto ORAS5, y a su vez, una menor correlación y un rmse más alto para el producto SSS-CNR.

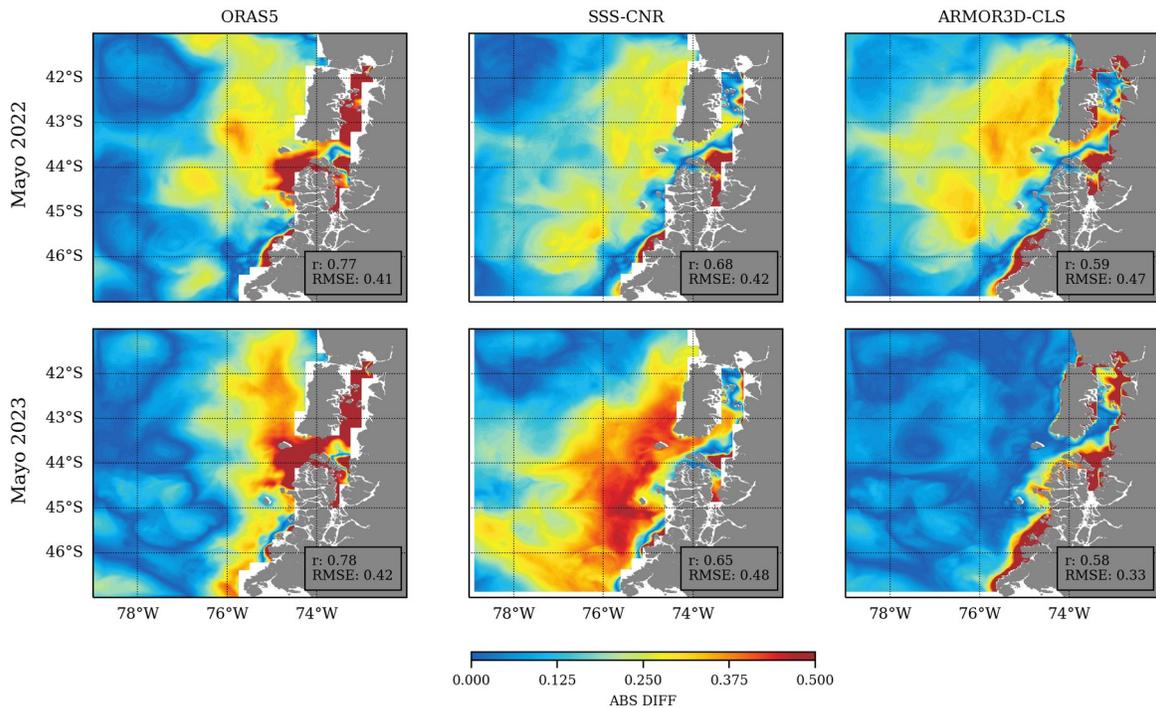


Figura 15: Diferencias de salinidad superficial absoluta entre MOSA y los productos ORAS5, SSS-CNR, y ARMOR3D-CLS para los meses de Mayo 2022 y Mayo 2023.

Para estudiar el comportamiento de MOSA-CROCO en la columna de agua, utilizamos 2 cruceros oceanográficos realizados entre el seno del Reloncaví y la Laguna de San Rafael en los meses de Marzo y Junio del 2023. Para esto se construyó una transecta a lo largo del mar interior y se comparó con la información extraída del modelo para las mismas fechas y posiciones. Para marzo del 2023, podemos notar que MOSA-CROCO sobrestima la temperatura y la salinidad (Fig. 16), tanto espacialmente como en la columna de agua. Las diferencias más significativas se observan en los primeros 20 m de profundidad. Aquí podemos destacar la zona de la Laguna San Rafael y fiordo Puyuhuapi, como las zonas donde el modelo evidencia las mayores diferencias tanto en temperatura

como en salinidad. De todas maneras, MOSA-CROCO puede reproducir un sistema estuarino estratificado, aunque con valores mayores en temperatura y salinidad. Esto se puede notar de mejor manera entre la zona del Reloncaví y las Islas Desertores.

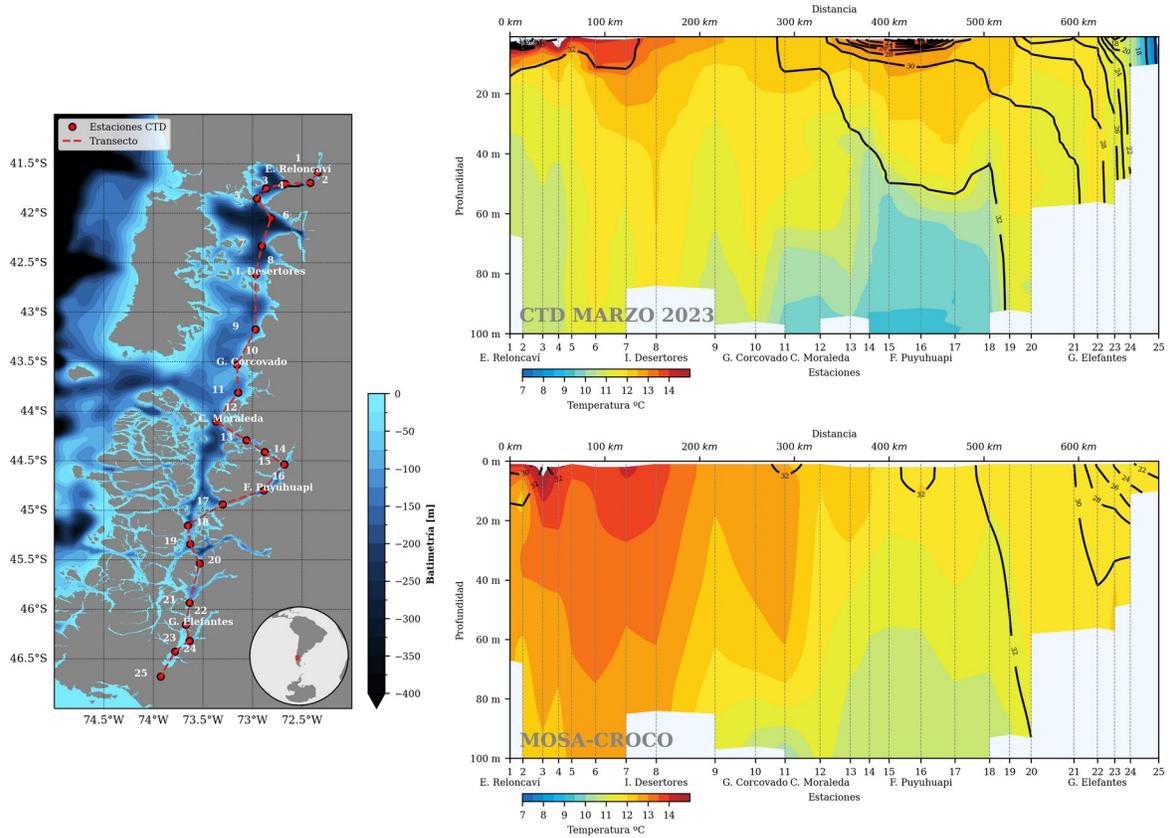


Figura 16: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medición del mapa del panel izquierdo durante marzo 2023. (*panel superior*) Mediciones de CTD (*panel inferior*) simulaciones de MOSA.

Análogamente, repitiendo este mismo análisis pero para la campaña de Junio del 2023, podemos notar que MOSA-CROCO experimentó una mejora significativa tanto en su comportamiento en la vertical como espacial (Fig. 17). En términos generales, podemos observar que las diferencias de temperatura y salinidad en los primeros 20 m se redujeron y ahora los valores son mas comparables entre las observaciones y MOSA-CROCO. Por ejemplo, podemos apreciar en MOSA-CROCO los núcleos de agua fría de Estero Elefantes, Laguna San Rafael, cana Jacaf y fiordo Puyuhuapi. A su vez, podemos apreciar un frente de temperatura en el canal Moraleda tanto en las mediciones como en MOSA-CROCO. La principal diferencia se observa bajo los 20 m en la zona entre fiordo Reloncaví y al norte del paso Desertores, donde MOSA-CROCO esta sobrestimando los valores de temperatura. Las isopícnas también son mejor representadas por MOSA-CROCO en este mes de comparación. La mejora del modelo puede deberse a un cambio en las parametrizaciones físicas que fue introducido en mayo del 2023, un mes antes de estas mediciones.

Específicamente, se activo el esquema de Smagorinsky para la mezcla de momento lateral. Cabe notar, que este esquema estaba activado en la versión de ROMS Agrif, pero que quedó desactivada cuando se migró a CROCO.

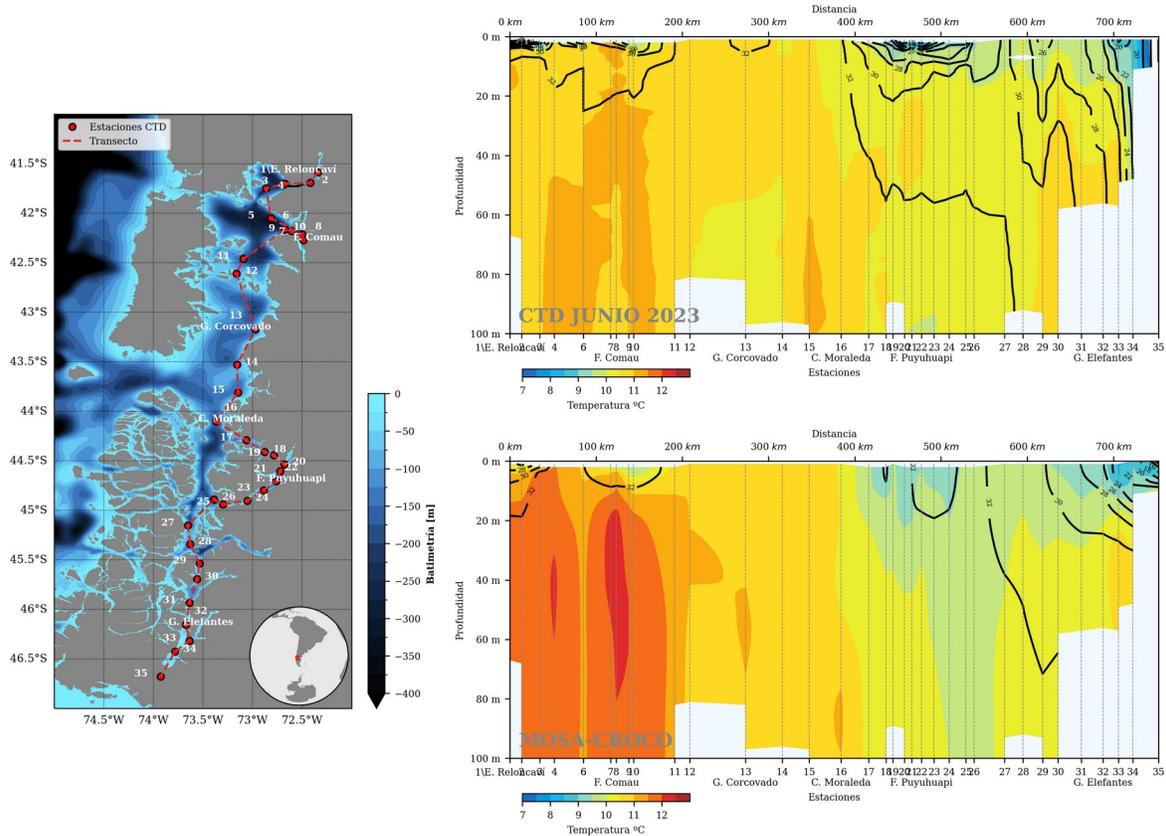


Figura 17: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medición del mapa del panel izquierdo durante Junio 2023. (panel superior) Mediciones de CTD (panel inferior) simulaciones de MOSA.

Para complementar la información antes mencionada, tomamos cada uno de los perfiles de CTD (llevados a la profundidad de MOSA-CROCO) y de MOSA-CROCO para realizar un diagrama T-S para ambos períodos de tiempo. En términos generales, se observa un buen ajuste de MOSA-CROCO en comparación con los datos de CTD, tanto en marzo como en junio del 2023 (Fig. 18). Esto es un buen ejemplo de la capacidad del modelo de reproducir el cambio de estación de otoño a invierno en esta extensa zona de estudio. Este análisis nos muestra que las masas de agua son bien representadas y que MOSA-CROCO es capaz de reproducir las estructuras termohalinas. Sin embargo, las principales diferencias se encuentran en los valores superficiales (entre la superficie y los 20 m de profundidad), donde tal como mencionamos anteriormente, MOSA-CROCO tiene mayores valores de temperatura y salinidad.

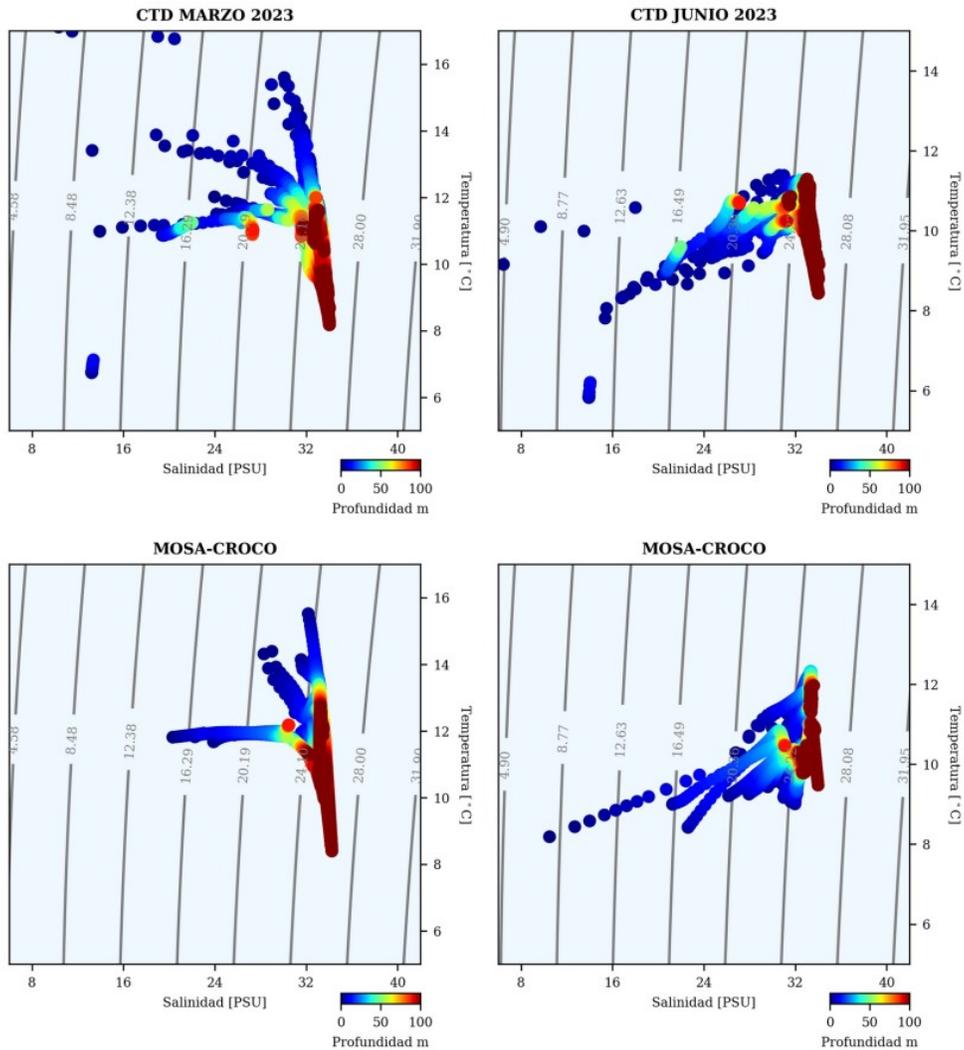


Figura 18: Diagramas T-S durante Marzo y Junio del 2023. (*paneles superiores*) Observaciones de CTD. (*paneles inferiores*) Simulaciones de MOSA.

Para el caso del nivel del mar, evaluamos el comportamiento tanto de la amplitud y fase de la elevación del nivel del mar simulada y observada durante septiembre del 2022. Este período de 30 días fue elegido arbitrariamente, con la única condición que contenga sicigia y cuadratura. Las salidas de MOSA-CROCO corresponden a datos horarios, mientras que los datos de los mareógrafos fueron llevados a promedios horarios. Notamos que la elevación del nivel del mar se mantiene en fase con las observaciones, pero con una sobrestimación de la amplitud. Esta sobrestimación se hace evidente cuando descomponemos la marea en sus principales armónicos de marea, donde se aprecia que M_2 es la principal componente que es sobrestimada en todas las estaciones, salvo en los mareógrafos de Melinka y Ancud (Fig. 19). Con respecto a los valores de correlación, casi todas las estaciones presentan valores superiores a 0,9, a excepción de las estaciones de

Puerto Chacabuco y Puerto Aguirre, ambas ubicadas en la zona sur del dominio en Aysén cuyos valores son de 0.805 y 0.839, respectivamente. La estación de Puerto Montt es la estación con mejor desempeño con un valor de correlación con 0.986. Así mismo, los valores de rmse nos indican nuevamente que las estaciones de Puerto Chacabuco y Puerto Aguirre son las que presentan el mayor error asociado con valores de 0.702 m y 0.556 m, respectivamente. Estos valores deberían mejorar con datos del año 2023 cuando se mejoró la batimetría de la zona sur del dominio (ver informe final anterior).

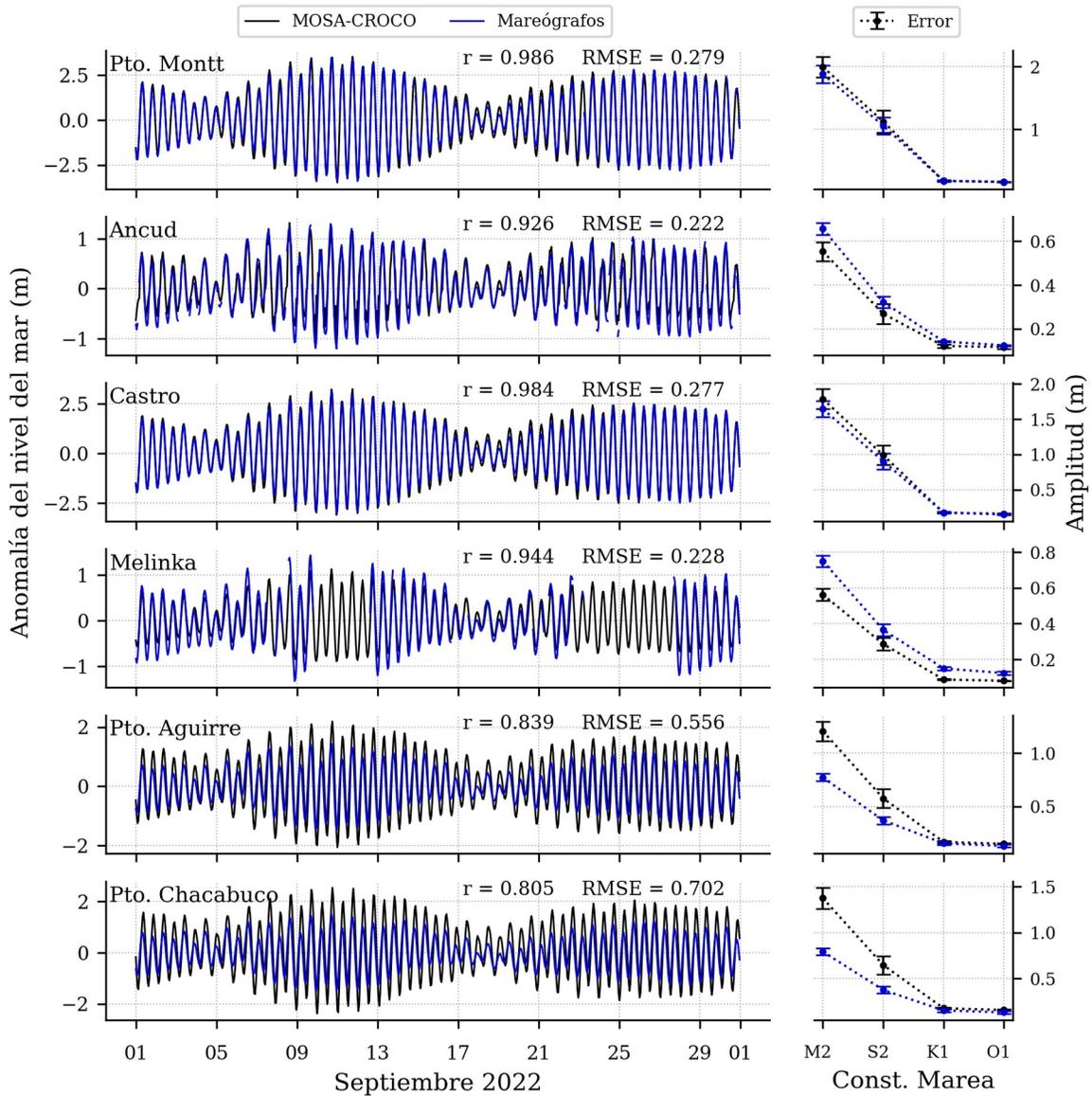


Figura 19: Series de tiempo de elevación del nivel del mar simulados y observados durante Septiembre del 2022 para las estaciones de Puerto Montt, Ancud, Castro, Melinka, Puerto Aguirre y Puerto Chacabuco.

Por otro lado, si analizamos en mayor profundidad los armónicos de marea calculados tanto para las observaciones como el modelo, podemos notar que las principales diferencias se encuentran en la sobrestimación de la amplitud de los armónicos semi-diurnos. Se observa que la estación de Puerto Montt es la que se resuelve de mejor manera, y Puerto Chacabuco es la con menor desempeño. El valor de amplitud de los diferentes armónicos de marea son resumidos en la Tabla 7.

Tabla 7: Resumen de los principales armónicos de marea diurnos y semi-diurnos de la elevación del nivel del mar modelados y observados.

	Puerto Montt		Ancud		Castro		Melinka		Puerto Aguirre		Puerto Chacabuco	
	MOSA	SHOA	MOSA	SHOA	MOSA	SHOA	MOSA	SHOA	MOSA	SHOA	MOSA	SHOA
M₂	1.991	1.876	0.553	0.656	1.785	1.643	0.562	0.75	1.203	0.77	1.374	0.792
S₂	1.121	1.054	0.269	0.321	0.989	0.901	0.286	0.365	0.575	0.369	0.646	0.375
K₁	0.174	0.178	0.122	0.142	0.172	0.175	0.088	0.15	0.167	0.155	0.176	0.153
O₁	0.163	0.159	0.117	0.124	0.158	0.148	0.082	0.124	0.15	0.13	0.158	0.132

Finalmente, notamos que MOSA-CROCO muestra un buen desempeño al comparar las corrientes simuladas con las observaciones de 3 ADCP. En el fiordo Comau, se observa una orientación noroeste-sureste de los ejes de máxima varianza, con una desviación de ~10° entre las corrientes MOSA-CROCO modeladas y las mediciones ADCP (Fig. 20b). En el canal Costa, la corriente tiene una orientación predominante norte-sur y los ejes de máxima varianza prácticamente coinciden entre MOSA-CROCO y las medidas ADCP, con ligeras desviaciones respecto al modelo (Fig. 20c). Los ejes de máxima varianza en los resultados de MOSA-CROCO tienen una orientación noreste-suroeste y muestran una desviación de aproximadamente ~2.5° hacia el este con respecto a las mediciones del ADCP en la Boca del Guafo (Fig. d). Por lo tanto, podemos observar que la velocidad de la corriente está orientada a lo largo del eje canal/fiordo (Fig. 20b-d). En todas las localizaciones hubo una sobre-estimación de la intensidad de corriente modelada a lo largo de los ejes de máxima varianza, siendo la más alta en la Boca del Guafo y la más baja en el Fiordo Comau. Esto es coherente con la ligera sobre-estimación observada en los cálculos de la densidad espectral de potencia (PSD) modelada en los ADCPs y en MOSA-CROCO.

La PSD se utiliza para caracterizar el contenido espectral de las corrientes. Se define como la distribución de potencia por unidad de frecuencia y proporciona información sobre la fuerza relativa y la frecuencia de la energía en la señal (Thomson & Emery, 2014). En el fiordo Comau, se observa un máximo espectral en la banda semi-diurna sin otras frecuencias de marea significativas (Fig. 20e). Los máximos espectrales están bien definidos en las bandas diurna, semi-diurna, 6 h y 4 h en el Canal Costa (Fig. 20f) y en la

Boca del Guafo (Fig. 20g). Notar que los picos en las bandas de 6 h y 4 h corresponden a “overtides” de aguas someras, generados por términos no lineales (fricción/advección).

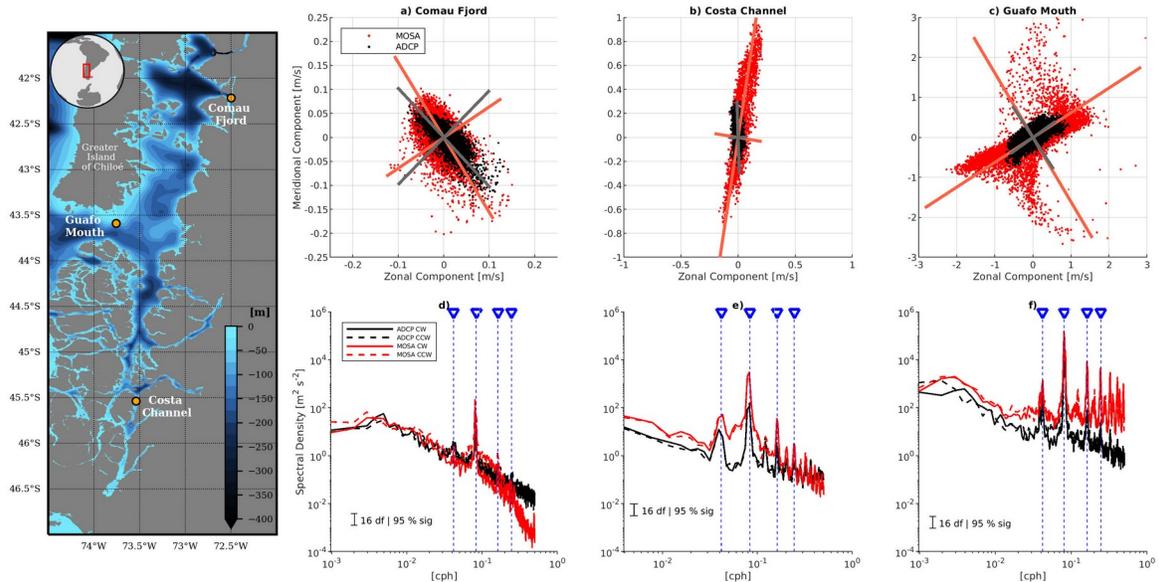


Figura 20: (a) Mapa de la ubicación de los ADCP utilizados. Dispersión y ejes de máxima varianza en las componentes ortogonales de corriente en (b) Fiordo Comau, (c) Canal Costa y (d) Boca del Guafo. Espectros rotatorios de energía a través de componentes cartesianas de corrientes horarias modeladas (negro) y observadas (rojo) en (e) Fiordo Comau, (f) Canal Costa, y (g) Boca del Guafo.

5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones meteorológicas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

MOSA-WRF ha estado en funcionamiento desde el 20 de julio de 2018. La figura 21 muestra su rendimiento durante el período de ejecución de este informe, que abarca desde el 1 de enero de 2022 hasta el 19 de julio de 2023 (Para ver el rendimiento de MOSA-WRF en períodos anteriores, consulte los informes finales anteriores). En la figura, los pronósticos exitosos se muestran en color azul, mientras que los espacios en blanco indican que el sistema experimentó alguna interrupción. El color gris representa las fechas que están fuera del período de evaluación de MOSA-WRF. Se puede observar que el sistema ha mantenido una estabilidad a lo largo del tiempo, con una efectividad del 99.82%. Solo se registró un pronóstico fallido, lo que demuestra que MOSA-WRF ha logrado superar cada vez más los desafíos asociados con los pronósticos fallidos, brindando así una mayor solidez y confianza al sistema.

El desempe1o de los vientos del modelo operacional MOSA-WRF fue evaluado con datos de 7 estaciones meteorol3gicas, implementadas en el marco de este proyecto, ubicadas en Cucao, Melinka, Apiao, Isla Tranqui, Marimeli, Fiordo Comau y Faro Corona.

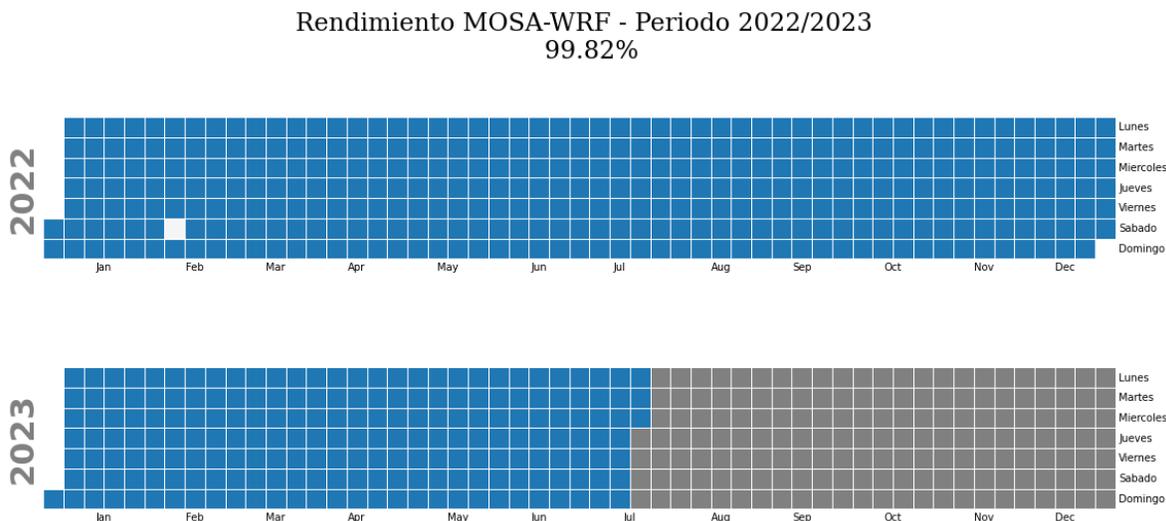


Figura 21: Rendimiento del sistema operacional MOSA-WRF durante el período comprendido entre el 1 de enero del 2022 y el 19 de Julio del 2023.

En la estación de Apiao, MOSA-WRF muestra un buen ajuste en la tendencia general de los vientos, preferentemente en la dirección norte-sur, tanto para los promedios horarios como para los promedios diarios del viento. Además, el modelo logra capturar las mayores intensidades de viento que provienen del norte, las que alcanzan magnitudes mayores a 20 ms^{-1} y luego se desvían hacia el oeste (Fig. 22). En cuanto a los promedios, se observa un ajuste cercano entre los valores predichos y los observados, especialmente en la componente meridional. Los sesgos (diferencias promedio) son pequeños, con valores de 0.2 ms^{-1} y 0.17 ms^{-1} para los datos horarios y diarios, respectivamente. En términos de amplitud, ambas componentes están cerca del valor 1, aunque la componente zonal U es ligeramente subestimada por el modelo y la componente meridional V es ligeramente sobrestimada.

Los resultados del modelo MOSA-WRF también están en fase con las observaciones, mostrando correlaciones significativas tanto en los promedios horarios y diarios de las componentes U y V. El mejor ajuste se encuentra en la componente V, con correlaciones de 0.91 y 0.97 para los datos horarios y diarios, respectivamente. En general, el modelo muestra una mayor habilidad para reproducir la variabilidad de la componente V, considerando los valores de RMSE-SS en relación con la desviación estándar de los datos observados. Los valores de RMSE-SS son de 0.53 y 0.69 para los datos horarios y diarios, respectivamente. En tanto, para la componente U los valores de RMSE-SS son menores

(0.16 y 0.29 para las series horarias y diarias respectivamente). Esto indica que el modelo tiene un desempeño aceptable en la predicción de la variabilidad de los vientos en esta ubicación.

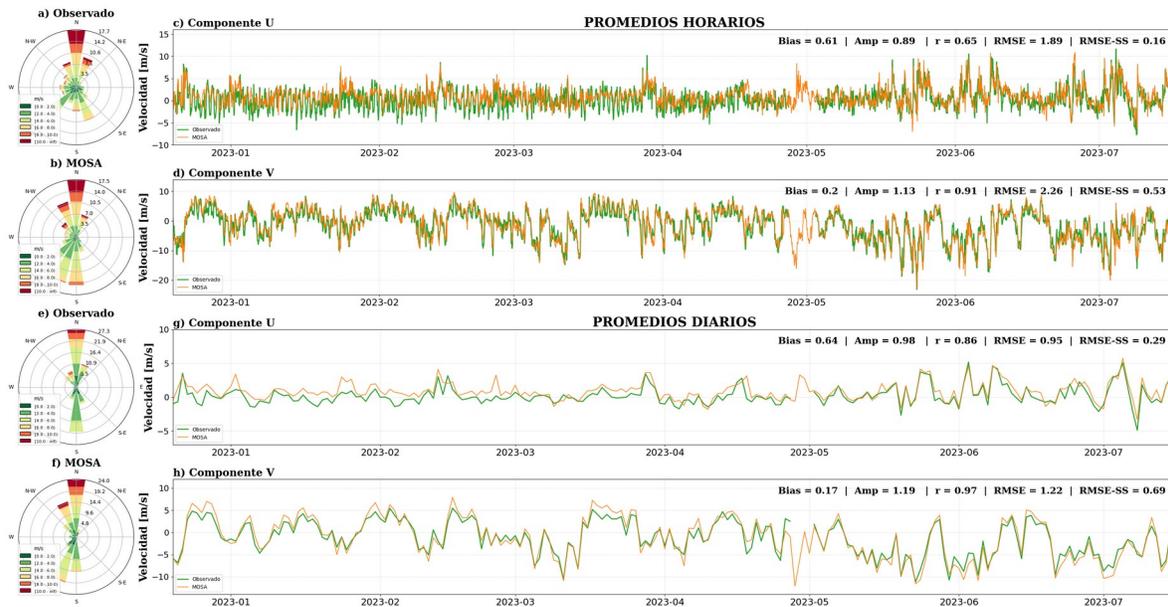


Figura 22: Descripción del viento en la estación de Apiao. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.

En el caso de la estación meteorológica de Comau, se confirma que existe un eje de máxima variabilidad en dirección norte-sur, con las mayores intensidades de viento provenientes del nor-noroste en las observaciones y del norte en el modelo. Tanto el modelo como las observaciones muestran vientos que superan los 10 ms^{-1} , principalmente desde el norte (Fig. 23). A su vez, se observa una alta ocurrencia e intensidad de vientos desde el suroeste en las observaciones, que el modelo representa de manera ligeramente inferior en términos de ocurrencia y magnitud.

En cuanto a los sesgos, se mantiene un comportamiento similar. Los promedios modelados fueron subestimados tanto en los promedios horarios y diarios, con un mejor ajuste en la componente U, con valores de -1.02 ms^{-1} y -1.1 ms^{-1} para las series horarias y diarias, respectivamente. La amplitud del modelo se ajustó de manera considerable a las observaciones con pequeñas sobre-estimaciones en todos los casos. En este estadístico, la componente V fue mejor representada, con valores de 1.03 y 1.11 para los valores horarios y diarios, respectivamente. Además, la componente V mostró mejores resultados en términos de correlaciones, aumentando el valor de 0.68 de los promedios horarios a 0.81 en los promedios diarios. Esto indica que el modelo tiene una mejor habilidad para capturar la

variabilidad de la componente V en comparación con la componente U. Esto se refleja también en los valores de RMSE-SS, donde se obtuvieron valores inferiores de -0.73 y -1.76 para los valores horarios y diarios de la componente U, y valores de 0.06 y 0.1 para la componente V.



Figura 23: Descripción del viento en la estación de Comau. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.

Corona es la serie con menos tiempo de funcionamiento en comparación con las otras estaciones de REDMET, la cual contiene solo 3 meses de medición. Para este corto período, las observaciones muestran intensidades más altas provenientes del norte, con valores cercanos a los 20 ms^{-1} , los cuales son reproducidos por el modelo, aunque en ocasiones ligeramente sobrestimados (Fig. 24). Por otro lado, también se observa una componente zonal fuerte proveniente del oeste, con valores sobre los 10 ms^{-1} . En este caso, los pulsos son reproducidos por el modelo, aunque subestima ligeramente sus intensidades.

En relación al sesgo, todos los casos presentan valores negativos, lo que indica que el modelo subestima el promedio de los datos. Los valores más ajustados se encuentran en la componente U, con un sesgo de -0.85 ms^{-1} y -0.62 ms^{-1} , mientras que la componente V es mayormente subestimada. En cuanto a las amplitudes, también se observa un mejor ajuste en la componente zonal, con una pequeña subestimación. Los valores obtenidos para las amplitudes horarias y diarias son de 0.96 y 0.97, respectivamente. Sin embargo, la componente meridional muestra un desajuste mayor, con sobre-estimaciones de la amplitud de 1.13 y 1.35 para los casos horarios y diarios, respectivamente.

En cuanto a las métricas RMSE-SS, se evidencia una mejor habilidad del modelo para reproducir la componente U del viento, con valores de 0.05 y 0.39, en comparación con la componente V, que obtiene valores de -0.07 y 0.08 para los datos horarios y diarios, respectivamente. Estos resultados sugieren que el modelo tiene una mejor capacidad para reproducir la componente U del viento en comparación con la componente V, aunque existen algunas diferencias en la intensidad y la amplitud que podrían ser ajustadas en futuras mejoras del modelo.

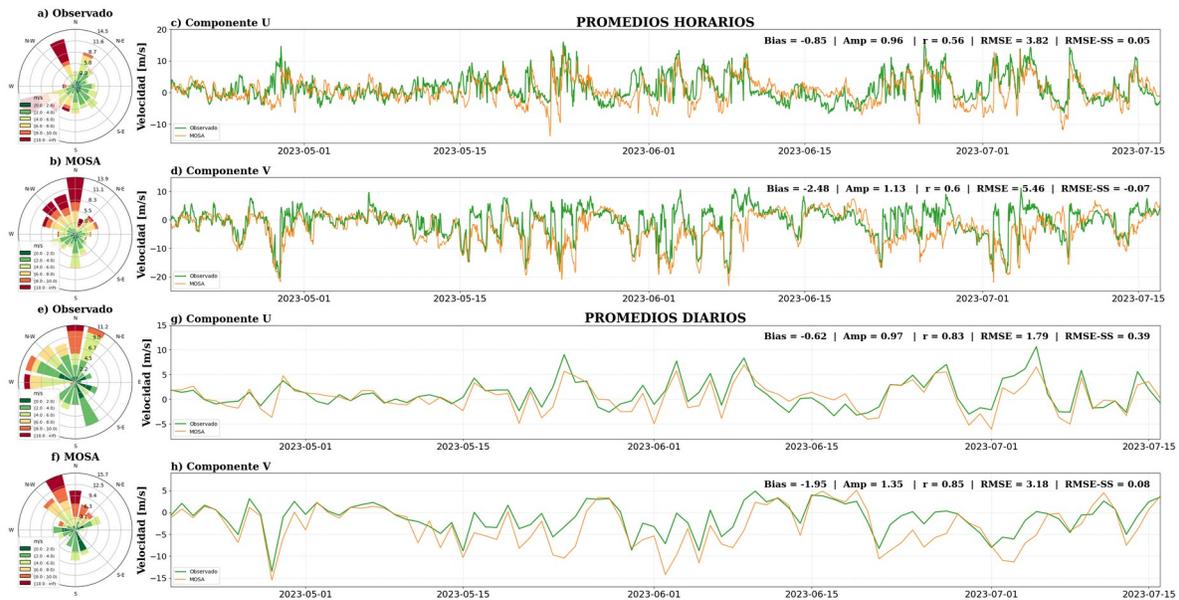


Figura 24: Descripción del viento en la estación Faro Corona. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.

En el caso de la estación de Cucao, se observa un eje principal de máxima varianza en la dirección norte-sur, donde se registran las mayores intensidades que superan los 20 ms^{-1} . Estas intensidades predominan en su mayoría desde el norte y luego van rotando hacia el oeste, presentando vientos menos frecuentes y de menor intensidad desde el suroeste. Estos patrones son consistentes y bien representados por MOSA-WRF (Fig. 25). Sin embargo, las observaciones muestran una componente noreste-este asociada a menores intensidades, alrededor de 6 ms^{-1} , probablemente atribuibles al ciclo diario de la brisa marina. Esta componente no es reproducida con la misma frecuencia por el modelo.

En términos estadísticos, MOSA-WRF presenta un buen ajuste con las observaciones tanto en los promedios horarios como diarios. Se observa un ajuste casi perfecto en la componente V, con valores muy cercanos a 0 ms^{-1} y 0.03 ms^{-1} , mientras que en la componente U se presenta una subestimación levemente mayor, tanto en los casos

horarios como diarios. En cuanto a las amplitudes, la componente U muestra resultados más precisos, con una amplitud muy similar a las observaciones, aproximándose a 1. Por otro lado, la componente V presenta una subestimación ligeramente mayor para los promedios horarios y diarios. Además, se observa una fuerte relación lineal entre MOSA-WRF y las observaciones, indicando una clara tendencia de cambio conjunto entre ellas. Los valores más altos se registran en la componente V, con valores de correlación de 0.89 y 0.96 para los promedios horarios y diarios, respectivamente. En resumen, se evidencia un mejor ajuste en la componente V, con valores de RMSE-SS de 0.55 y 0.72, en comparación con la componente U, que presenta valores de 0.4 y 0.58 para los promedios horarios y diarios, respectivamente.

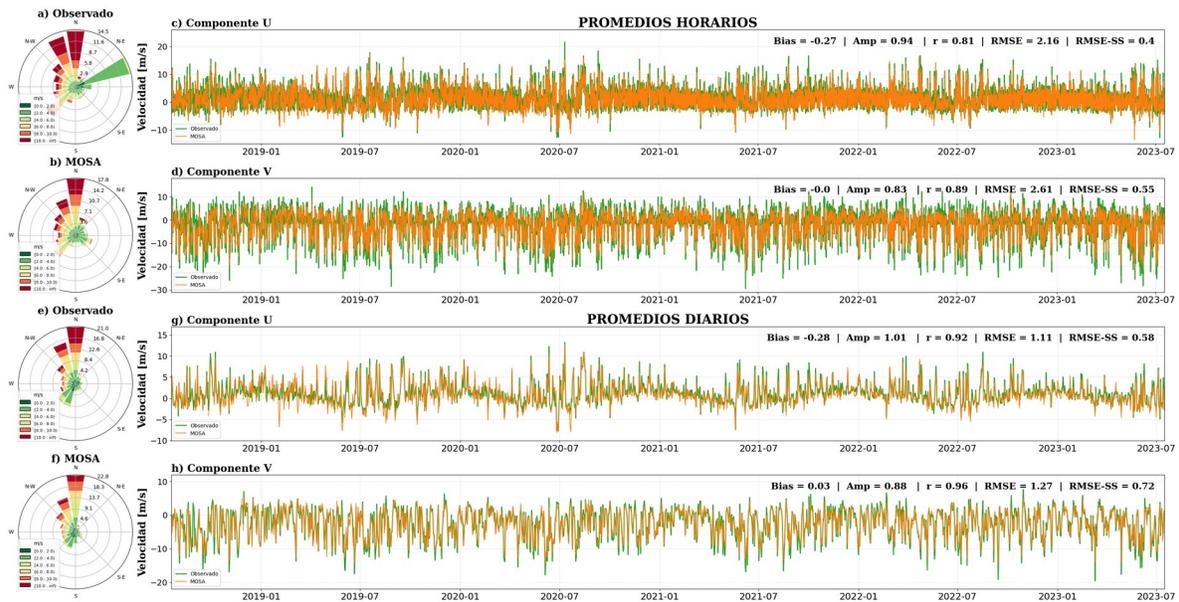


Figura 25: Descripción del viento en la estación de Cucao. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.

En la estación de Marimeli, se observa la presencia de un eje principal de variabilidad en la componente zonal del viento. Se observan las mayores intensidades desde el oeste, con valores que superan los 10 ms^{-1} . Además, se registra una menor ocurrencia de vientos del este, con intensidades más bajas que ocasionalmente superan los 5 ms^{-1} . Estos patrones se observan tanto en los promedios horarios como en los promedios diarios, aunque con menor intensidad en los promedios diarios. MOSA-WRF logra captar esta variabilidad de manera relativamente precisa en comparación con las observaciones (Fig. 26). Por otro lado, en el eje meridional no se observa una gran variabilidad tanto en las observaciones como en el modelo.

En cuanto a las series de tiempo promedio, MOSA-WRF representa de manera adecuada los valores, obteniendo un sesgo menor a 0.5 ms^{-1} en todos los casos. Sin embargo, las amplitudes son sobrestimadas en todos los casos por el modelo, especialmente en la componente V, con sobre-estimaciones de 1.68 y 1.62 para los promedios horarios y diarios, respectivamente. En términos de correlación, se obtiene una mejor respuesta en la componente U, con valores de 0.72 y 0.84, mientras que para la componente V no se encuentra una correlación significativa en los promedios horarios y diarios, respectivamente. En resumen, el modelo muestra una mayor habilidad para resolver la componente zonal del viento, con valores de 0.08 y 0.16, en comparación con la componente meridional, que presenta valores de -1.02 y -0.79 para los promedios horarios y diarios, respectivamente.

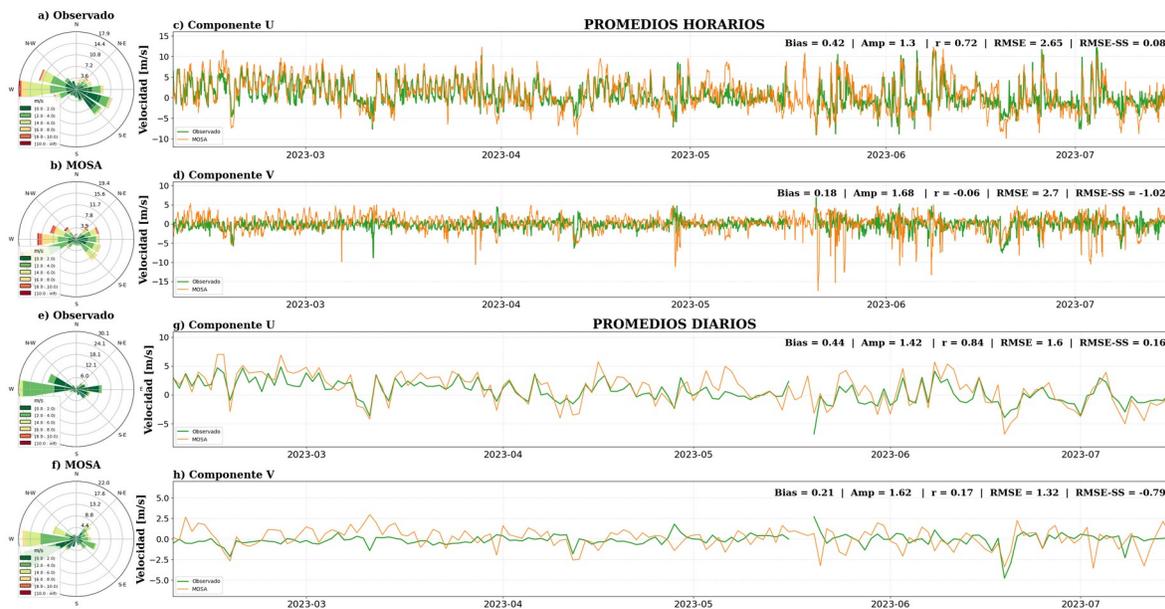


Figura 26: Descripción del viento en la estación de Marimeli. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.

En la estación de Melinka, se observa principalmente un primer eje de variabilidad en dirección norte-sur y un segundo eje con menor variabilidad en dirección oeste-este. Las mayores intensidades y ocurrencias provienen del oeste, destacando una componente sur en las observaciones que desaparece al obtener los promedios diarios. En cambio, en el modelo se observa principalmente una componente norte (Fig. 27). Es posible que esta componente sur esté asociada al ciclo diario de la brisa marina. Las intensidades observadas en los promedios horarios bordean los 20 ms^{-1} en la componente zonal proveniente del oeste, y en menor intensidad en la proveniente del norte. Se observa un comportamiento similar en los promedios diarios.

Los promedios se resolvieron de manera precisa, ya que las diferencias se acercaron bastante a cero. Se encontraron leves sub-estimaciones para la componente U, con valores de -0.69 ms^{-1} y -0.47 ms^{-1} , y sobre-estimaciones para la componente V, con valores de 0.48 ms^{-1} y 0.79 ms^{-1} , en los promedios horarios y diarios, respectivamente. En cuanto a las amplitudes, el modelo no logr3 reproduce la desviaci3n est3ndar de las observaciones, mostrando sub-estimaciones de alrededor del 20 % tanto en los promedios horarios como diarios. Sin embargo, los valores de correlaci3n resultaron significativamente altos, mostrando una mejor relaci3n lineal en la componente V, con valores de 0.88 para los promedios horarios y 0.96 para los promedios diarios. Esto indica que el modelo tiene una mejor capacidad para reproducir la variabilidad de la componente V en comparaci3n con la componente U. Los valores de RMSE-SS tambi3n respaldan esta conclusi3n, siendo superiores en la componente U, con valores de 0.51 y 0.63 para los promedios horarios y diarios, respectivamente.

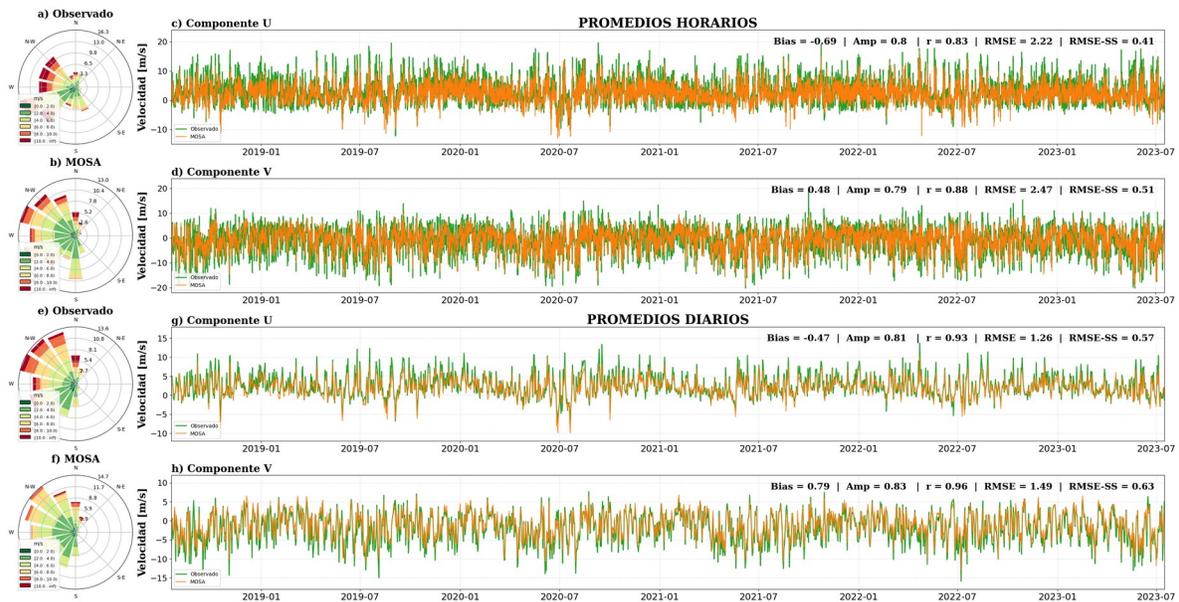


Figura 27: Descripci3n del viento en la estaci3n de Melinka. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.

Finalmente, en la estaci3n de Tranqui el modelo muestra una respuesta favorable en t3rminos de la direcci3n del viento para esta ubicaci3n (Fig. 28). MOSA-WRF logra representar una m3xima ocurrencia de vientos provenientes del noroeste-norte y del suroeste-sur, tanto en los promedios horarios como diarios, evidenciando una constante componente proveniente del oeste.

En cuanto al sesgo, se observa una subestimación relativamente menor en los promedios de la componente zonal U en los promedios horarios y diarios, con valores de 0.21 ms^{-1} y -0.24 ms^{-1} , respectivamente. En comparación, la componente V presenta subestimaciones más pronunciadas, con valores de -0.98 ms^{-1} y -0.97 ms^{-1} . En relación a la amplitud, el modelo sobrestima las observaciones, siendo más preciso en la componente U con valores de 1.11 y 1.2 en los promedios horarios y diarios, respectivamente. La componente V también muestra un buen desempeño en esta métrica de evaluación, aunque con un margen levemente superior en comparación con la componente zonal. Por otro lado, las fases se representan de manera destacada principalmente en la componente meridional del viento, con valores de correlación de 0.83 y 0.92. La componente U también obtiene cifras significativas de correlación, con valores de 0.61 y 0.77 en los promedios horarios y diarios, respectivamente. En consecuencia, el indicador RMSE-SS muestra un valor más cercano a 1 para la componente V, con valores de 0.3 y 0.43

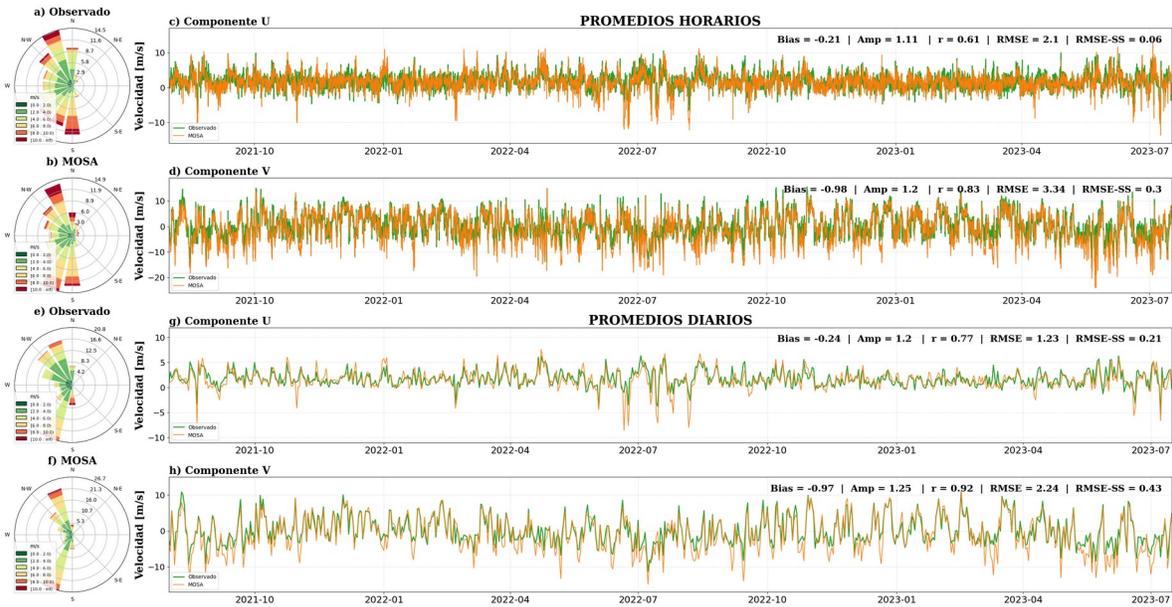


Figura 28: Descripción del viento en la estación de Isla Tranqui. A la izquierda, rosas de viento de los datos (a,e) observado, y (b,f) modelados. A la derecha, series de tiempo de las componentes del viento modeladas y observadas como promedios horarios (c) U, (d) V, y como promedios diarios (g) U, (h) V.

En resumen, se compararon las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del modelo MOSA-WRF en diferentes estaciones meteorológicas, tanto para series de tiempo con promedios horarios como con promedios diarios, en las componentes zonales y meridionales del viento. Esto permitió tener un diagnóstico más claro del rendimiento del pronóstico en estas variables, considerando diferentes condiciones geográficas y escalas temporales.

En general, el sesgo no presentó cambios significativos entre las series con promedios horarias y diarias (Fig. 29a). Solo se observó una ligera mejora en los datos diarios en la componente V en la estación de Corona, pasando de 2.5 ms^{-1} a -1.95 ms^{-1} . En la estación de Melinka, se apreció un pequeño aumento en el sesgo de los promedios diarios, pasando de una sobrestimación de 0.48 ms^{-1} a 0.79 ms^{-1} . El resto de las estaciones mantuvo valores muy similares.

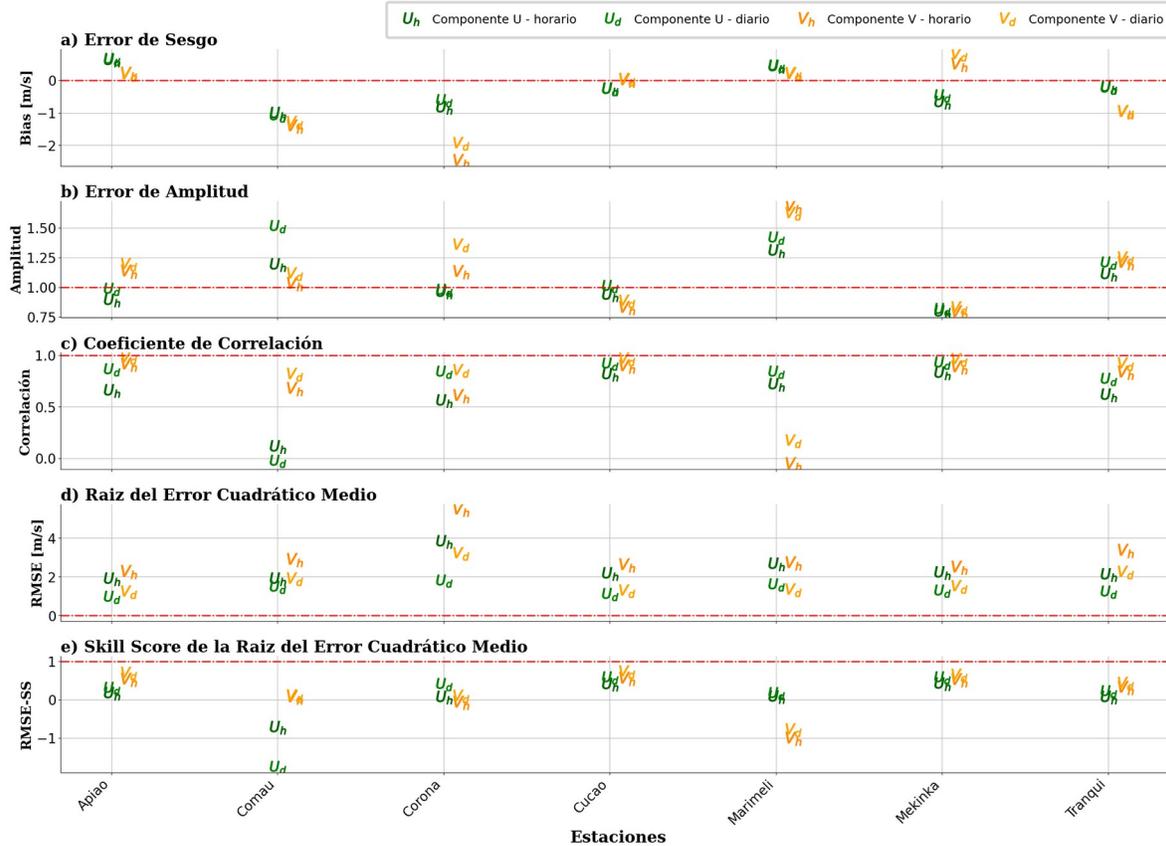


Figura 29: Estadísticas utilizadas para evaluar MOSA-WRF por cada estación meteorológica, tanto para las series de tiempo de promedios horarios como diarios. (a) Sesgo, (b) Amplitud, (c) Correlación, (d) RMSE y (e) RMSE-SS. Línea discontinua roja indica valor ideal para cada métrica.

En cuanto al desempeño por estación, se observó que en Apiao, Cucao, Marimeli y Melinka, el modelo resolvió mejor la componente V en comparación con la componente U. Sin embargo, los resultados de la componente U también fueron significativos, fluctuando aproximadamente entre -0.6 ms^{-1} y 0.6 ms^{-1} , en su mayoría con valores por encima del promedio de las observaciones. En Comau, Corona y Tranqui, la componente U tuvo un acercamiento mayor a cero, siendo Tranqui donde se representó mejor esta componente, con valores alrededor de -0.2 ms^{-1} . En Comau y Corona, los promedios se alejaron un poco más de las observaciones, alcanzando una mayor subestimación en Comau con un valor

cercano a -1 ms^{-1} . En resumen, la estación que presentó el mayor error de sesgo fue Corona, principalmente en la componente V.

En cuanto a las amplitudes, se observaron valores muy similares tanto para los datos horarios como diarios, excepto en la componente U en Comau, donde aumentó la sobrestimación de la desviación estándar al pasar de promedios horarios a promedios diarios (Fig. 29b). En Apiao, Corona y Cucao, las desviaciones estándar fueron casi perfectas, con valores muy cercanos a 1 para la componente U. Le siguen Marimeli y Melinka, que subestimaron y sobrestimaron los valores observados, respectivamente, con un error del 20 % aproximadamente. Finalmente, en Marimeli, se observó un mejor ajuste en la componente U, pero con valores mayores en comparación con el resto, siendo la componente V de esta estación la peor resuelta, con una desviación estándar sobrestimada del 60 % de la amplitud.

En cuanto a las correlaciones, en todas las estaciones se observó un aumento de esta métrica al pasar de promedios horarios a promedios diarios, excepto en la componente U en Comau, donde se presentaron correlaciones muy bajas y no significativas (Fig. 29c). Por otro lado, Marimeli experimentó el mismo comportamiento, pero para la componente V, con valores que fluctuaron entre -0.05 y 1.17. El resto de las estaciones, para ambas componentes y frecuencias de muestreo, presentaron correlaciones por encima de 0.5. Se destacan las correlaciones casi perfectas en Apiao, Cucao y Melinka, alcanzando los máximos valores en los promedios diarios de la componente V con valores de 0.97, 0.96 y 0.96, respectivamente. El único caso que presentó un mejor desempeño para la componente U fue en Marimeli.

En resumen, se observa que la raíz del error cuadrático medio disminuye al analizar las series con promedios diarios en comparación con los promedios horarios (Fig. 29d). Sin embargo, al comparar este indicador entre las estaciones, es difícil determinar cuál tuvo un mejor comportamiento, ya que este error depende del orden de magnitud de los datos. Por lo tanto, el skill score de la raíz del error cuadrático medio nos permite apreciar mejor el desempeño relativo al dispersión de los datos, utilizando como referencia la desviación estándar de los datos observados. Según los valores obtenidos, se puede afirmar que la habilidad del modelo es similar para las diferentes escalas temporales estudiadas (Fig. 29e). Sin embargo, en Comau se observa una excepción con valores de -0.7 para los promedios horarios y -1.8 para los promedios diarios. Además, se observa una mejor habilidad del modelo para reproducir la componente V en comparación con la componente U, excepto en la estación de Marimeli, donde se resuelve mejor la componente U. Los mejores resultados se obtuvieron para la componente V diaria en Apiao, Cucao y Melinka, con valores de 0.68, 0.72 y 0.63, respectivamente.

5.3 Resultados objetivo específico 3: Implementar un atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Los diagramas T-S observados para la zona de Chiloé presentaron una amplia variación en los valores de temperatura, con un rango que abarcó desde 10.2 °C hasta 16 °C. En términos de salinidad, los valores oscilaron entre 19 PSU y 33.5 PSU. Estos rangos de temperatura y salinidad estuvieron acompañados por concentraciones de oxígeno disuelto que se situaron entre 3.5 mL L⁻¹ y 6 mL L⁻¹. En líneas generales, la estructura de este diagrama reflejó la presencia de aguas con baja salinidad, temperaturas superiores a los 14 °C y altos niveles de oxígeno disuelto (>5.5 mL L⁻¹). Posteriormente, se observó una disminución en la temperatura a medida que aumentaba la salinidad de manera gradual. Al mismo tiempo, se evidenció una tendencia decreciente en los valores de oxígeno disuelto. Sin embargo, en esta evolución se identificó una zona con una marcada reducción en los niveles de oxígeno, alcanzando valores tan bajos como 3.5 mL L⁻¹ la que además estuvo asociada a profundidades de 160 m, por lo que el bajo contenido de oxígeno está asociado a la utilización del oxígeno para reducir la materia orgánica.

Por su parte, el diagrama T-S generado por el modelo abarcó un rango de valores de temperatura de 10 °C a 15.8 °C, y de salinidad de 28 PSU a 34 PSU. Estos valores se asociaron con concentraciones de oxígeno disuelto que variaron entre 4.8 mL L⁻¹ y 6.5 mL L⁻¹. Se pudo observar que las regiones con menor salinidad (<30 PSU) y temperaturas más altas (>14 °C) exhibieron niveles elevados de oxígeno disuelto (>6 mL L⁻¹). A medida que la temperatura disminuyó y la salinidad aumentó, se produjo una reducción en los valores de oxígeno disuelto, aunque esta disminución se presentó de manera gradual.

Las comparaciones entre las observaciones de oxígeno disuelto de los datos observados y el modelo revelaron similitudes en términos de la tendencia de disminución a medida que aumenta la salinidad y disminuye la temperatura (Fig. 30). Sin embargo, es importante señalar que los valores registrados en el modelo estuvieron sobrestimados en comparación con los datos observados. Además el modelo fue capaz de reproducir la presencia de agua subantártica (sigla en inglés SAAW) que se caracteriza por temperatura de entre 9 °C – 15 °C, salinidad (31 PSU – 33 PSU) y oxígeno disuelto (5 mL L⁻¹ - 7 mL L⁻¹) (Silva & Palma, 2006; Vargas et al., 2011).

En cuanto a las concentraciones de nitrato en el diagrama T-S, se observó que los datos observados exhibieron una variación en un rango de 5 uM a 12 uM. Se identificó una tendencia en la cual las concentraciones más bajas estuvieron asociadas a temperaturas más elevadas y salinidades más bajas. A medida que la temperatura disminuyó y la salinidad aumentó, se evidenció un aumento gradual en las concentraciones de nitrato.

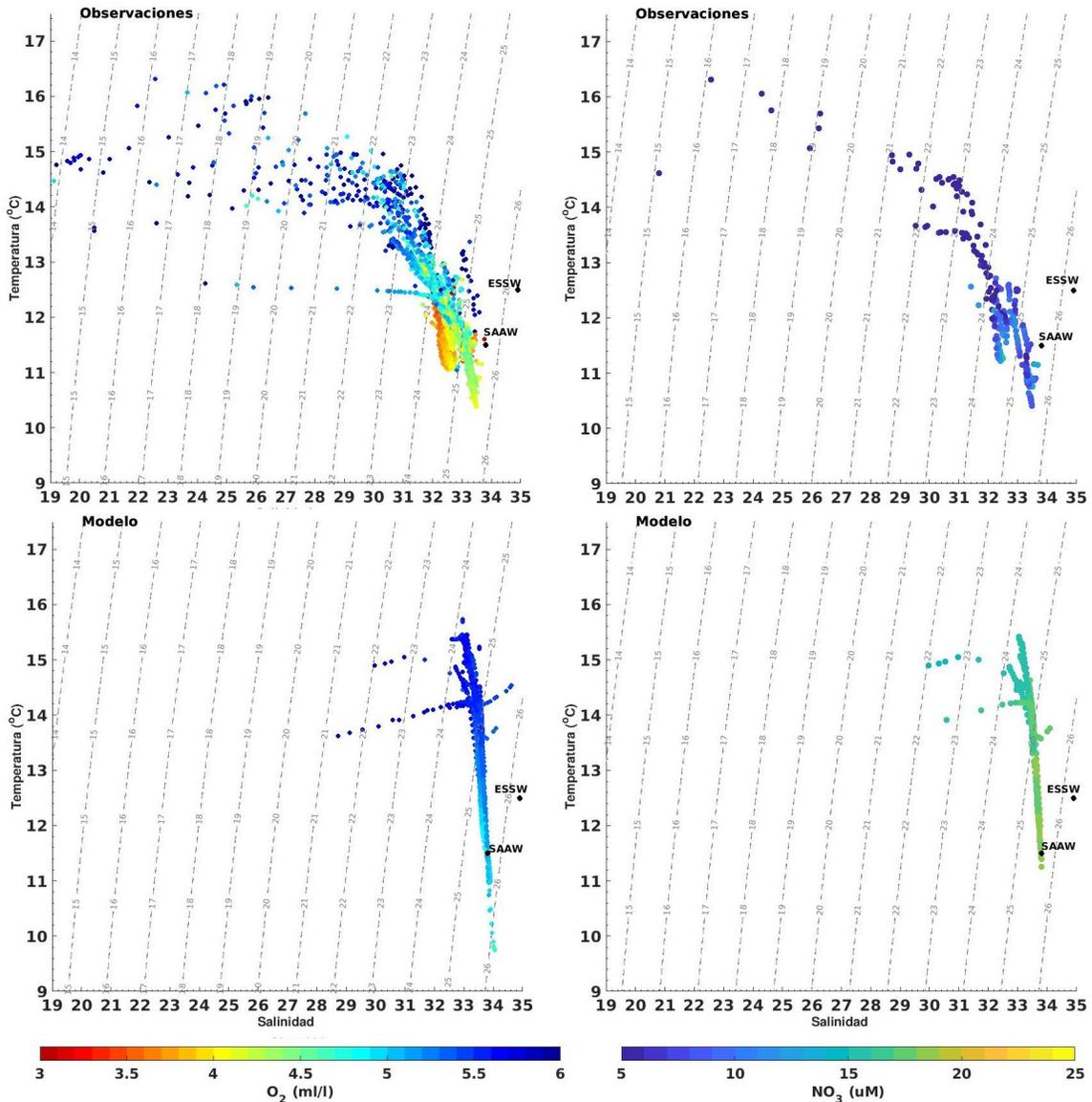


Figura 30: Diagramas T-S con valores de oxígeno disuelto y nitrato para la zona de Chiloé durante primavera-verano.

En relación a las concentraciones de nitrato en el modelo, se pudo observar que los valores presentaron variaciones en un rango de 15 μM a 18 μM . Similar al diagrama T-S de las mediciones, se identificó una tendencia en el modelo en la cual las concentraciones de nitrato comenzaron a disminuir gradualmente a medida que la temperatura disminuye y la salinidad aumenta. Además, el modelo fue capaz de reproducir las altas concentraciones de nitrato que caracterizan a la SAAW. Sin embargo, en general el modelo sobrestimó las concentraciones en relación a los datos observados.

En los diagramas T-S correspondientes a la zona de Aysén, los datos observados revelaron un rango de temperatura entre 8 °C y 11 °C, acompañado por salinidades que variaron entre 20 PSU y 34 PSU (Fig. 31). En general, se observó una tendencia donde las observaciones con menor salinidad (<28 PSU) presentaron niveles más elevados de oxígeno disuelto (>5.5 mL L⁻¹). Por otro lado, en los puntos con mayor salinidad, se pudo identificar una tendencia a la disminución de los niveles de oxígeno, llegando en algunos puntos a valores tan bajos como 3 mL L⁻¹.

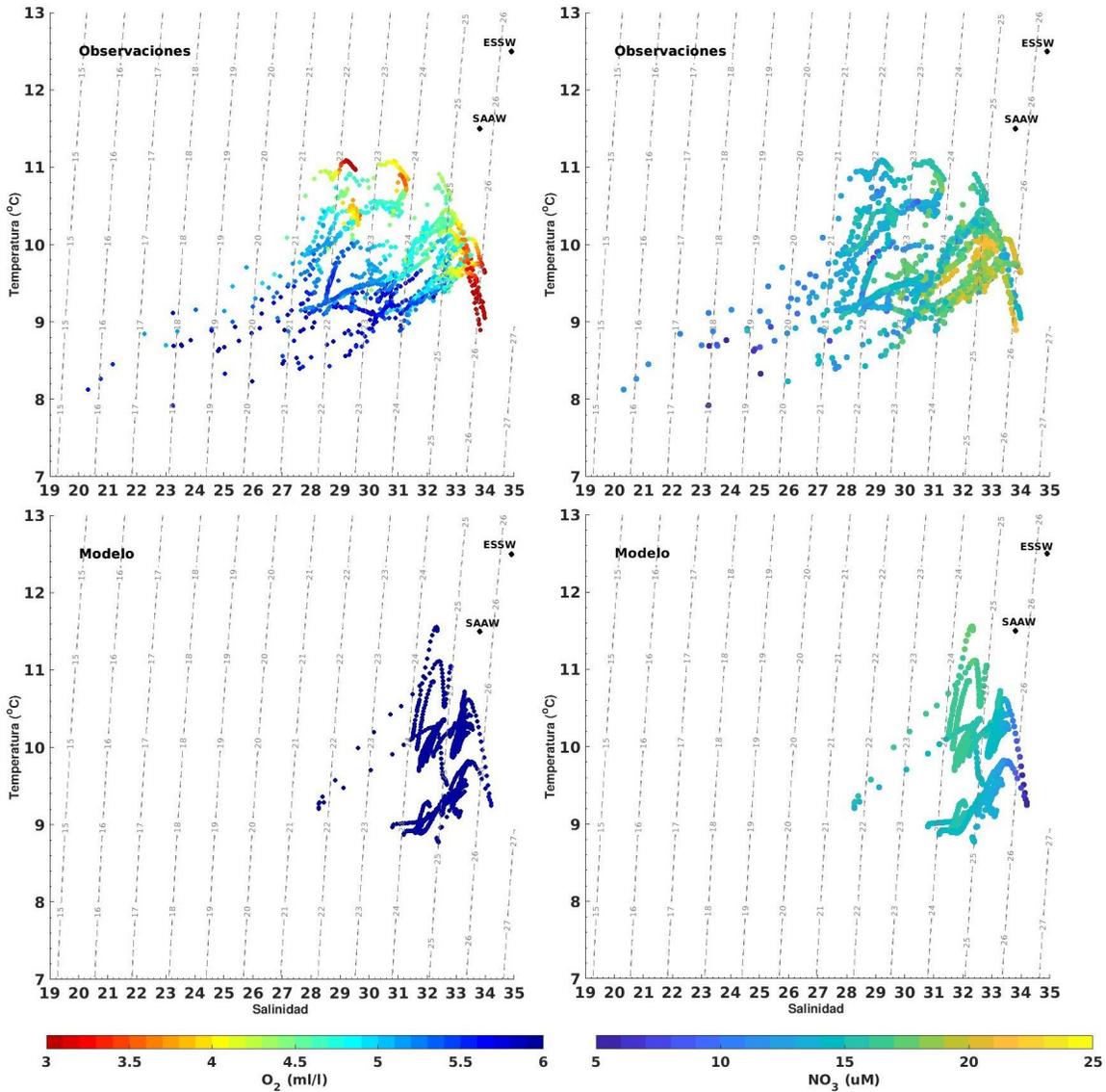


Figura 31: Diagramas T-S con valores de oxígeno disuelto y nitrato para la zona de Aysén durante otoño-invierno.

En el caso del modelo, los diagramas T-S reflejaron valores de temperatura que oscilaron entre 9 °C y 11.3 °C, acompañados por salinidades que variaron en un rango de

28 PSU a 34.4 PSU. En términos de los valores asociados a oxígeno disuelto, se observaron variaciones entre 5.8 mL L^{-1} y 6.4 mL L^{-1} . En cuanto a las concentraciones de nitrato, los datos observados registraron variaciones entre 6 uM y 20 uM . En este diagrama no se observó una clara tendencia en función de la temperatura y la salinidad. Sin embargo, la mayoría de las observaciones presentaron valores cercanos a 15 uM , excepto en una zona destacada donde las concentraciones superaron los 18 uM . Esta zona se caracterizó por estar asociada a salinidades por encima de 31 PSU y temperaturas menores a $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Por otra parte, los valores promedio observados de oxígeno disuelto en los primeros 20 m de profundidad presentaron variaciones que abarcaron un rango entre 4.4 mL L^{-1} y 5.8 mL L^{-1} (Fig. 32). Se destacó especialmente la amplia variación en las concentraciones de oxígeno disuelto en la región de Chiloé, con concentraciones mínimas ($\sim 4.4 \text{ mL L}^{-1}$) en las proximidades de Chiloé y concentraciones máximas ($\sim 5.5 \text{ mL L}^{-1}$) en la zona de Reloncaví y el fiordo Comau. En comparación, en la zona de Aysén se observaron fluctuaciones más moderadas en los niveles de oxígeno disuelto en relación a la zona de Chiloé. Las concentraciones mínimas ($\sim 5.0 \text{ mL L}^{-1}$) se identificaron en los canales de Aysén, mientras que las concentraciones máximas se situaron en el área del canal de Moraleda ($\sim 5.5 \text{ mL L}^{-1}$). Por su parte, las concentraciones de oxígeno disuelto modeladas registraron variaciones entre 5.5 mL L^{-1} y 6.0 mL L^{-1} . A pesar de evidenciarse una relativa estabilidad en las concentraciones en ambas zonas, se notó una diferencia significativa entre la zona de Chiloé y la zona de Aysén. Específicamente, en la zona de Chiloé, las concentraciones modeladas fueron más bajas en comparación con la zona de Aysén.

Las discrepancias entre los datos observados y las variables simuladas de oxígeno disuelto oscilaron en un rango de 0.5 mL L^{-1} a 1.5 mL L^{-1} . Se pudo observar un ajuste más cercano entre los datos observados y los modelados en áreas con niveles de oxígeno más alto, como la zona de Reloncaví y el Canal Moraleda, donde las diferencias fueron menores. Por otro lado, las mayores discrepancias se presentaron en zonas con niveles más bajos de oxígeno, como la zona cercana a Chiloé y los canales en Aysén, es por ello que en general el modelo sobre-estimó las concentraciones de oxígeno disuelto.

Las concentraciones promedio de nitrato observadas en los primeros 20 metros de profundidad presentaron variaciones que se extendieron desde 0 hasta 20 uM (Fig. 32). En la región de Chiloé, se identificaron las concentraciones más bajas, oscilando entre 0 uM y 10 uM , en contraste con los datos observados en la zona de Aysén, que se ubicaron en un rango de 15 uM a 20 uM . Específicamente en la zona de Chiloé, las menores concentraciones se localizaron en áreas como Reloncaví y el fiordo Comau, mientras que aumentaron en dirección hacia la boca del Guafo. Por otro lado, en la región de Aysén, las mayores concentraciones se encontraron al sur del canal Moraleda, mientras que las

concentraciones m1s elevadas se situaron en la zona de la boca del Guafo y en los canales interiores.

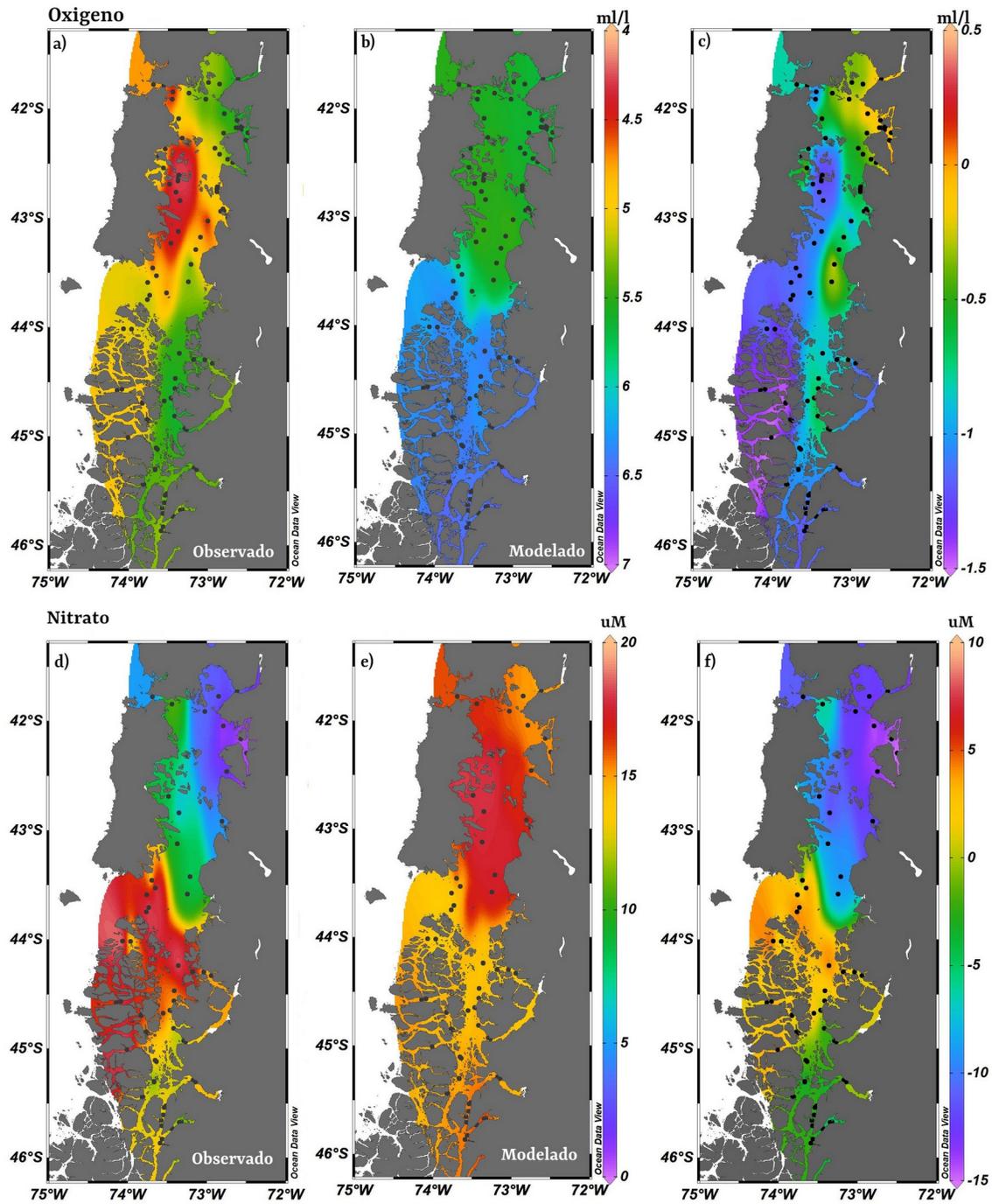


Figura 32: Valores promedios de los primeros 20 m de oxígeno disuelto y nitrato para los (a, d) datos observados, (b, c) modelados, y (c, f) diferencia entre observado y modelado.

Finalmente, las concentraciones de clorofila superficial observadas variaron en un rango de 0 mg L^{-1} a 20 mg L^{-1} (Fig. 33). Se pudo observar un patrón estacional donde las mayores concentraciones se presentaron durante el verano, seguidas en menor medida por la primavera. Sin embargo, durante las estaciones de otoño e invierno, las observaciones fueron limitadas debido a la alta presencia de cobertura de nubes, lo que dificultó el registro efectivo de datos.

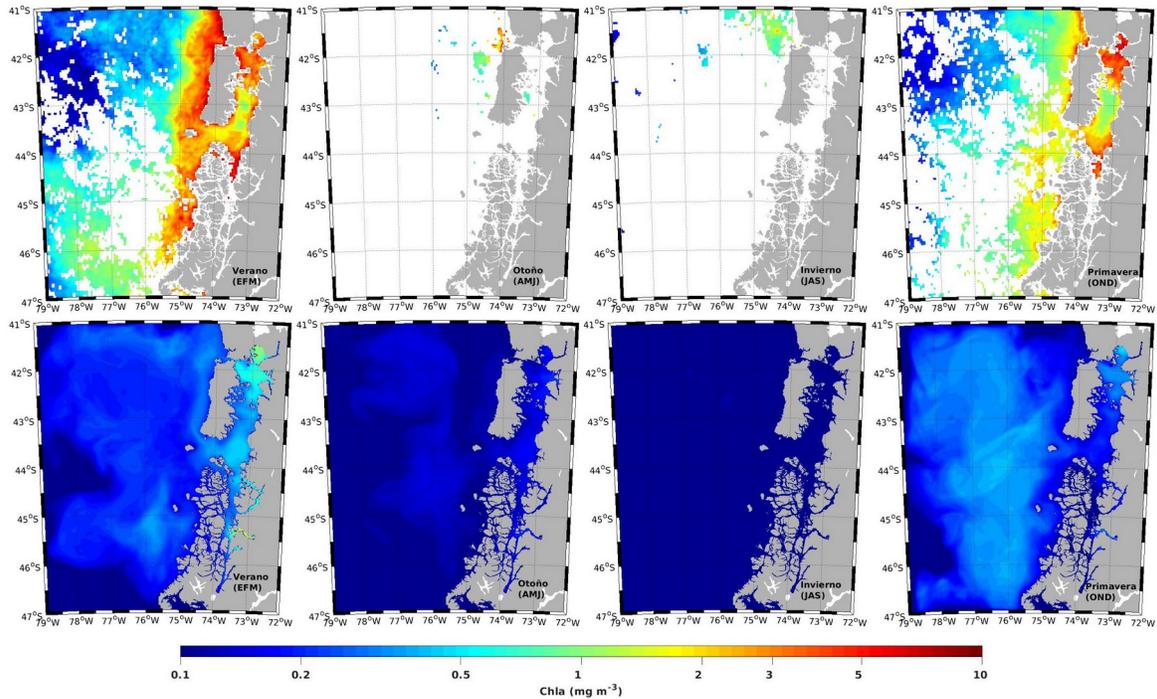


Figura 33: Clorofila superficial estacional del satélite Sentinel y del modelo MOSA-PISCES.

Durante el verano, las concentraciones de clorofila superficial resaltaron en varias áreas. Hubo altos valores en la zona oceánica de la isla de Chiloé, en la cuenca norte del mar interior de Chiloé y en la zona norte del canal Moraleda. Por otro lado, durante la primavera, los niveles elevados de clorofila se concentraron principalmente en la cuenca norte de Chiloé y en el sector norte del canal Moraleda.

En relación a las concentraciones de clorofila superficial simuladas, estas variaron en un rango de 0 mg L^{-1} a 12 mg L^{-1} . Se pudo observar una clara influencia estacional en los patrones de concentración, con valores más altos durante el verano y en menor medida en la primavera. En la temporada estival, las concentraciones más elevadas se localizaron en la cuenca norte de Chiloé, en el canal Moraleda y en áreas oceánicas como la costa de Chiloé. Durante la primavera, las mayores concentraciones persistieron en la cuenca norte de Chiloé, con una presencia menor en la zona oceánica. Los meses de otoño e invierno, por otro lado, se caracterizaron por presentar bajas concentraciones de clorofila superficial.

Al analizar la comparación entre los datos observados y los valores modelados de clorofila superficial, se evidencia una tendencia general en la cual el modelo tiende a subestimar las concentraciones en relación a los datos observados. No obstante, es importante resaltar que el modelo logra capturar ciertas tendencias estacionales y espaciales en las distribuciones de clorofila superficial. Específicamente, en la temporada de verano, el modelo logra replicar los altos valores de clorofila superficial en la cuenca norte de Chiloé, en la zona oceánica de Chiloé y en el sector norte del canal Moraleda, además de reflejar la baja concentración en la cuenca sur de Chiloé. Durante la primavera, el modelo también es capaz de reproducir la tendencia de altos niveles de clorofila superficial en la cuenca norte de Chiloé. Sin embargo, se observa que los valores oceánicos representados en el modelo no se corresponden con los datos del satélite. A pesar de que el modelo muestra discrepancias en cuanto a la magnitud de las concentraciones, su habilidad para capturar algunas tendencias y patrones espaciales es un indicativo de su capacidad para simular las dinámicas de clorofila superficial en la región, a pesar de las limitaciones inherentes al modelo y a la disponibilidad de datos satelitales.

5.4 Resultados objetivo específico 4: Evaluar el modelo MOSA-CROCO para la región de Magallanes y Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas en la región.

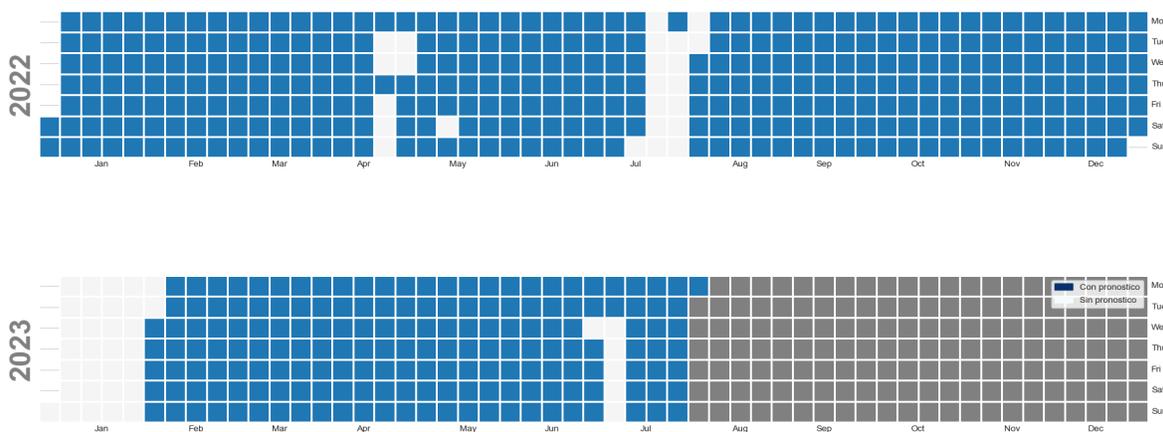


Figura 34: Estabilidad operacional del modelo MOSA-MAG durante enero de 2022 a julio 2023 (período ejecución de este proyecto).

El modelo comenzó a funcionar de manera operacional en el servidor de producción (Tabla 11) el día 7 de julio del 2021, y se ha mantenido relativamente estable hasta la fecha. Si bien el sistema ha funcionado casi con normalidad, han existido ocasiones donde este ha fallado. Estas fallas pueden deberse a diversos motivos (Fig. 34). En un principio, se producen debido a inestabilidades propias del modelo por la compleja topografía del dominio sumada al ingreso extra de volumen de agua a través de caudales de ríos y glaciares presentes en la región. Este volumen extra genera un estrés sobre el dominio, el

cual al intentar mantener la continuidad del flujo, aumenta el riesgo de provocar errores tipo “*blow up*”, lo cual indica que el modelo no puede resolver las ecuaciones de movimiento para esas condiciones y por lo tanto se detiene. Estas fallas, también pueden deberse a problemas con las descargas de datos globales y en el menor de los casos a problemas de *hardware*, tales como almacenamiento de datos, memoria del equipo, fallas en los nodos de cálculo.

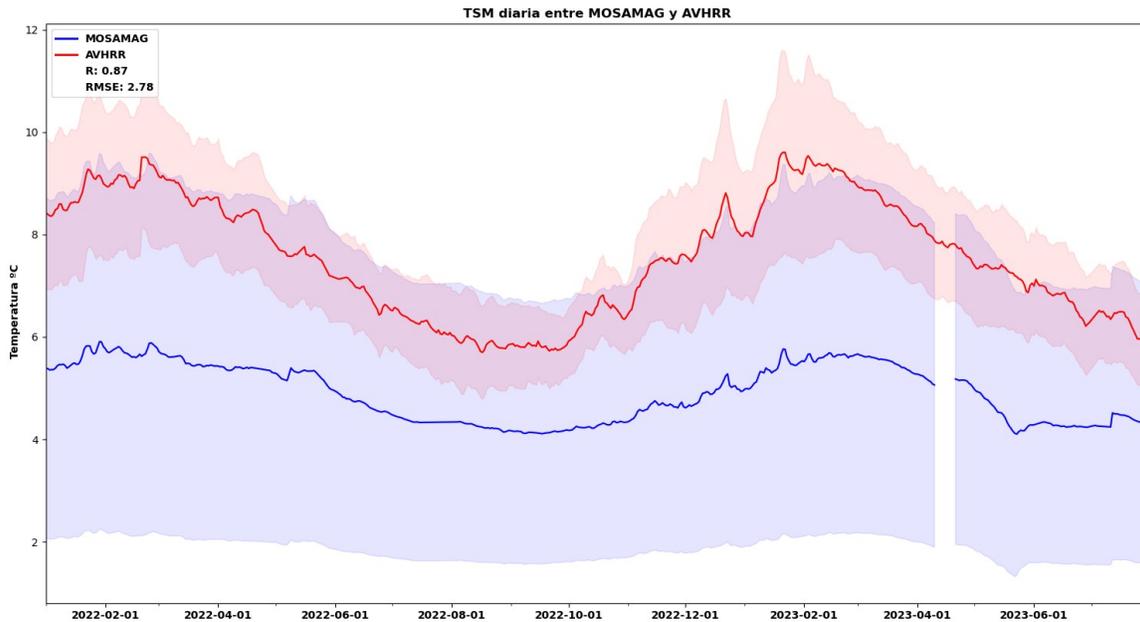


Figura 35: Series de tiempo de la temperatura superficial del mar diaria, promediada sobre el dominio completo de MOSA-MAG y contrastada con datos AVHRR para el mismo dominio, entre enero 2022 y julio 2023.

A modo de evaluar y tener una aproximación de la calidad de los pronósticos oceanográficos generados, se realizaron dos tipos de evaluaciones de TSM. Por una parte, evaluamos la evolución diaria de TSM usando datos satelitales de AVHRR, y por otra se contrastaron promedios mensuales de TSM entre MOSA-MAG y datos satelitales de TSM obtenidos del producto VIIRS para conocer las diferencias en la distribución espacial entre ellos.

Para el primer caso, se construyeron promedios diarios de TSM de MOSA-MAG entre enero de 2022 y julio de 2023. Estos promedios, luego fueron promediados espacialmente considerando todo el dominio de estudio, para así obtener una serie de tiempo promedio. A su vez, este mismo cálculo fue aplicado a los datos diarios de TSM obtenidos del producto AVHRR. En general, podemos notar que el modelo presenta una subestimación sostenida de unos ~ 2 °C bajo lo observado (Fig. 35). Esta tendencia se mantiene durante todo el periodo observado presentando un RMSE de 2.78 °C. Por otra

parte, se observa un valor de coeficiente de correlación de Pearson entre ambas series de 0.87, lo que refleja un buen ajuste de la señal estacional.

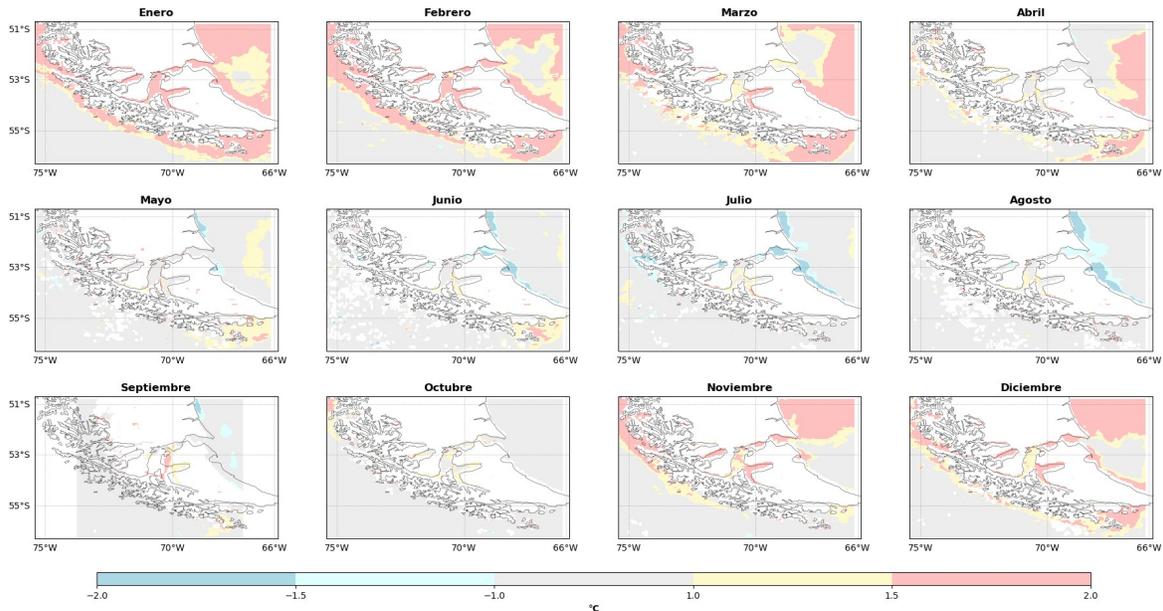


Figura 36: Mapas de diferencias de temperatura superficial del mar mensual entre datos VIIRS y MOSA-MAG, año 2022.

Para conocer la distribución espacial del error se usaron promedios mensuales de TSM obtenidos de datos satelitales VIIRS los cuales fueron contrastados con promedios mensuales de TSM de MOSA-MAG a través del cálculo de diferencias entre ambos entre los años 2022 y 2023 respectivamente. Al igual que en análisis anterior, notamos que MOSA-MAG presenta diferencias positivas, es decir, el modelo es más frío que lo observado en gran parte del dominio en los meses de verano, mientras que un mayor ajuste se presenta en los meses de otoño-invierno y primavera donde las diferencias son menores a 1 °C (Fig. 36). Sin embargo, durante el año 2023 la tendencia a ser más frío en sus bordes persiste a principios de invierno (Fig. 37). Si observamos la diferencia total promedio de todos los meses evaluados podemos observar que gran parte de la zona interior mantiene diferencias menores a 1 °C, mientras que el borde oriental se presenta como la zona con mayor diferencia, donde el modelo mantiene una diferencia positiva de 2 °C o más, es decir el modelo es más frío (Fig. 38).

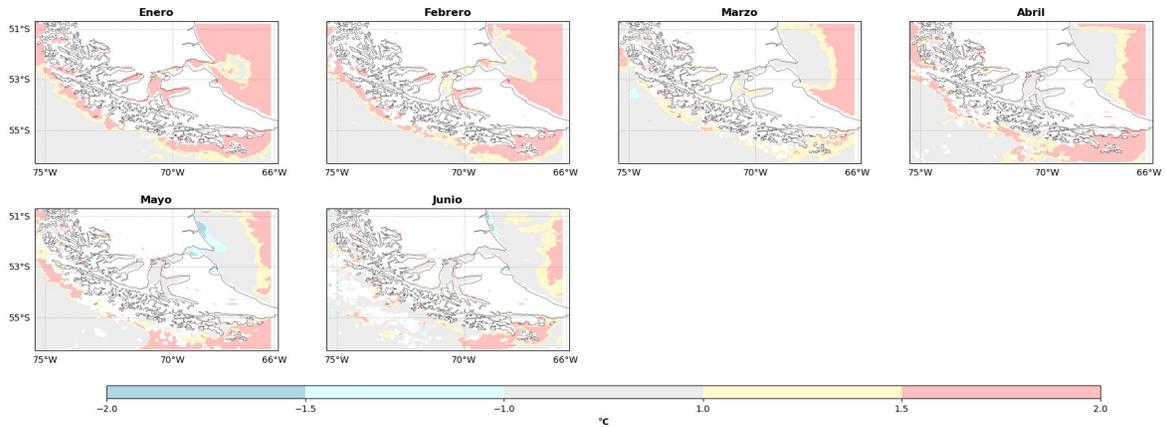


Figura 37: Mapas de diferencias de temperatura superficial del mar mensual entre datos VIIRS y MOSA-MAG, a1o 2023.

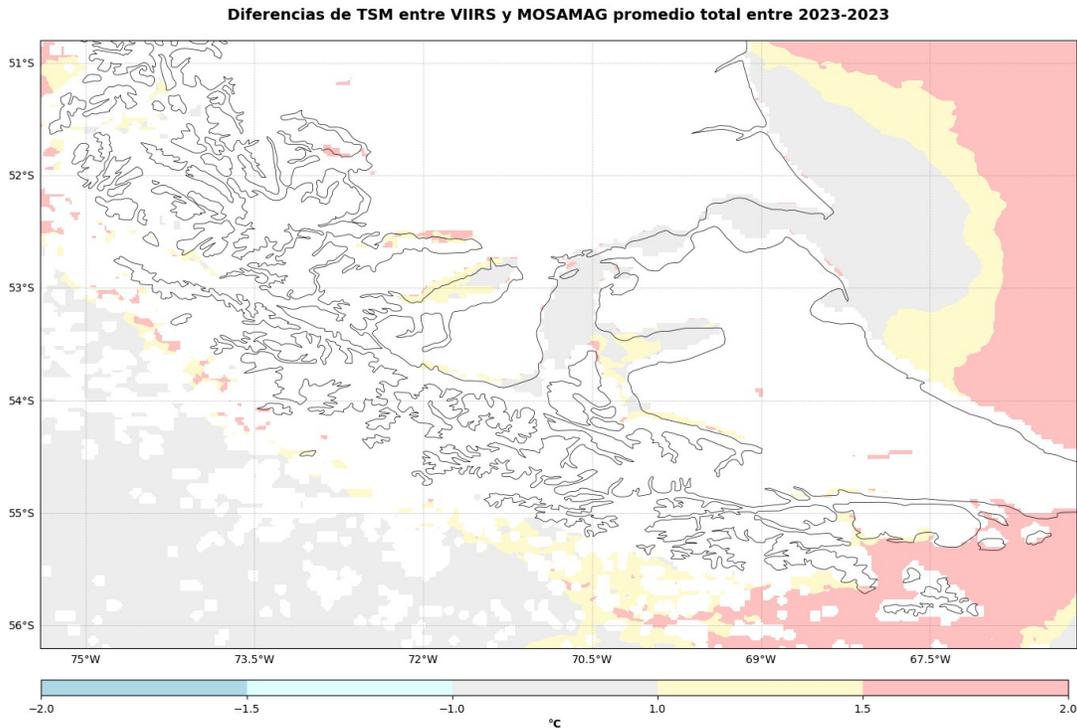


Figura 38: Diferencias de la temperatura superficial del mar mensual promedio entre datos VIIRS y MOSA-MAG entre los a1os 2022 y 2023.

Para estudiar el comportamiento del MOSA-MAG en la columna de agua, se utilizaron perfiles de CTD del proyecto de Marea Roja del IFOP en la regi3n. Sin embargo, hay que considerar que estos perfiles suelen ser generalmente costeros y someros, lo cual no permite tener una comparaci3n directa con el modelo, el cual generalmente reproduce una condici3n general del fiordo y no condiciones locales a escalas de peque1as bah1as (la resoluci3n del modelo es de ~1.5 km). De todas maneras, estos perfiles permiten obtener

una visión amplia de la distribución de temperatura y salinidad a nivel zonal. Para una mejor comprensión de los análisis y tener una variabilidad espacial del modelo los perfiles fueron agrupados en 3 diferentes zonas (Fig. 9), las cuales a su vez fueron separadas por estación del año a modo de obtener una mirada estacional de la columna de agua en MOSA-MAG. A partir de los perfiles simulados y observados se construyeron diagramas T-S estacionales para cada zona.

La zona norte que contiene los sectores de islas Rennel, Pizzi, estero Peer y parte del parque Bernardo O'higgins se caracteriza por estar influenciada por Campo de Hielo Sur, lo cual le otorga una fuerte señal estacional a la salinidad. Los diagramas T-S para la zona norte (Fig. 39) confirman la tendencia del modelo a ser más frío especialmente en otoño e invierno, con un mejor ajuste de la temperatura en primavera y verano. Por otra parte, la salinidad se presenta subestimada con valores más en torno a los 27 y 33 PSU.

Norte

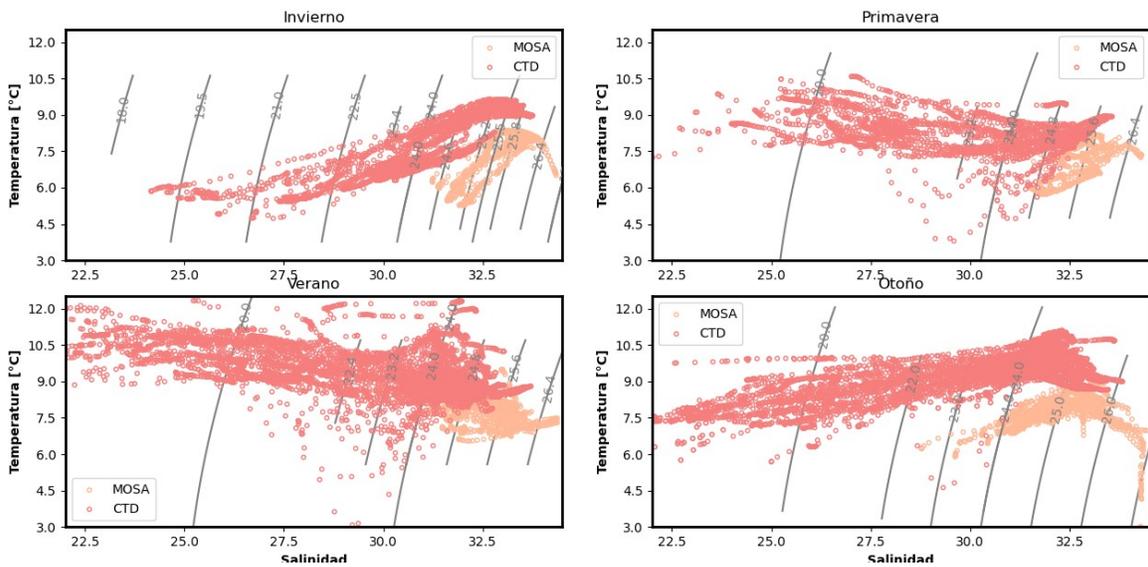


Figura 39: Diagramas T-S estacionales de simulaciones MOSA-MAG y perfiles CTD para la zona norte, correspondiente a Isla Pizzi y Estero Peer.

La zona centro contiene gran parte del Estrecho de Magallanes y Seno Otway. En esta zona observamos que existe una temperatura más fría y una subestimación de la salinidad en el modelo MOSA-MAG, en comparación con los perfiles de CTD (Fig. 40). Cabe notar que la mayoría de los perfiles de CTD de la zona centro no coincidían con el modelo, por lo que al extraer el punto más cercano en el modelo se obtuvieron habitualmente puntos más profundos, los cuales representaban una condición general del estrecho de Magallanes en vez de una condición costera local.

Centro

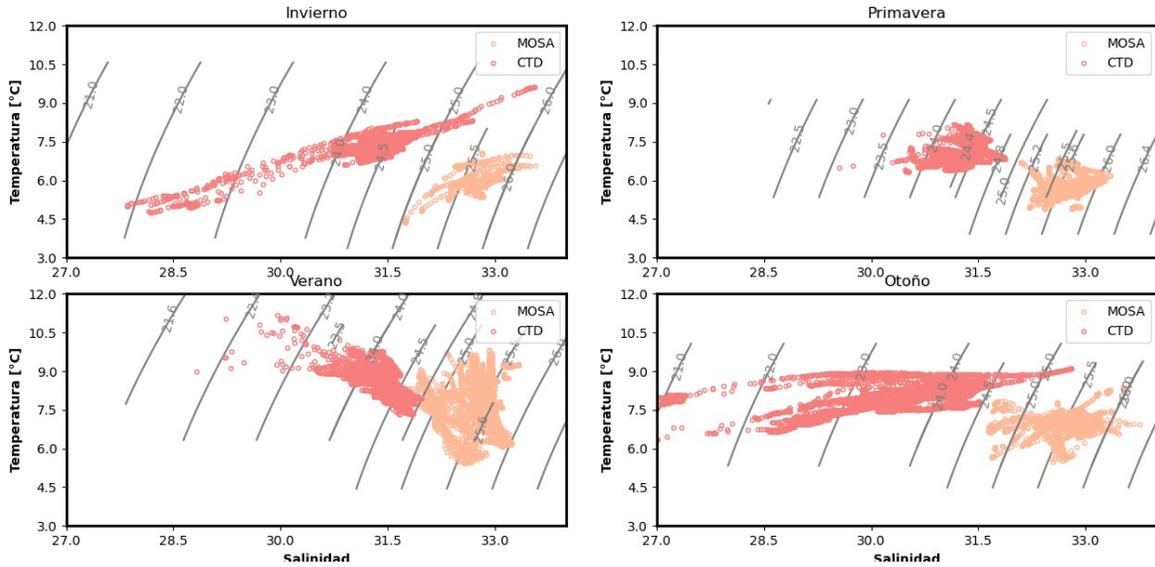


Figura 40: Diagramas T-S estacionales de simulaciones MOSA-MAG y perfiles CTD para la zona centro, correspondiente al Estrecho de Magallanes y Seno Otway.

Sur

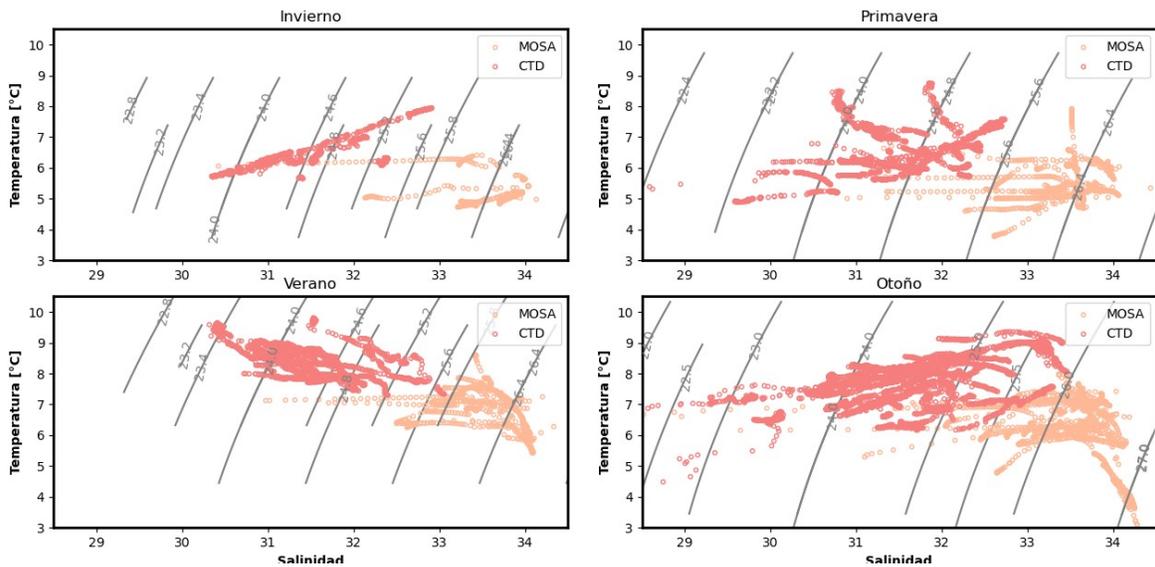


Figura 41: Diagramas T-S estacionales de simulaciones MOSA-MAG y perfiles CTD para la zona sur, correspondiente al Canal Beagle.

Finalmente, la zona sur del dominio corresponde al Canal Beagle. Acá debido a la resolución de MOSA-MAG (~1.5 km), la gran mayoría de las estaciones costeras en el modelo representan puntos que están en el centro del canal Beagle, aún así se observa un

mejor ajuste en primavera y otoño, aunque se mantiene el sesgo negativo de la temperatura (Fig. 41).

En resumen, MOSA-MAG ha comenzado a generar pronósticos de manera casi interrumpida desde el 31 de Julio del 2021, donde se ha presentado estable, sin embargo los resaltados reflejan un desajuste negativo de la temperatura de ~ 2 °C. No obstante, el modelo aún esta en proceso de estabilización y los resultados de las evaluaciones se realizaron con estaciones costeras y someras, las cuales no necesariamente reflejan la condición general de los fiordos y canales. A modo de operación, MOSA-MAG está configurado para iniciarse todos los días a las 10:45, terminando a las 17:30 en horario GMT. De todas maneras, estos resultados se están enviando al sitio web CHONOS, donde pueden encontrarse los últimos 5 pronósticos.

5.5 Resultados objetivo específico 5: Diseñar e implementar un modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén.

A continuación mostraremos los resultados del modelo operacional de oleaje MOSA-WW3 en comparación con las distintas bases de datos disponibles. Presentaremos series de tiempo y campos de altura significativa de ola para evaluar el desempeño del modelo. Además, se utilizan parámetros estadísticos como el coeficiente de determinación, el sesgo y la raíz del error cuadrático medio para cuantificar el grado de representación del oleaje simulado con respecto a las mediciones.

La evaluación del modelo MOSA-WW3 contra la boya del SHOA nos muestra que el modelo no logra representar el oleaje de la zona de buena manera. En este sentido, ninguno de los coeficientes de determinación de dicho modelo supera el valor de 0.6. Sin embargo, se describen los resultados encontrados por parámetro espectral para analizar su comportamiento y encontrar posibles mejoras. Con respecto a la altura significativa (H_s), es el parámetro con mejor ajuste por parte del modelo, con una correlación de 0.57, una subestimación de 0.09 m y un error de 0.29 m. En otras palabras, se representa en un 57% la variabilidad de H_s y se estiman magnitudes cercanas a las mediciones. En comparación con el modelo MFWAM, este presenta mejores ajustes a las mediciones efectuadas por la boya SHOA, ya que se determinaron mejores estimaciones de alturas significativas y variabilidad temporal. Además, se identifican problemas para representar los incrementos de energía por parte del modelo, como se puede apreciar en las series de tiempo en torno a los días 5, 6, 25, 28 y 29 de abril (Fig. 42). Cabe destacar, que durante los días 7 y 8 de abril no hubo pronóstico de viento MOSA-WRF por lo que no se presentan datos de oleaje para esos días.

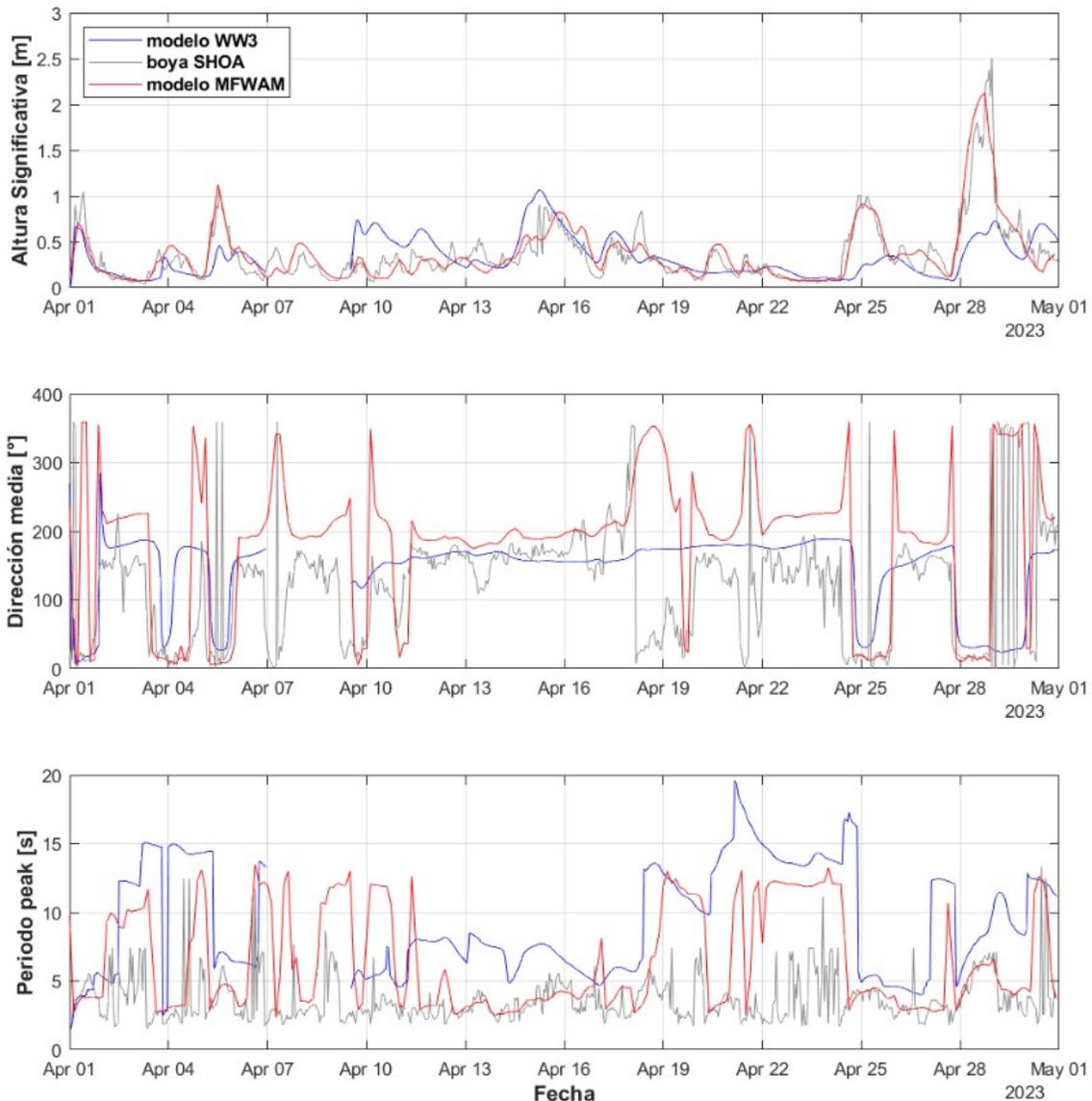


Figura 42: Comparación de series de tiempo para el mes de abril del 2023 de H_s (primera fila), D_m (segunda fila) y T_p (tercera fila) entre el modelo de oleaje (MOSA-WW3), boya SHOA y modelo de oleaje (MFWAM).

La dirección media presenta una correlación de 0.31, una sobrestimación de 15.67° y un error de 101.36° . Si bien no se logra un ajuste importante, se tiene una mejor representación en comparación al modelo MFWAM, donde se logra una mejor variabilidad temporal y magnitudes más cercanas a las mediciones por parte del modelo. En general, el modelo MOSA-WW3 no representa bien los cambios de direcciones. En particular, para los días 5, 6, 25, 28 y 29 de abril, se alcanzan direcciones parecidas a las mediciones, pero no existe la misma representación de energía visible en la altura de ola. En consecuencia, puede que el modelo pueda mejorar con la calibración de coeficientes de transferencia de energía desde el viento.

Para los periodos de olas, se destaca la baja representación del modelo MOSA-WW3. En promedio, se sobrestima la magnitud del periodo con un sesgo de 5.36 s y error de 7.08 s. Se determinaron mejores estadísticos para el modelo MFWAM, pero estos siguen siendo bajos en términos de representatividad del fenómeno. En la Tabla 8, se resumen los parámetros estadísticos para comparar la boya SHOA con el modelo operacional y el modelo MFWAM.

Tabla 8: Parámetros estadísticos obtenidos a partir de los parámetros espectrales de oleaje de los modelos MOSA-WW3 y MFWAM contra las mediciones de la boya SHOA.

	Boya SHOA – Islas Desertores								
	Hs (m)			Dm (°)			Tp (s)		
	R2	BIAS	RSME	R2	BIAS	RSME	R2	BIAS	RSME
MOSA-WW3	0.57	-0.09	0.29	0.31	15.67	101.36	0.002	5.36	7.08
MFWAM	0.85	0.07	0.20	0.14	57.58	134.86	0.057	2.08	4.19

Análogamente, para la boya ubicada en Caleta El Manzano, notamos que el modelo operacional MOSA-WW3 no logra representar el oleaje de la zona de manera correcta. De hecho, se alcanzan sobrestimaciones y errores superiores a los 2 m. Con estos valores, se evidencia que la representación de oleaje cerca de la costa no es semejante a la realidad. De todas maneras, se debe considerar que la profundidad de la ubicación de la boya IFOP sobre la batimetría utilizada por el modelo MOSA-WW3 es de 30 m, es decir, que olas de 10 a 12 s de periodo se encontrarían en un régimen de aguas intermedias. En dicha zona, la forma del fondo marino influye en la propagación del oleaje y adoptan mayor relevancia las parametrizaciones de disipación de energía inducida por el fondo, además de las interacciones entre triadas y cuádrupletas. Por otro lado, cabe destacar, que por temas de resolución el modelo MFWAM no dispone datos para la posición de la boya en la Caleta El manzano. Sin embargo, se toma una celda cercana al punto, específicamente en 42.083° S y 72.833° O. En la Tabla 9, se resumen los parámetros estadísticos para comparar la boya IFOP con el modelo operacional y el modelo MFWAM.

Es preciso señalar, que los periodos registrados por la boya IFOP demuestran posibles fallas en la toma de datos ya que se obtienen valores sobre los 20 s incluso valores superiores a 30 s. Por definición, éstos últimos no corresponderían a ondas producidas por el viento y debido a la protección geográfica sobre el oleaje es difícil encontrar olas de periodos largos. Estas fallas se pueden aludir a la configuración del instrumento, la cual tiene implicancias en los algoritmos de determinación de parámetros del oleaje. Bajo esta perspectiva, si se considera errónea cada medición donde se reconocen periodos superiores a 20 s, quedarían invalidados una gran cantidad de datos que también repercuten en la altura significativa y dirección del oleaje.

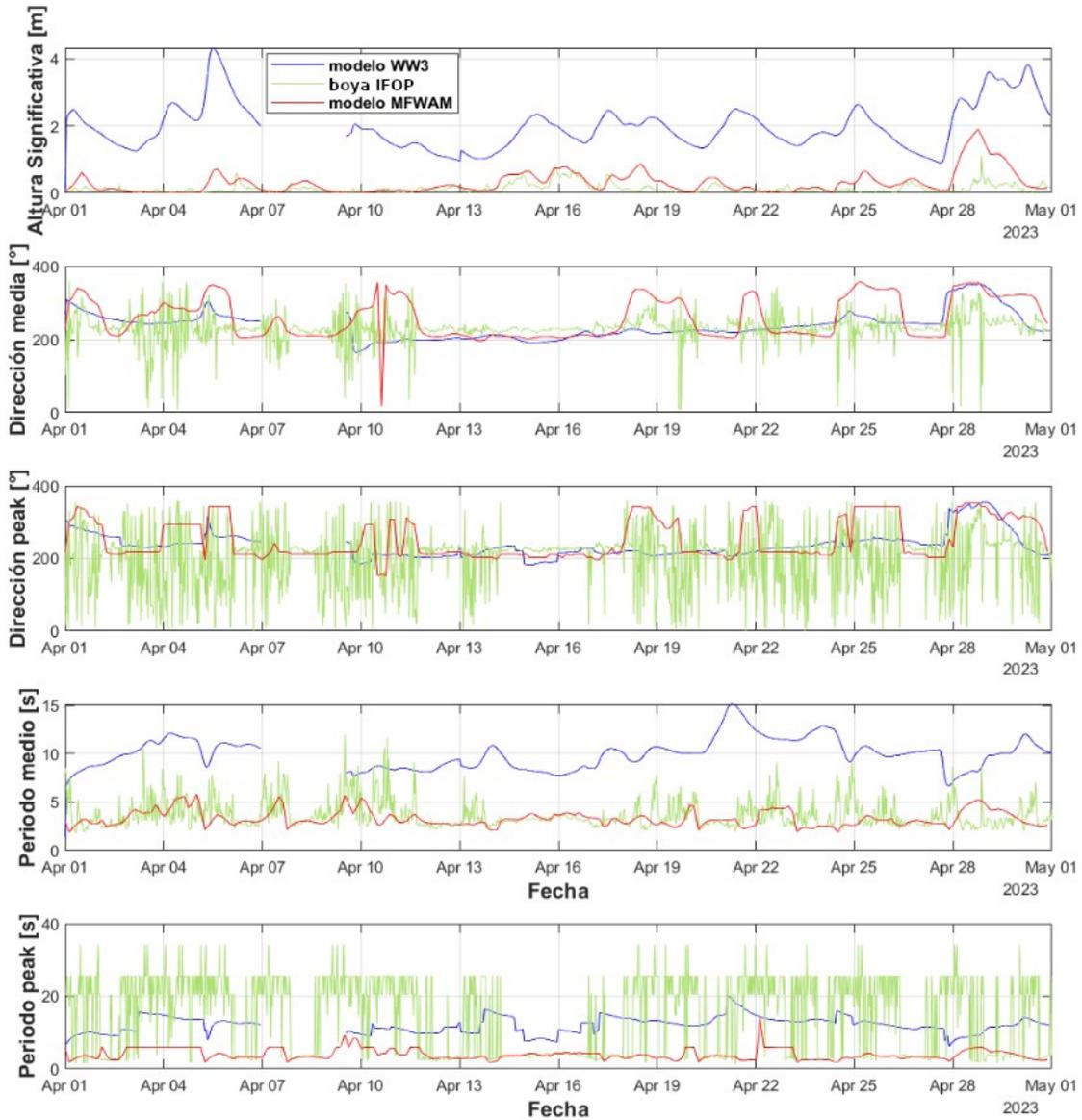


Figura 43: Comparación de series de tiempo para el mes de abril de H_s (primera fila), D_m (segunda fila), D_p (tercera fila), T_m (cuarta fila) y T_p (quinta fila) entre el modelo de oleaje (MOSA-WW3), boya IFOP y modelo de oleaje (MFWAM).

Tabla 9: Parámetros estadísticos obtenidos a partir de los parámetros espectrales de oleaje de los modelos MOSA-WW3 y MFWAM contra las mediciones de la boya IFOP.

	Boya IFOP – Caleta el Manzano														
	Hs (m)			Dm (°)			Dp (°)			Tm (s)			Tp (s)		
	R2	BIAS	RSME	R2	BIAS	RSME	R2	BIAS	RSME	R2	BIAS	RSME	R2	BIAS	RSME
MOSA-WW3	0.1	2.1	2.2	0.02	13.8	47.2	0.001	34.5	92.2	0.0004	6.8	6.9	0.004	-1.9	10.4
MFWAM	0.2	0.2	0.4	0.05	40.1	75.4	0.001	60.2	118.9	0.01	-0.3	1.7	0.012	-11.1	15.2

Por otra parte, decidimos emplear los productos de MFWAM debido a que se obtuvieron buenos estadísticos al momento de compararlos con las mediciones de la boya SHOA. De este modo, se analiza el comportamiento del oleaje simulado por dos pronósticos operacionales que abarcan la Región de Los Lagos y de Aysén. En general, para todos los días de pronóstico se tienen alturas de olas mayores en la parte oceánica por parte del modelo MFWAM. No obstante, en la zona protegida del oleaje las magnitudes de ola son similares. Aunque MOSA-WW3 tiene una mejor resolución para representar la confección costera del mar interior, se evidencia que en los lugares cercanos a la costa continental hay severas sobrestimaciones de alturas de ola.

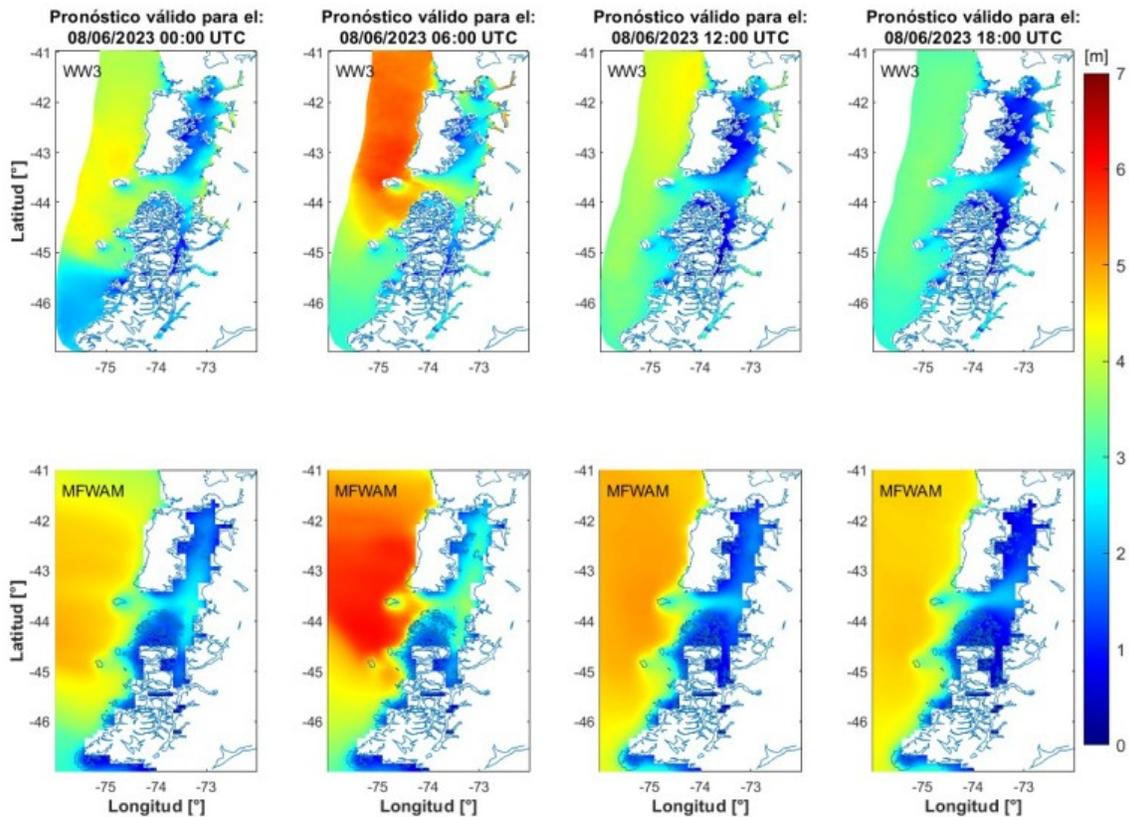


Figura 44: Comparación de H_s para 4 instantes distinto durante el día 10 de junio del 2023 para (panel superior) MOSA-WW3, y (panel inferior) MFWAM.

Al analizar consecutivamente el período de pronósticos analizados, notamos que la respuesta evolutiva del oleaje al entrar al mar interior de Chiloé se reproduce de diferentes maneras por parte de cada modelo operacional. Por un lado, MFWAM no representa las islas que están en el mar interior y las que se encuentran al sur de la Isla Grande de Chiloé, ya que se observa cómo hay oleaje sobre ellas. Además, este modelo solo considera la entrada de energía por el sur de Chiloé, ignorando la que ingresa por el Canal Chacao. Por otro lado, MOSA-WW3 si incluye estas islas y también el traspaso de energía por el sur y

norte de Chiloé. Por ejemplo, en el pronóstico del día 8 de junio se evidencia que la inclusión de energía entrante desde el Canal Chacao tiene repercusiones en la zona norte del mar interior (Fig. 44).

Finalmente, analizaremos la dispersión de altura significativa de ola, comparando los datos satelitales de NOAA-CoastWatch versus valores simulados por MOSA-WW3. Se hace distinción entre el total de datos observados y los que ocupan lugar dentro del mar interior de Chiloé (longitudes $> 74^\circ$ O). A partir de estos resultados, podemos deducir que MOSA-WW3 logra representar el oleaje de la zona de buena manera. En este sentido, la mayoría de los coeficientes de determinación superan los 0.7 cuando se analiza por satelitales separadamente (no mostrado aquí). Por otra, parte la representación de la variabilidad del oleaje tiene un ajuste de 0.89, una subestimación de 0.79 m y un error de 0.93 m cuando se consideran todos los puntos comprendidos de todos los satélites durante abril y mayo del 2023 (Fig. 45a). Para todos los satélites, se tiene una subestimación por parte del modelo, la cual aumenta a medida que las olas son más altas, es decir, que se tienen valores más cercanos a los registros cuando se trata de alturas pequeñas.

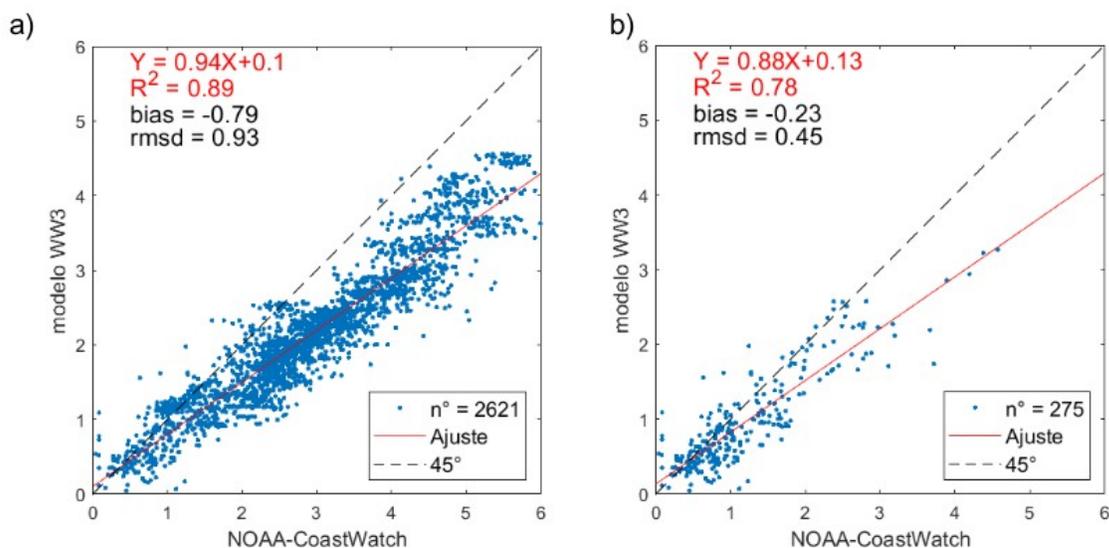


Figura 45: Comparación de gráficos de dispersión de H_s de los meses de abril y mayo. Comparación entre datos satelitales NOAA-CoastWatch y MOSA-WW3. (a) incluye todos los puntos comprendidos en el periodo temporal de análisis, y (b) sólo incluye los puntos que se encuentran dentro del Mar Interior de Chiloé.

De un total de 2621 mediciones realizadas durante los meses de abril y mayo que coinciden con el dominio simulado, tan solo 275 se ubicaron dentro del mar interior de Chiloé. De esta manera, sólo el 10% de las mediciones satelitales contribuye a caracterizar el oleaje de dicha zona. Con estos antecedentes, se observa un R^2 de 0.78, una subestimación de 0.23 m y error de 0.45 m (Fig. 45b). Por ende, existe una disminución del

sesgo y del error por parte del oleaje simulado en el mar interior en comparación con la parte oceánica. Cabe destacar, que solamente el satélite SARAL (sa) no tuvo mediciones para el mar interior.

Finalmente, es preciso señalar que los datos satelitales no suelen derivar productos de oleaje con un alto grado de fiabilidad en zonas cercanas a la costa. Entonces, debido a la confección geográfica de la zona de interés y a la gran cantidad de observaciones satelitales cerca de la costa, se podría tener casos de sobrestimación por parte de los satélites, que a su vez disminuirían la subestimación por parte MOSA-WW3.

6. DISCUSIÓN

6.1 Modelo operacional MOSA-CROCO.

Desde el comienzo del programa de “Desarrollo de sistema de predicción Sinóptico”, se ha puesto esfuerzo en la constante mejora del sistema operacional MOSA, evolucionando hacia un modelo estable y confiable en el tiempo. El modelo operacional MOSA-CROCO se mantiene funcionando desde 2017 hasta la fecha. Parte de su oficio es generar pronósticos diarios a 3 días de condiciones oceanográficas del mar interior de las regiones de Los Lagos y de Aysén. A lo largo de estos años, el sistema se ha sometido constantemente a mejoras y cambios en su estructura, a modo de mejorar su calidad y precisión. Durante los primeros años el foco estuvo puesto en crear un modelo que sea altamente estable, sacrificando en parte su calidad, pero a medida que ha pasado el tiempo, y los recursos humanos y computacionales detrás del proyecto han ido en aumento, se ha podido trabajar en aspectos más amplios para mejorar su calidad. Dentro de los principales cambios, destacan el aumento y cambio de configuración de los niveles verticales tipo sigma, pasando de 32 a 42 niveles, la incorporación de nuevas fuentes de agua dulce, ajustes a la máscara y mejoras en la batimetría (Fig. 46). Estas actualizaciones se ven reflejadas en significativos cambios observados particularmente a finales de 2017 donde se evidencia un mayor ajuste en la señal diaria de temperatura media y 2019 donde destaca la incorporación de la nueva versión del modelo oceánico ROMS-AGRIF, CROCO “*Coastal and Regional Ocean Community model*” asegurando el soporte del software.

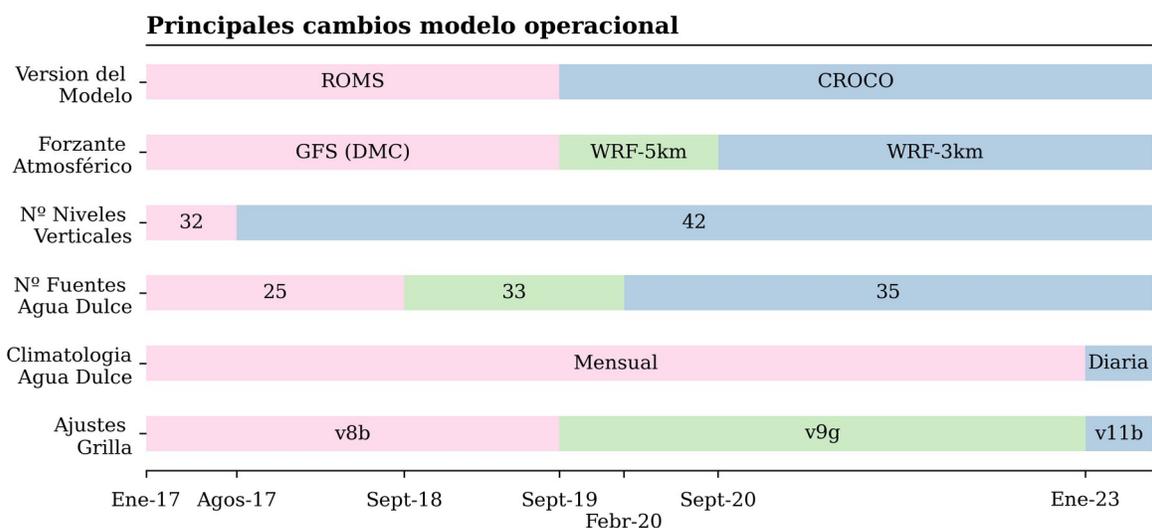


Figura 46: Principales cambios efectuados en la configuración del modelo operacional MOSA-CROCO a la fecha.

Durante la presente etapa del proyecto, se realizaron 2 cambios importante en la configuración del modelo. El primer cambio correspondió a actualizar la batimetría de la parte sur del dominio (Canal Moraleda, y sistema Jacaf-Puyuhuapi), y la zona del paso Desertores y la boca del Fiordo Comau en la zona norte del dominio. Esta batimetría fue evaluada en el objetivo 1 del informe anterior de este proyecto, y luego de comprobar que el modelo se mantenía estable fue incorporada al modelo operacional en enero del 2023. En este contexto, podemos destacar que el modelo ha sufrido 3 grandes cambios en la batimetría. Al inicio, el modelo era muy profundo en la zonas costeras con batimetrías de 70 m de profundidad, lo que resultaba en que no se podían reproducir los efectos de resonancia de la marea esperados en la zona de estudio con los máximos en la zona del Seno de Reloncaví (Aiken, 2008). Luego, la primera versión de la grilla mejorada y operacional (grilla v8b) fue usada hasta Septiembre del 2019, pues era una batimetría que privilegiaba la estabilidad del modelo en vez de las profundidades más realistas, lo que resultaba en una grilla muy somera en muchas zonas profundas como el seno del Reloncaví, la boca del Fiordo Comau, canal Moraleda o la Boca del Guafo. Luego, esta grilla fue mejorada centrándose en el seno del Reloncaví principalmente, logrando buenos ajustes en la zona norte, pero con las mismas falencias en la zona sur. Esta grilla (v9g) fue operativa hasta diciembre del 2022. Finalmente, la última grilla implementada (v11b), recoge información nueva disponible, y revisa nuevamente las principales zonas del dominio de estudio. Estos cambios, se reflejan en los análisis de nivel del mar, pues el error entre el modelo y los mareógrafos han disminuidos en el tiempo.

De la misma manera, en el afán constante de mejorar el sistema estuarino en la región y de reproducir adecuadamente la salinidad superficial se cambió la variabilidad de las entradas de agua dulce en el modelo. Desde la puesta en marcha del modelo operacional, conocíamos que una de las principales falencias del modelo era contar con fuentes fidedignas de flujos de agua dulce en la región. En este sentido, el modelo ha ido constantemente mejorado. En el comienzo, comenzamos con los aportes de 3 fuentes puntuales de la DGA con promedios mensuales, pues era lo único disponible. Luego, pasamos a 5 estaciones con 3 fuentes con promedios mensuales y 2 fuentes con promedios diarios. Así seguimos incorporando fuentes, hasta que finalmente pasamos de 25 a 35 fuentes puntuales con promedios diarios. En todo este tiempo, se contrataron asesorías para obtener un modelo de agua dulce que pudiera cubrir las necesidades de este modelo y de los otros desarrollados por el grupo de Oceanografía de IFOP-Putemún. Hasta que finalmente, se desarrolló el modelo FLOW, el cual contiene modelaciones desde 1980 hasta el 2022 con flujos diarios para más de 30000 cuencas de la Patagonia Chilena. A partir de estos datos, se realizó una climatología diaria, la cual fue integrada al modelo operacional también en enero del 2023. En términos significativos, esto no ha generado grandes cambios.

Cuando se analizan las transectas con CTD a lo largo del dominio de estudio, notamos mejoras en la columna de agua para el mes de Junio del 2023. Sin embargo, estos cambios pueden estar asociados al cambio del esquema de mezcla lateral Smagorinsky, que fue activado en Mayo del 2023, un mes antes de esta transecta. El paso siguiente para mejorar la circulación estuarina, es modificar la distribución de las fuentes puntuales en la columna de agua y restringirla solo a los primeros niveles verticales del modelo, ya que actualmente se distribuye homogéneamente en toda la columna de agua. Las pruebas preliminares, no incorporadas en esta etapa del proyecto se muestran esperanzadoras.

Finalmente, hay que destacar el enorme esfuerzo desarrollado en mantener operativo el sistema y en lograr disminuir gradualmente los errores en las diferentes variables oceanográficas. Al comienzo la mirada estaba centrada en procesos regionales, pero con el paso del tiempo el modelo ha mostrado un gran desempeño en reproducir procesos locales e incluso procesos de escala sinóptica, situación que motiva a seguir avanzando hacia la comprensión de los procesos oceanográficos que gobiernan los mares de la regiones de Los Lagos y de Aysén.

6.2 Modelo operacional MOSA-WRF.

Para el caso de la evaluación del sistema de pronósticos operacional MOSA-WRF, podemos evidenciar que el modelo ha logrado un alto grado de estabilidad, alcanzando más de 5 años de ejecución, con un rendimiento en el último periodo (2022-2023) por sobre el 99.82 %, presentando solo una ocasión en la cual el pronóstico falló. Los pocos fallos que se han experimentado, se dieron en etapas iniciales del proyecto, principalmente debido a problemas relacionados con los servidores desde donde se descarga la información global que alimenta las condiciones de borde del modelo.

Por otro lado, se han concentrado grandes esfuerzos en mantener y aumentar la red de monitoreo atmosférico, por parte del equipo de IFOP-Putemún. La cual, al día de hoy mantiene 7 estaciones operativas en Patagonia norte, midiendo diversos parámetros atmosféricos, entre los cuales se encuentra la dirección y magnitud del viento, con la cual se evaluó el pronóstico. Hay estaciones que han permanecido por más de 5 años sin problemas como Cucao y Melinka. A su vez, a lo largo del desarrollo de este proyecto ha sido necesario reubicar algunas estaciones, como la estación de Marimeli, que en su inicio fue instalada en un sector en el cual no lograba captar la variabilidad presente sobre el fiordo Reloncaví, sino más bien, procesos más locales asociados a zonas cordilleranas.

Por otro lado, se ha trabajado en mejorar la estructura de instalación de estos equipos, la que nos ha permitido posicionar los sensores de manera más adecuada según los estándares internacionales, principalmente el sensor de viento, el cual debe ir a 10 m sobre

la superficie del terreno idealmente para poder medir procesos representativos del lugar, además esta nueva estructura nos entrega un mayor grado de confianza y estabilidad para los sensores, ya que en ocasiones anteriores se experimentaron alguna caídas de estos equipos, asociadas a grandes intensidades del viento presentes en estos lugares.

Esta situación se experimentó también en el fiordo Comau, en donde de igual manera fue necesario re-ubicar la estación meteorológica y además adosar estos sensores a una estructura más firme y alta. Para el caso de Isla Tranqui, ocurrió algo similar, cambiando de posición la estación meteorológica del extremo oeste de la isla hacia el extremo este de esta misma, y así registrar procesos que estén vinculados al mar interior, principalmente en la zona de golfo de Corcovado. Finalmente, se agregó una estación en la parte noroeste de la Isla de Chiloé, en el faro Corona, perteneciente a la Armada de Chile. Destacando finalmente que la estación de Apiao también corresponde a las más antiguas, sin embargo de igual manera fue necesario mejorar la estructura, pudiendo elevar el sensor de viento a una altura mas adecuada y así mejorar los registros.

La metodología de evaluación utilizada en este informe incluyó la rotación de ejes a los ejes de máxima varianza, también conocida como análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), se utiliza en el caso de estudio de los vientos para identificar los patrones dominantes de variabilidad en los datos y reducir la dimensionalidad del problema. En el contexto de los vientos, el PCA permite identificar las direcciones principales de variación en los datos, es decir, los ejes que explican la mayor cantidad de varianza en los patrones de viento observados. Esto es especialmente útil cuando se trabaja con datos de múltiples estaciones o puntos de medición, ya que permite identificar los patrones comunes en la variabilidad del viento en diferentes ubicaciones. Mediante la rotación de los ejes de coordenadas a los ejes de máxima varianza, el PCA permite expresar los datos en un nuevo sistema de coordenadas donde las componentes principales (o ejes principales) representan las direcciones de mayor variabilidad en los datos. Esto simplifica la interpretación y análisis de los patrones de viento, ya que se pueden identificar y estudiar los modos principales de variabilidad.

En términos de los estadísticos, se utilizaron diversos indicadores para evaluar MOSA-WRF, considerando distintos parámetros a la hora de resolver la dinámica atmosférica y así tener una idea más general del desempeño del modelo. En primer lugar se evaluó si los resultados del modelo presentan algún error de sesgo sistemático, por lo tanto se evaluó la diferencia promedio de los valores modelados con respecto a los observados. También es interesante explicar como resuelve el modelo la variabilidad de los datos observados, y para esto se aplicó el cociente entre las desviaciones estándar y así conocer en que proporción el modelo está subestimando o sobrestimando la amplitud de las observaciones.

Por otro lado se tiene el coeficiente de correlación de Pearson, con el cual podemos evaluar si existe una relación lineal entre el modelo y las observaciones, para luego tomar una medida de la discrepancia del modelo y los valores reales asociada a la raíz del error cuadrático medio, finalmente se obtuvo una métrica para evaluar la habilidad del modelo en comparación con una referencia que en este caso fue la desviación estándar de los datos observados.

Este estadístico fue utilizado como referencia ya que es una medida de la dispersión o variabilidad de los datos observados. En el caso de las componentes del viento, representa la variabilidad natural y esperada en las direcciones y magnitudes del viento en una determinada ubicación y período de tiempo. Utilizar la desviación estándar como referencia permite evaluar la capacidad del modelo para capturar y reproducir esta variabilidad. Además el resultado del *skill score* del RMSE se puede interpretar de manera intuitiva. Un valor positivo indica que el modelo tiene una habilidad relativa mayor que simplemente utilizar la desviación estándar como predicción. Un valor negativo indica que el modelo tiene una habilidad relativa menor que la desviación estándar, lo que indica una falta de precisión en la reproducción de la variabilidad observada.

Los resultados del modelo nos indican que MOSA-WRF tuvo en desempeño favorable para reproducir la variabilidad del eje de máxima varianza en todos los casos, mostrando un aumento de esta habilidad para los promedios diarios en comparación a los promedios horarios, esto puede estar fuertemente asociado a la variabilidad de alta frecuencia, ya que los promedios horarios suelen tener una mayor variabilidad en comparación con los promedios diarios. Esto se debe a que los promedios horarios capturan cambios más rápidos en las condiciones del viento, como ráfagas y cambios en la dirección, además esto puede dificultar la precisión de los modelos de predicción, lo que resulta en un *skill score* más bajo en comparación con los promedios diarios, que tienen una variabilidad promediada en un período más largo. Por otro lado, los promedios horarios pueden ser más sensibles a errores de medición debido a la mayor frecuencia de muestreo. Pequeños errores en la medición de la velocidad y dirección del viento pueden tener un impacto más significativo en los promedios horarios en comparación con los promedios diarios.

La modelación del viento a nivel horario puede ser más desafiante debido a la mayor variabilidad espacial y temporal. Los cambios rápidos en la dirección y velocidad del viento a nivel horario pueden estar influenciados por factores locales, como la topografía y la rugosidad del terreno. Estos factores pueden introducir mayor complejidad en la modelación y dificultar la precisión de los modelos, lo que se refleja en un *skill score* más bajo.

Cabe mencionar que la mayoría de las estaciones presentó un eje de máxima varianza en torno al eje norte-sur, sin embargo en Marimeli la máxima variación de los datos se dio en el eje oeste-este, esto se atribuye principalmente a las condiciones geográficas, sobre todo de las zonas cordilleranas como Marimeli y Comau, las cuales modulan el viento en función de la canalización que se da producto de los valles y/o fiordos presentes. En el caso de Marimeli, el fiordo Reloncaví está orientado de oeste-este y para el caso de Comau, el fiordo tiene una orientación norte-sur. Es importante destacar que el modelo logró reproducir de manera aceptable este eje de máxima varianza.

En general los mejores resultados se presentaron en Cucao y Melinka, tanto para las componentes U y V. Estas son las estaciones con mayor registro histórico y además con una fuerte influencia oceánica, por lo cual esto es esperable ya que la dinámica atmosférica proviene desde el oeste encontrándose sin obstáculos antes de llegar a estos sectores. Luego les siguen las estaciones de Apiao y Tranqui, mostrando también una alta destreza por parte del modelo para resolver la variabilidad tanto en el eje principal como en el secundario. Estos sectores son zonas de mar interior en donde hay una topografía principalmente abierta por lo cual el modelo logra resolver esta configuración influyendo positivamente en los resultados.

En el caso de Corona, se observa una habilidad inferior para reproducir las componentes del viento teniendo una leve mejora en la precisión del modelo para la componente U en comparación con la desviación estándar como referencia quedando un poco más atrás la habilidad para reproducir la componente V. Esto quiere decir que el modelo no es capaz de capturar adecuadamente los patrones y la variabilidad de las observaciones y puede relacionarse con errores sistemáticos o sesgos en las predicciones del modelo. A pesar de ser una estación instalada en una zona con mucha influencia oceánica en donde no existe mayor obstáculo para los procesos que vienen desde el océano, no fue resuelta de la manera que se esperaba, esto puede atribuirse principalmente al largo de la serie ya que esta corresponde a la de menor data histórica. Este concepto puede influir en los resultados de una evaluación para vientos, ya que afecta la estabilidad estadística, la variabilidad interanual, la estacionalidad, los ciclos y las tendencias a largo plazo. Un largo de serie mayor proporciona una base de datos más sólida y confiable para evaluar las habilidades y limitaciones del modelo en la predicción del viento.

Finalmente, para las estaciones ubicadas en sectores cordilleranos como Marimeli y Comau el *skill score* fue levemente mayor a 0 en las componentes que representan los ejes de máxima varianza, oeste-este y norte-sur respectivamente, indicando que el modelo tuvo una habilidad relativa igual a la referencia. El modelo no mejora la precisión de la predicción en comparación con la variabilidad natural representada por la desviación estándar de los datos observados, en el caso de la componente U en Comau y V en

Marimeli el modelo presenta una habilidad relativa menor que la referencia indicando una precisión menor a la variabilidad natural de los datos. La menor habilidad presente en el modelo para resolver la variabilidad de las estaciones de Marimeli y Comau en comparación al resto, se debe principalmente a la dificultad del modelo para resolver zonas de topografía compleja, como la que esta presentó en estos sectores, debido a la fricción con la superficie, la presencia de valles cordilleranos y la cobertura de nieve presente en las montañas aledañas, da paso a procesos locales a una escala espacial y temporal menor, la cual es difícil resolver por el modelo debido a su resolución horizontal y parametrizaciones físicas para procesos locales.

6.3 Modelo biogeoquímico MOSA-PISCES.

Los modelos biogeoquímicos desempeñan un papel esencial al abordar las limitaciones inherentes a la disponibilidad de datos en áreas como la Patagonia Chilena. En este contexto, donde la obtención de datos biogeoquímicos se realiza a través de muestreos discretos en profundidades específicas, los modelos proporcionan una herramienta valiosa para comprender y complementar la falta de información detallada. Los muestreos discretos con botellas oceanográficas son efectivos, pero también son limitados en términos de su cobertura espacial y temporal, al igual que los datos satelitales que en la zona de Patagonia norte tiene el problema de la dominancia en la cobertura nubosa durante gran parte del año. Los modelos biogeoquímicos, por otro lado, permiten extrapolar y generar datos continuos en todo el espacio y a lo largo del tiempo, lo que facilita la visualización de patrones y tendencias a escalas que no serían posibles de obtener únicamente a través de muestreos directos. Además, los modelos biogeoquímicos son una herramienta valiosa para mejorar nuestro conocimiento sobre los sistemas marinos, llenando los vacíos de información que surgen de las limitaciones en la toma de datos directos. Sin embargo, es importante reconocer que los modelos también tienen sus propias limitaciones y suposiciones, y deben ser validados y calibrados cuidadosamente con datos observacionales para garantizar su precisión y utilidad.

Si bien en la actualidad existen modelos biogeoquímicos globales que abarcan amplias áreas oceánicas, su baja resolución espacial limita su capacidad para capturar características batimétricas y detalles específicos de la circulación y por ende en la biogeoquímica de zonas costeras. Además, en áreas costeras como la región de Patagonia Norte, estos modelos globales no suelen incluir las fuentes de agua dulce que influyen en la dinámica de la zona. Es por ello que para obtener resultados más precisos y relevantes en estas áreas, es necesario recurrir a modelos de mayor resolución espacial que incorporen características batimétricas detalladas y consideren las fuentes de agua dulce que desempeñan un papel crucial en la dinámica de la región costera, ya que influyen las

concentraciones de nutrientes, capa fótica, productividad primaria, intercambio de flujos océano-atmósfera como oxígeno, estratificación y patrones de circulación.

La región de Patagonia norte se destaca por ser uno de los sistemas estuarinos más extensos a nivel mundial, como señala el estudio de Dávila et al. (2002). Debido a su configuración estuarina, el aporte de agua dulce proveniente de ríos juega un papel fundamental en el funcionamiento del ecosistema costero. En este contexto, una variable de gran importancia y sensibilidad para el modelo biogeoquímico es la concentración de hierro. En esta ocasión, se utilizó un promedio para los ríos que no tenían datos disponibles. Sin embargo, es importante destacar que existen otras variables igualmente relevantes que se espera abordar en las etapas futuras de investigación. Entre estas variables, se encuentra la concentración de carbono orgánico particulado y disuelto. Estas variables son de suma importancia en términos biogeoquímicos, ya que desempeñan un papel crucial en el reciclaje de nutrientes y, de manera indirecta, en la utilización del oxígeno disuelto, además de tener un impacto en la profundidad de la capa fótica. Sin embargo, es importante resaltar que una de las principales limitaciones que enfrentamos radica en la escasa disponibilidad de información acerca de estas variables en la región de estudio.

En la zona oceánica de Patagonia norte, las masas de agua juegan un papel fundamental en la dinámica y los procesos biogeoquímicos de la región. Donde las principales masas de aguas que entran por la boca del Guafo a la zona de Patagonia norte son el Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW) y el Agua Subantártica (SAAW). El ESSW se caracteriza por presentar altos valores de salinidad (34.9 PSU) y concentraciones elevadas de nitrato (20-32 μM), pero con un bajo contenido de oxígeno disuelto que varía entre 2 y 3 $\mu\text{mol L}^{-1}$ (Silva et al., 2009). Por otro lado, el SAAW se distingue por tener una salinidad en el rango de 33-33.8 PSU y concentraciones de nitrato que oscilan entre 3 y 20 μM . Además, el SAAW presenta un alto contenido de oxígeno disuelto (Sievers & Silva, 2008). El SAAW tiende a desplazarse en la columna de agua hasta aproximadamente 100 m de profundidad, mientras que el ESSW se sumerge a profundidades más profundas, alcanzando hasta los 150 m. En los primeros 20 m de la columna de agua, se describe la presencia de una capa de agua dulce que puede interactuar con el SAAW, generando una masa de agua modificada entre los 20 y 100 m de profundidad.

En los diagramas T-S correspondientes a la zona de Chiloé, se pudo identificar la presencia de la masa de agua Subantártica (SAAW), tanto en los datos observados como en los modelados. Por otro lado, en los diagramas T-S de la zona de Aysén, se observó la presencia del agua modificada, que es una mezcla entre agua estuarina y la masa de agua Subantártica. Sin embargo, se observó que en general los datos de oxígeno disuelto estuvieron sobre-estimados por el modelo en comparación con los valores observados. Esta discrepancia podría indicar que el modelo no ha logrado ajustarse completamente a los

datos observados. Es importante considerar que los modelos biogeoquímicos pueden ser afectados por diversas fuentes de incertidumbre, como la precisión de los datos iniciales, las tasas de procesos biológicos y químicos, y las condiciones de borde. Las diferencias entre los datos observados y los valores modelados de oxígeno disuelto podrían sugerir la necesidad de realizar ajustes y refinamientos en el modelo para lograr una mejor concordancia con la realidad observada, sin embargo la tendencia de disminución de oxígeno se observa claramente.

La clorofila superficial se ha utilizado tradicionalmente como un indicador indirecto de la biomasa fitoplanctónica en los océanos y cuerpos de agua. Sin embargo, algunas investigaciones recientes, como los estudios realizados por Lara et al. (2017) y Vázquez et al. (2021), han planteado la posibilidad de utilizar la fluorescencia en lugar de la clorofila como una alternativa para estimar la biomasa fitoplanctónica. Esto se debe a que en áreas con alta carga de sedimentos suspendidos y materia orgánica, como la zona del seno de Reloncaví, se ha observado que estos factores pueden afectar negativamente la precisión de las mediciones de clorofila realizadas por satélites, como se señala en el estudio de Vázquez et al. (2021). El uso de la fluorescencia como *proxy* de la biomasa fitoplanctónica puede proporcionar ventajas en términos de reducir la interferencia de factores como los sedimentos y la materia orgánica en las mediciones realizadas por satélites. Sin embargo, esto también puede presentar desafíos en la comparación con los resultados del modelo biogeoquímico, ya que la fluorescencia y la clorofila son dos variables distintas que responden de manera diferente a las condiciones ambientales, por ende los patrones pueden ser distintos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, en la comparación entre los datos satelitales y el modelo, se observó que el modelo logró reproducir de manera efectiva el patrón de distribución de la clorofila observado durante la temporada de verano. Esto se evidenció en la presencia de altos valores de clorofila en la zona de Reloncaví, lo cual concuerda con las observaciones y descripciones realizadas por Vázquez et al. (2021) y Lara et al. (2017). La zona de Reloncaví es un sistema semi-cerrado con características estuarinas que favorecen la productividad primaria, lo que se refleja en la concentración de clorofila. Además, durante la temporada de verano, se observaron también altos valores de clorofila en la zona oceánica de Chiloé. Aunque no se realizaron análisis específicos en este estudio, algunos autores como Vázquez et al. (2021), Saldías et al. (2019) y Narváez et al., (2019) han sugerido que durante el verano en esta región pueden ocurrir eventos de surgencia costera, que pueden contribuir a la alta productividad primaria y a las concentraciones elevadas de clorofila observadas en el modelo.

Finalmente, otra limitación significativa en la utilización de datos satelitales para describir la "productividad primaria" en la región es la presencia frecuente de cobertura de

nubes. Esta limitación obstaculiza la captura precisa de variables importantes como la clorofila superficial y la fluorescencia. Como resultado, se vuelve difícil realizar una comparación efectiva entre el desempeño del modelo y los datos observados durante las temporadas de otoño e invierno. Además, esta restricción se extiende más allá de esas estaciones, ya que la presencia constante de nubes sobre la región de Aysén a lo largo del año también limita la capacidad de describir con precisión las dinámicas de la productividad primaria.

6.4 Modelo operacional MOSA-MAG.

En la etapa VI de este proyecto se inició el diseño y evaluación de un modelo basado en CROCO (versión actual de Roms-Agrif) en la región de Magallanes, buscando obtener un diagnóstico confiable sobre su factibilidad de implementación en esta región. Los pasos para su implementación fueron similares a los realizados en el pasado con el modelo de pronóstico operacional MOSA-CROCO para las regiones de Los Lagos y de Aysén. Para ello, lo primero fue abordar las barreras que podemos encontrar en este objetivo. A diferencia de las regiones de Los Lagos y de Aysén, donde actualmente opera el modelo de pronósticos MOSA-CROCO, en la región de Magallanes existe una mayor incertidumbre sobre los procesos dinámicos y su variabilidad en la zona. El modelado y la predicción de los océanos costeros es un desafío importante para la comunidad científica debido a la dinámica específica y rica de esas regiones, y causa de los diversos acoplamientos con la atmósfera inferior e intercambios con la regiones cercanas a la costa y mar adentro (Schiller & Brassington, 2011).

Aunque se han realizado diversos estudios que han abordado la hidrodinámica de la región, generalmente se opta por enfoques altamente locales, o sobre la incidencia de las propiedades conservativas del agua sobre organismos específicos, considerando que la región posee una importante industria pesquera y una creciente salmonicultura. Estos estudios generalmente son acotados espacial y temporalmente en alguno de los micro sistemas presentes en la región. No obstante, existen estudios que han englobado una mirada regional sobre procesos en la zona cuyos trabajos identifican patrones hidrográficos y de propagación de marea en la zona (Silva & Calvete, 2002; Salinas et al., 2004), así como también algunos estudios basados en modelos numéricos (Brun et al., 2020; Cucco et al., 2022). No obstante, se carece de herramientas que permitan conocer la evolución sinóptica del sistema. Es ahí donde recae el valor de la iniciativa del proyecto, donde un modelo operacional en la zona puede lograr un aporte considerable al conocimiento de los procesos presentes, como también de permitir adelantar escenarios críticos ambientales, haciendo de MOSA-MAG una herramienta potencialmente valiosa.

Las evaluaciones muestran que si bien el modelo desarrolla una estacionalidad en temperatura y salinidad, aún presenta importantes desajustes. La temperatura se muestra en general 2 °C bajo lo observado, tanto en perfiles de CTD como en productos satelitales. Esto puede ser atribuido a diversos factores que impactan la temperatura del modelo. Uno de ellos, puede ser las condiciones de bordes utilizadas, que tal como muestran las diferencias con datos satelitales de VIIRS, se acentúan mayormente en el borde oriental, especialmente en meses de invierno y otoño. Por otra parte, el ingreso de flujos de calor a la superficie del océano en el modelo es altamente sensible al modelo atmosférico utilizado y a su resolución, En nuestro caso, usamos GFS, un producto que cuenta con una resolución de 0.25° (~25 km), lo cual podría introducir valores de grilla demasiado alejados a los correspondientes de la máscara del modelo. Por su parte la salinidad, se presenta generalmente subestimada. Este es un rasgo esperable, puesto que el flujo de descargas de ríos presente en todo el dominio es poco conocido, aún usando una herramienta como FLOW, las dimensiones del dominio y la presencia de los Campos de Hielo Sur y de Cordillera de Darwin hacen de esta una tarea más compleja, además del hecho que la incorporación de volumen extra al modelo suele traer inestabilidad. Cuando observamos la evolución temporal de la temperatura (con respecto a datos satelitales de AVHRR), se destaca que la señal estacional está bien representada ($r = 0.87$), lo que permite afinar la mirada ya en rasgos mas pequeños del modelo. Esta misma comparación nos confirma que el error cuadrático medio rodea los 2.7 °C, aunque es justo mencionar que debido a la gran cantidad de datos de MOSA-MAG con respecto a los disponibles por AVHRR, su desviación estándar es mucho mayor, introduciendo cierto ruido en estos valores.

Evaluaciones usando perfiles de CTD del programa de marea roja de IFOP también nos muestran como el modelo se comporta en la columna de agua. A pesar de que muchos de los puntos en el modelo no suelen coincidir con el perfil de CTD (ya se ha explicado que datos muy costero pueden no estar bien definidos en el modelo, y en su lugar representar un lugares más profundos), es evidente que a modo general, las propiedades de la columna de agua son bien representadas por estos datos, lo que indica que no solo los datos de salinidad son subestimados en la superficie, si no también en profundidad, mientras que el sesgo de la temperatura también suele mantenerse en la columna de agua. Sin embargo, al revisar perfil por perfil (resultados no mostrados en este informe), notamos que los perfiles en el Estrecho de Magallanes suelen ser los más ajustados en salinidad y en temperatura, (manteniendo el sesgo de 2 °C), representando correctamente las estructuras verticales.

En la siguiente etapa se esperan varios cambios que aborden estos problemas. Por una parte se empezará a utilizar un nuevo dominio con una nueva mascara, que incorporará cambios en la batimetría y algunos ajustes en la línea de costa a modo de permitir una representación más realista y funcional del modelo. En específico, se espera trabajar la zona de Seno Skyring como un sistema semi-cerrado, con una conexión única a través del Canal

Fitz Roy. Se ha observado que la apertura por Canal Gajardo en modelo permite un ingreso de agua no realista, perturbando e impactando toda la dinámica interior del sistema Skyring-Otway. Por otra parte, también se espera incorporar un modelo operacional atmosférico de alta resolución basado en el modelo MOSA-WRF, diseñado para este dominio que sea capaz de mejorar los ingresos de flujos de calor en la superficie del océano en MOSA-MAG. De igual modo, se realizarán pruebas de sensibilidad en algunas parametrizaciones con el objeto de mejorar la mezcla vertical.

Los resultados a la fecha muestran que es posible generar pronósticos oceanográficos a un horizonte de 3 días con el modelo MOSA-MAG de 1.5 km de resolución horizontal, el cual incluye temperatura, salinidad y corrientes. Sin embargo, con las capacidades de computo actuales, MOSA-MAG supone una exigencia crítica a los servidores disponibles. Se sugiere aumentar la capacidad de computo para la correcta implementación de este modelo en la región de Magallanes y a su vez, permita desarrollar a futuro modelos anidados de mayor resolución en áreas específicas como lo son el Seno Skyring o el golfo Almirante Montt. Estas zonas al día de hoy se presentan como sistemas altamente frágiles y fuertemente influenciados por masas glaciares de los cuales se dispone de escasa información oceanográfica. Además se vuelve crítico implementar un modelo atmosférico de alta resolución para este dominio que sea capaz de resolver la localización de los distintos cuerpos de agua interiores de la zona y de los canales principales, cuyas dimensiones suelen ser un orden de magnitud menores que la resolución de modelos atmosféricos globales.

No obstante, aún cuando la componente operativa del modelo pueda llevarse a cabo, todavía existen grandes brechas en la disponibilidad de datos *in situ*, los cuales son cruciales para el ejercicio de la modelación. Esto es una materia sensible en el desarrollo de este proyecto debido a la poca disponibilidad de información oceanográfica en la zona. Esta información permite conocer la dinámica de la zona, lo cual ayuda a mejorar la aproximación con la cual se construye el modelo, para luego ayudar a su calibración y posterior evaluación. En el caso de los modelos operacionales, se hace altamente deseable contar con monitoreos que otorguen datos en tiempo (casi) real, con los cuales se pueda evaluar la magnitud diaria de los errores del modelo. Finalmente, la existencia de estos datos podrían permitir realizar asimilación de datos en el modelo, lo cual permite mejorar las condiciones iniciales del pronóstico (Flather, 2000). No obstante, esto conlleva un aumento de los recursos necesarios, tanto en capital humano avanzado como en la capacidad de computo requerida.

6.5 Modelo oleaje MOSA-WW3

Un modelo de oleaje basado en el modelo WW3 fue implementado para la región de Los Lagos y Aysén, al cual nos referiremos como MOSA-WW3. El desempeño del modelo fue evaluado utilizando diferentes bases con observaciones de boyas de oleaje y satelitales, además de la inclusión del modelo operacional de oleaje basado en el modelo MFWAM para abril y mayo del 2023. En general, se logra representar de buena manera el oleaje del dominio, ya que los valores de altura de ola significativa demuestran una variabilidad acorde a los productos satelitales ($r = 0.89$) y valores cercanos a las mediciones de la boya SHOA (sesgo = -0.09 m). En cuanto a las diferencias, estas se evidencian al comparar con NOAA-CoastWatch y con el modelo MFWAM, ya que ambas resultan en alturas de ola mayores a las simuladas por el modelo MOSA-WW3. De igual forma, se encuentran grandes diferencias en la representatividad de la dirección y periodo del oleaje debido a que sus estadísticos demuestran que la mayor parte del tiempo se sobrestiman las magnitudes y no se logra representar de manera adecuada su variabilidad temporal registrada por la boya SHOA.

En cuanto a las limitaciones del nuevo modelo operacional MOSA-WW3, cabe destacar que existe la posibilidad de mejorar la representación costera con una nueva iteración en la grilla no estructurada basada en triángulos. Se recomienda realizar una grilla con mayor refinación cercana a la costa, donde se debe evitar que los ángulos interiores de los triángulos sean obtusos. En otras palabras, los triángulos deben ser lo más equiláteros posible. Esto debería traer beneficios en los procesos de transferencia de energía y cambios de dirección del oleaje del mar interior. Por consiguiente, se debe buscar el equilibrio entre el aumento de resolución y los tiempos de cómputos del modelo.

Otra limitación corresponde a las sobre-estimación de altura de ola en lugares cercanos a la costa continental. Esto se evidencia en la comparación con la boya IFOP en caleta El Manzano, donde las alturas registradas son superadas todo el tiempo en más de 2 m por parte del modelo MOSA-WW3. Asimismo, en los pronósticos se evidencia un aumento de Hs en lugares donde difícilmente se desencadenen alturas superiores a 3 m como las simuladas. Cabe destacar, que en el mismo manual del modelo WW3 v6.07 distintos autores recomiendan no utilizar el modelo WW3 en aguas intermedias o someras. No obstante, existen distintas parametrizaciones físicas disponibles en el modelo para considerar de manera aproximada procesos que se desarrollan en estas zonas.

Entre las proyecciones del estudio, cabe mencionar la necesidad de realizar análisis de sensibilidad mediante la inclusión de diferentes parametrizaciones físicas relacionadas con procesos de crecimiento de oleaje, crecimiento y disipación por viento, disipación por fondo, interacción ola-ola, interacciones no lineales entre cuadrupletas y triadas, entre otras.

Además, se propone modificar coeficientes de estas parametrizaciones físicas mejorar la redistribución de energía y representación de procesos de disipación. Todo esto considerando en que se tiene a libre disposición los datos de la boya SHOA y del IFOP y productos satelitales NOAA-CoastWatch para tener una referencia instrumental.

En resumen, se destaca que los resultados encontrados tienen una representación adecuada de lo que es la variabilidad y magnitud de la altura significativa del oleaje. Es más, las múltiples combinaciones de parametrizaciones físicas determinan un gran potencial para no solo mejorar la representación de la altura de ola, si no que también lo que es dirección y periodo de ola. Finalmente, con un modelo operacional de oleaje más preciso y exacto traería consecuencias positivas sobre las actividades marítimas como lo es la navegación, acuicultura e investigaciones.

7. CONCLUSIONES

Se ha evaluado el desempeño del modelo operacional MOSA-CROCO mediante una validación espacio-temporal de las variables temperatura, salinidad, altura del nivel del mar y corrientes pronosticadas entre 2017 y 2023. Los resultados reflejan el buen desempeño del modelo en términos de estabilidad. El modelo ha mantenido su habilidad de reproducir de manera óptima la variabilidad estacional de la temperatura superficial, tanto en fase como en amplitud, manteniendo un mayor ajuste en el sector de mar abierto disminuyendo gradualmente hacia mar interior con correlaciones suficientemente significativas. En relación a la salinidad superficial se revelaron diferencias significativas al evaluar con diferentes productos globales, siendo el modelo ORAS5, el más similar a MOSA-CROCO. Así mismo, la columna de agua se ajustó adecuadamente a los datos obtenidos del crucero oceanográfico que cubre desde el Seno del Reloncaví hasta la Laguna de San Rafael, tanto en marzo como en junio del 2023. Por otra parte, el análisis sobre la altura del nivel del mar en diferentes estaciones a lo largo del dominio de Chiloé-Aysén muestra un mejor desempeño en la zona norte del dominio con correlaciones sobre 0.9, mientras que las estaciones más al sur (Puerto Chacabuco y Puerto Aguirre) mostraron valores de ~ 0.8 . Por último, las componentes de la corriente observadas en canal Costa, boca del Guafo y fiordo Comau muestran una alta coherencia en su estructura, los ejes de máxima varianza coinciden con las corrientes pronosticadas por el modelo.

En el caso de MOSA-WRF, la evaluación del sistema de pronósticos operacionales MOSA-WRF ha demostrado un alto grado de estabilidad y operatividad durante más de 5 años, con un rendimiento superior al 99.82 % en el último período evaluado. Además, cabe destacar que el equipo de IFOP-Putemún ha realizado esfuerzos significativos para mantener y expandir la red de monitoreo atmosférico, lo que ha permitido obtener datos fiables para evaluar el pronóstico del viento del modelo. En este sentido, se han realizado ajustes en la ubicación y estructura de las estaciones para mejorar la captura de la variabilidad del viento y garantizar la estabilidad de los sensores. Se espera poder seguir expandiendo la red, instalando nuevas estaciones en posiciones estratégicas, logrando una mejor representatividad, principalmente en la región de Aysén.

Los resultados mostraron que MOSA-WRF tuvo un buen desempeño en la reproducción de la variabilidad del viento, especialmente en los promedios diarios. Sin embargo, se observó una menor habilidad del modelo para resolver la variabilidad en los promedios horarios, lo cual puede estar relacionado con la mayor variabilidad espacial y temporal, así como posibles errores de medición. En general, las estaciones con mayor registro histórico y una fuerte influencia oceánica mostraron los mejores resultados, mientras que las estaciones en zonas cordilleranas presentaron una habilidad relativa menor

para reproducir la variabilidad del viento debido a la complejidad de la topografía y los procesos locales. En resumen, aunque MOSA-WRF ha logrado un alto grado de estabilidad y operatividad, se requieren mejoras en la resolución de zonas de topografía compleja y en la captura de la variabilidad en los promedios horarios. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para futuras mejoras en el modelo y la evaluación del viento.

Por otra parte, el modelo biogeoquímico MOSA-PISCES ha sido capaz de reproducir la disminución de los niveles de oxígeno disuelto en profundidad, lo cual es un aspecto positivo. Sin embargo, es importante destacar que los valores de oxígeno disuelto generados por el modelo están sobre-estimados en comparación con los datos observados. Esta discrepancia sugiere que podría ser necesario realizar ajustes en las tasas de procesos biológicos y químicos dentro del modelo para lograr una mejor concordancia con las observaciones reales.

En cuanto al nitrato, el modelo ha presentado altas concentraciones en su simulación. Esto podría deberse a una variedad de factores, como la precisión de los datos iniciales y las tasas de procesos biogeoquímicos dentro del modelo. Es esencial realizar un análisis detallado para identificar las posibles causas de estas discrepancias y realizar los ajustes necesarios en el modelo para mejorar la precisión de las simulaciones de nitrato.

En relación a la clorofila, aunque el modelo muestra bajas concentraciones, es alentador que sea capaz de replicar los patrones espaciales y temporales observados. Esto indica que el modelo puede capturar las tendencias generales de la distribución de la clorofila superficial en la región de estudio. Sin embargo, es importante continuar evaluando y validando el modelo con datos adicionales para asegurarse de que esté capturando con precisión los patrones observados.

Por otra parte, se implementó un modelo operacional de pronósticos oceanográficos en la región de Magallanes denominado MOSA-MAG. El modelo, que lleva corriendo desde mediados de 2021, genera pronósticos diarios a 3 días de temperatura, salinidad y corrientes y sus resultados ya se encuentran disponibles en el sitio web CHONOS (<https://chonos.ifop.cl/mosa/?domain=magallanes>). Las evaluaciones muestran que si bien se reproducen patrones estacionales del campo de masa, la temperatura suele estar 2 °C grados bajo lo observado (el modelo es más frío), mientras que la salinidad suele estar subestimada, especialmente en la superficie de las zonas más estuarinas. Las zonas con mejores ajustes son el estrecho de Magallanes, donde las estructuras verticales suelen estar bien representadas (pero desajustada en temperatura). En la siguiente etapa se espera implementar un modelo atmosférico diseñado para este dominio así como varios cambios en el dominio y en las parametrizaciones, a modo de mejorar la calidad de los pronósticos.

Finalmente, mencionar que se logró implementar de manera operacional un modelo de oleaje para la región de Los Lago y Aysén, aumentando la cantidad de modelos disponibles para estas regiones. Si bien, el modelo se encuentra en su etapa inicial y aún no tiene un buen desempeño se espera que este vaya mejorando durante la ejecución de la próxima etapa de este proyecto. Para esto, se revisará si la grilla no estructurada actual, así como sus parametrizaciones especialmente en aguas someras es la más adecuada.

Finalmente, hay que mencionar que las salidas de los modelos operacionales de pronósticos MOSA-CROCO (para los dominios Chiloé-Aysén y Magallanes), MOSA-WRF (para la zona Chiloé-Aysén), el modelo hidrológico de agua dulce FLOW y las mediciones en tiempo casi real de las estaciones meteorológicas del IFOP, REDMET pueden ser visualizadas en el sitio web CHONOS (<http://chonos.ifop.cl>).

ANEXO A: ECUACIONES MODELO HIDRODINÁMICO CROCO

CROCO (<https://www.croco-ocean.org/>) es un modelo hidrodinámico basado en ROMS_AGRIF y en el núcleo no hidrostático de SNH (en fase de pruebas), que incluye gradualmente algoritmos de MARS3D (sedimentos) e HYCOM (coordenadas verticales). El movimiento de una partícula en el océano en CROCO es descrita por las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas se resuelven por medio de métodos numéricos en cada elemento del dominio.

1. **Balance hidrostático de momento vertical.** $H/L \ll 1$. El largo de un océano (~ 5000 km) es mucho mayor a su profundidad promedio ($L \sim 5$ km), haciendo despreciable las aceleraciones verticales y el término de Coriolis asociado a velocidades verticales. Esto nos da:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (1)$$

donde P es la presión hidrostática, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de gravedad y z es la profundidad del agua.

2. **Ecuación de continuidad.** Campo de masa no divergente. Se asume que el agua de mar es incompresible en toda su columna.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

donde u , v , w son las componentes zonales, meridionales y verticales de la velocidad y x , y , z son los ejes cartesianos.

3. **Aproximación de Boussinesq.** Los gradientes horizontales de densidad son constantes

$$\rho = \rho_0 = cte \quad (3)$$

4. **Ecuación de estado.** La densidad del agua se estima en función de la temperatura, la salinidad y la presión, bajo la ecuación de estado.

$$\vec{u} \cdot \nabla(-H) = w \quad (4)$$

5. **Conservación de momento horizontal.**

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| u}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| v}{\rho_0}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v + fu = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla_h (K_{Mh} \cdot \nabla_h v) + \frac{\partial}{\partial z} K_{Mv} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6)$$

6. Ecuaciones conservativas de trazadores temperatura y salinidad

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla_h (K_{Th} \cdot \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = \nabla_h (K_{Sh} \cdot \nabla_h S) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (8)$$

Las condiciones de borde verticales del modelo en superficie ($z = \eta$) son:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w \quad \text{Condición cinemática}$$

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_y}{\rho_0}; \quad \text{Esfuerzo del viento}$$

$$K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 C_p} \quad \text{Flujo de calor}$$

$$K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S(E-P)}{\rho_0} \quad \text{Flujo de sal}$$

Las condiciones de borde verticales en el fondo ($z = -H$) son:

$$\vec{u} \cdot \nabla (-H) = w \quad \text{Condición cinemática}$$

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| u}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| v}{\rho_0}; \quad \text{Fricción de fondo}$$

$$K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{Flujo de calor}$$

$$K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad \text{Flujo de sal}$$

ANEXO B: MODELO OPERACIONAL MOSA-WRF

El modelo Weather Research and Forecast (WRF) es un sistema numérico de simulación atmosférica diseñado a finales de la década de 1990. Su propósito principal fue satisfacer las necesidades de investigación y predicción operativa de la atmósfera. Este fue desarrollado gracias al esfuerzo en conjunto entre el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Centers for Environmental Prediction (NCEP), el Forecast Systems Laboratory (FSL), el Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, La Universidad de Oklahoma, y la Federal Aviation Administration (FAA).

Dentro de las principales características de este modelo se tiene que es no-hidroestáticos, es decir, las fuerzas de los gradientes de presión y gravedad no se encuentran equilibradas, permitiendo la libre trayectoria de las parcelas de aire en la componente vertical. De igual manera existe la opción para activar el módulo hidrostático. Posee un sistema de coordenadas Eulerianas (Skamarock et al., 2005) en donde el observador se encuentra en un punto fijo con respecto al movimiento del fluido. Cuenta con un módulo de asimilación de datos, y una arquitectura de software que favorece la computación paralela y la extensibilidad del sistema. Finalmente el modelo ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros.

WRF ofrece dos núcleos dinámicos para el cálculo de las ecuaciones que gobiernan la atmósfera, estos son: el Advanced Research WRF (ARW), y el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM). Para el caso de MOSA-WRF, este se basó en el núcleo WRF-ARW desarrollado principalmente por NCAR, siendo la continuación del modelo atmosférico MM5. Este núcleo integra las ecuaciones de Euler no hidrostáticas compresibles (Skamarock et al., 2005) y se formulan usando una coordenada vertical de presión hidrostática que sigue al terreno, denotada por η y definida como:

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{\mu} \quad (9)$$

donde $\mu = P_{hs} - P_{ht}$, P_h es el componente hidrostático de la presión, y P_{hs} y P_{ht} se refieren a valores entre la superficie y los límites superiores, respectivamente. La definición de coordenadas (9) propuesta por Laprise (1992), es la coordenada σ tradicional utilizada en muchos modelos atmosféricos hidrostáticos. η varía desde un valor de 1 en la superficie hasta 0 en el límite superior del dominio del modelo (Fig. 47). Esta coordenada vertical también se conoce como coordenada vertical de masa.

Como $\mu(x,y)$ representa la masa por unidad de área dentro de la columna en el dominio del modelo en (x, y) las variables de forma de flujo apropiadas son:

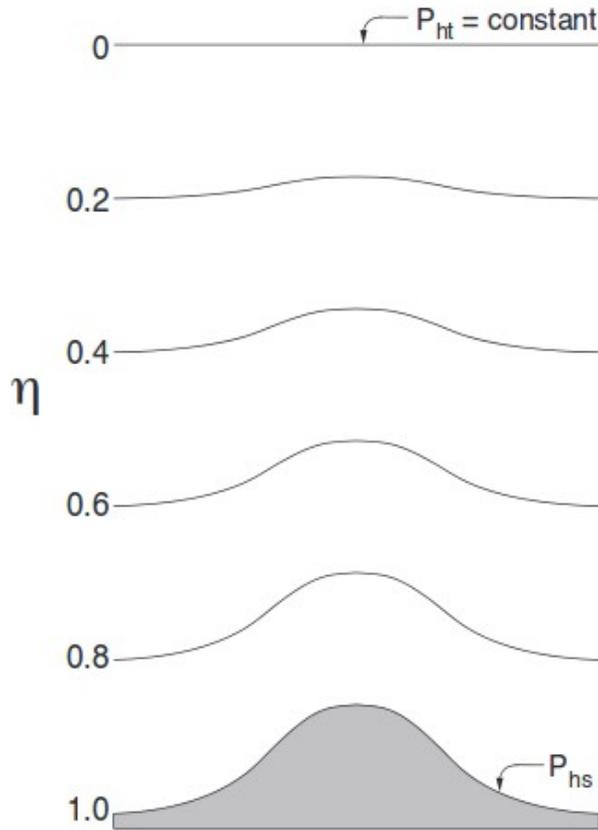


Figura 47: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno. Fuente Skamarock et al. (2005)

$$V = \mu v = (U, V, W), \Omega = \mu \eta', \Theta = \mu \theta \quad (10)$$

donde $v = (u, v, w)$ son las velocidades en las dirección horizontal y vertical, respectivamente. $\omega = \eta'$ es la velocidad vertical y θ es la temperatura potencial. También aparecen en las ecuaciones primitivas de ARW las variables no-conservativas $\phi = gz$ (el geopotencial), p (presión) y $\alpha = 1 / \rho$ (la densidad inversa). Usando las variables definidas anteriormente, las ecuaciones de Euler se pueden escribir como:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_x(p\phi_x) = F_U \quad (11)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_y(p\phi_y) = F_V \quad (12)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (13)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V \theta) = F_\Theta \quad (14)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (15)$$

$$\partial_t \varphi + \mu^{-1} [(V \cdot \nabla_\varphi) - gW] = 0 \quad (16)$$

Junto con la relaci3n de diagn3stico para la densidad inversa:

$$\partial_\eta \varphi = -\alpha \mu \quad (17)$$

y la ecuaci3n de estado

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad (18)$$

Entre (11) - (18), los sub3ndices x, y y η denotan diferenciaci3n,

$$\nabla \cdot V_a = \partial_x (U a) + \partial_y (V a) + \partial_\eta (\Omega a) \quad (19)$$

y

$$V \cdot \nabla_a = U \partial_x a + V \partial_y a + \Omega \partial_\eta a \quad (20)$$

donde a representa una variable gen3rica. $\gamma = cp/cv = 1.4$ es la relaci3n de las capacidades calor3ficas para el aire seco, R_d es la constante de gas para aire seco, y p_0 es una presi3n de referencia (t3picamente 105 Pascales).

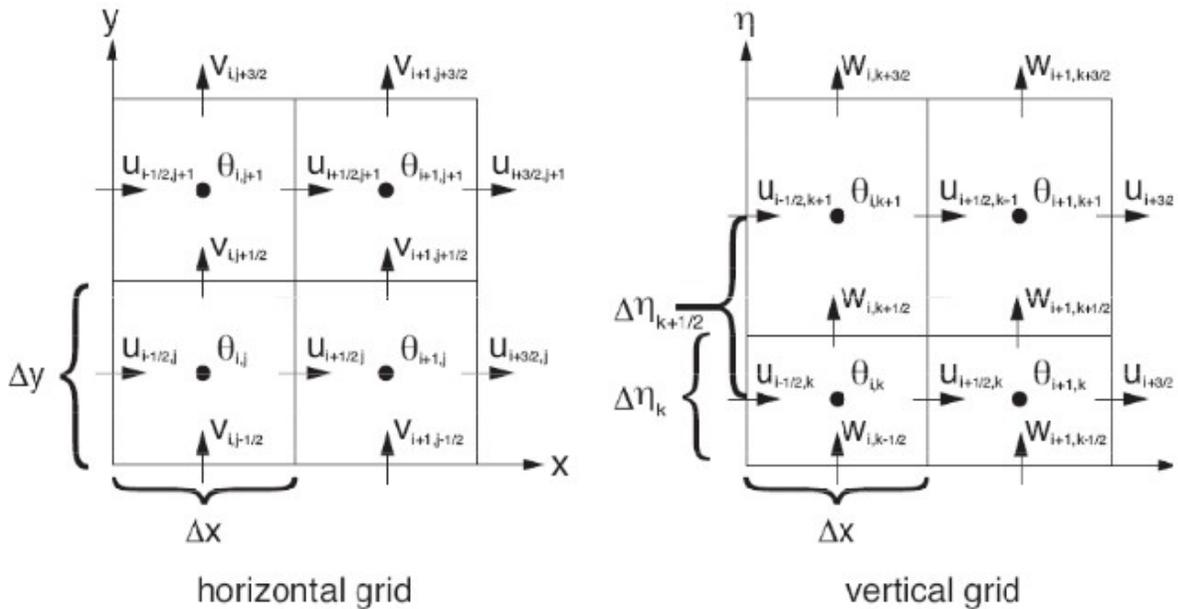


Figura 48: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atm3sfera. Fuente Skamarock et al. (2005).

Por otro lado, la discretización espacial en el núcleo ARW esta dada por la grilla Arakawa-C (Fig. 48), en dónde las componentes de la velocidad horizontal (U y V) y vertical (W) se resuelven en el centro de cada lado de las cuadrículas, dejando en el medio de cada cuadrícula las variables termodinámicas, de masa y escalares.

Por otro lado, el correcto funcionamiento de MOSA-WRF comienza con la descarga del forzante atmosférico, al rededor de las 3:00 am, mientras MOSA-ROMS da inicio a sus procesos. Esta información es esencial para lograr una simulación atmosférica exitosa. En esta versión se utilizaron los productos del modelo global de predicción atmosférica “Global Forecast System” (GFS). Estos pronósticos tienen una frecuencia temporal de 6 horas y una resolución horizontal de 0.25° distribuidos en 32 niveles verticales. Estos modelos son de libre acceso y se encuentran disponibles en <ftp://ftp.prdd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod> (revisado 25 de abril, 2018). Este proceso tarda alrededor de 1 hora 40 minutos con una velocidad de descarga de ~ 500 kbps.

Posterior a esto, se procede a ejecutar los códigos de pre-procesamiento de WRF (ungrib.exe y metgrid.exe) que son los encargados de desempaquetar e interpolar horizontalmente la información meteorológica proveniente de los forzantes globales y las variables geográficas incluidas en los códigos de WRF. Este método tarda 10 minutos aproximadamente.

Luego se interpola la información de entrada (meteorológica y geográfica) en los distintos niveles verticales especificados en la configuración del modelo (real.exe), para finalmente correr el código con el cual se ejecuta el pronóstico (wrf.exe). Este procedimiento tiene una duración aproximada de 90 minutos. El siguiente esquema muestra los principales pasos y códigos que se ejecutan para llevar a cabo una simulación (en este caso un pronóstico atmosférico).

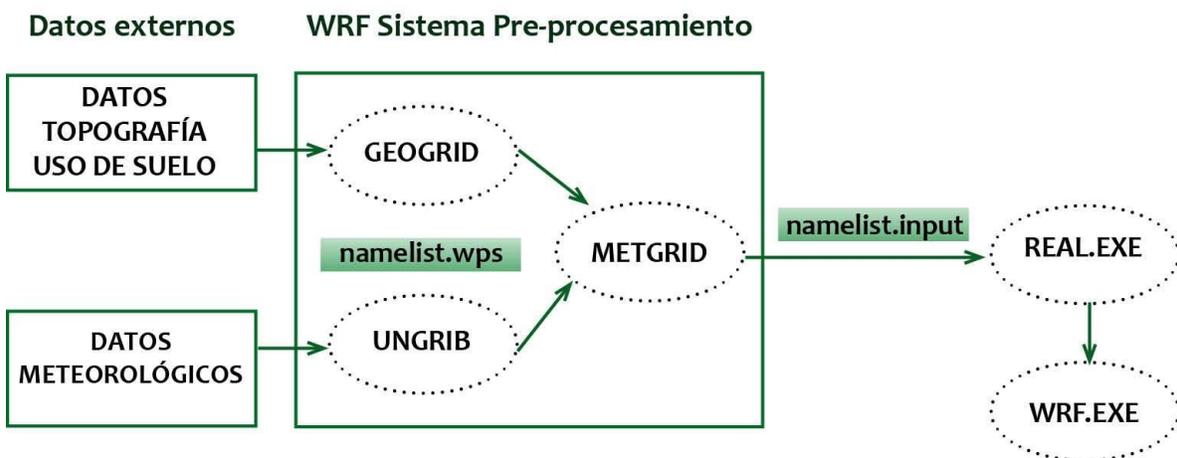


Figura 49: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.

Luego de finalizar cada pronóstico, los archivos de salida son trabajados para otorgarles un formato establecido previamente, para luego ser incorporados como forzante atmosférico en MOSA-ROMS. Este procedimiento consiste en extraer solo los campos superficiales de las variables utilizadas para forzar el sistema de modelación hidrodinámico; estos son los flujos de calor, humedad y radiación, las componentes horizontales del viento y campos de presión atmosférica y presión de la columna de aire reducida al nivel del mar, también información de precipitación y por último, es fundamental considerar las variables de estado, tales como la temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire y humedad relativa a 2 metros de la superficie.

Posterior a este procedimiento, se respaldan las salidas diarias de los pronósticos, junto a sus condiciones iniciales, utilizando alrededor de 6.5 gb de almacenamiento. Cabe destacar que los pronósticos son forzados con las condiciones creadas en el pronóstico del día anterior y en caso de que no exista, se busca hasta 3 días atrás. Esto nos permite reproducir variabilidad de escala mayor, como regímenes estacionales y/o anuales.

ANEXO C: ESTADÍSTICOS PRINCIPALES PARA VALIDACIÓN

Para llevar a cabo la validación de un modelo numérico se deben comparar dos señales: La simulada (Y) y la observada (O), para un número N de valores, por lo tanto, los índices utilizados en este estudio se pueden definir de la siguiente manera:

Error de Sesgo: El error de sesgo, también conocido por bias, nos indica un error sistemático que esté ocurriendo sobre el modelo, tendiendo a la sub-estimación si el valor es negativo, o sobre-estimación si es positivo. Su valor se obtiene mediante la sumatoria de las diferencias entre los valores simulados y observaciones, dividido por el largo de la serie (Pielke, 1984).

$$SESGO_{yx} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - X_k) \quad (21)$$

Coefficiente de correlación de Pearson: El coeficiente de correlación de Pearson es una medida que nos advierte como covarían los resultados simulados con respecto a los observados. En otras palabras nos entrega cual es la fase que existe entre ellos. Se define como el cociente entre la covarianza de lo modelado (Y) y observado (X) y el producto de las desviaciones estándar (s_y y s_x) para cada variable. El coeficiente de correlación se define como r_{yx} .

$$r_{yx} = \frac{cov_{yx}}{s_y s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})(X_k - \bar{X})}{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}) \sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (22)$$

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta, es decir si la variable observada aumenta, la simulada también lo debe hacer con la misma magnitud y viceversa.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva, mientras más se acerca a 1 la correlación será mayor, lo contrario ocurre si se aproxima a 0.
- Si $r = 0$, no existe alguna relación lineal entre la simulación y la observación.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa, y al igual que el segundo ítem, mientras más se acerque a -1 la correlación negativa será mayor.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta, esto quiere decir si la observación aumenta, la simulación disminuye con la misma magnitud y viceversa.

Cociente entre las desviaciones estándar o Amplitud: Este índice nos permite resolver si el modelo está sobre-estimando o sub-estimando la amplitud de los datos.

Consiste en el cociente entre la desviación estándar de los datos modelados y la desviación estándar de los datos observados. Si el valor es > 1 hay una sobre-estimación, si el valor está entre 0 y 1 presenta una sub-estimación. Si el valor es $= 1$ quiere decir que la amplitud de los resultados simulados es la misma que la de los datos observados.

$$COCIENTE_{s_x s_y} = \frac{s_y}{s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})}{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (23)$$

Error medio absoluto: Este error conocido como MAE (por sus siglas en ingles), nos da la medida del valor absoluto de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados (Stauffer y Seaman, 1990). Se define mediante la siguiente ecuación.

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^N |Y_k - X_k|}{N} \quad (24)$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): También conocido por RMSE (por sus siglas en ingles) y al igual que el MAE, este es una medida de uso frecuente para comparar errores de pronóstico de diferentes modelos. Cuanto menor es el valor RMSE, mejor es la capacidad predictiva de un modelo en términos de su desviación absoluta. Sin embargo, la presencia de pocos errores grandes puede dar como resultado un mayor valor de RMSE (Willmott and Matsuura, 2005).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - X_k)^2}{N}} \quad (25)$$

Skill Score de la Raíz del error cuadrático medio (RMSE-SS): Este indicador se utiliza para evaluar el desempeño relativo del modelo en comparación con una referencia (Wilks, 2011). El RMSE-SS se calcula como la diferencia entre el RMSE del modelo y la desviación estándar de los datos observados, dividida por la diferencia entre la desviación estándar de una predicción perfecta, que en este caso sería 0 y la desviación estándar de los datos observados. Matemáticamente, se puede expresar de la siguiente manera:

$$RMSE - SS = \left(1 - \frac{RMSE}{RMSE_{ref}} \right) \quad (26)$$

Por otra parte, para las variables vectoriales un método ampliamente utilizado es el componentes principales. Este método consiste en descomponer el vector bidimensional en sus dos componentes perpendiculares, para luego encontrar el vector que define la primera componente mediante álgebra lineal. En términos geométricos, esta metodología representa la dirección en la que los datos capturan la mayor parte de la información y por lo tanto tienen la cantidad máxima de variación. Para este tipo de análisis de componentes principales o PCA (por sus siglas en inglés) hay que calcular previamente dos conceptos matemáticos: vectores propios y valores propios. Esta información se obtiene a partir de la matriz de covarianza de las variables estudiadas. Esta relación implica que cuanto mayor sea la varianza que lleva una línea mayor será la dispersión de los puntos de datos a lo largo de ella, y a su vez, cuanto mayor sea la dispersión a lo largo de una línea más información tendrá esta.

La matriz de covarianza es construida con el objetivo de comprender como el conjunto de variables de entrada se relacionan entre sí, puesto que en muchos casos las variables están altamente correlacionadas, de tal manera que contienen información redundante. Esta matriz es cuadrada $p \times p$ (p es el numero de dimensiones) y tiene como entradas las covarianzas asociadas con todos los pares posibles de la variables iniciales. Una matriz de covarianza de dimensión de 2×2 tiene la siguiente forma.

$$Matriz\ de\ covarianza = \begin{vmatrix} cov(u, u) & cov(u, v) \\ cov(v, u) & cov(v, v) \end{vmatrix} \quad (27)$$

Como la covarianza de una variable consigo misma es igual a su varianza, la diagonal principal contiene las varianzas de cada variable inicial. A su vez, la covarianza es conmutativa, por lo que esta será simétrica con respecto a la diagonal principal de la matriz. Los valores positivos significan que las variables están correlacionadas y los valores negativos que las variables están inversamente correlacionadas. Por otra parte, es importante destacar que los vectores propios siempre vienen en pares, de modo que cada vector propio tiene un valor propio asociado. Estos vectores se obtienen a través de la multiplicación de la matriz de covarianza y un vector propio, obteniendo como resultado un múltiplo entero del vector original.

$$\begin{vmatrix} cov(u, u) & cov(u, v) \\ cov(v, u) & cov(v, v) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} v(x) \\ v(y) \end{vmatrix} = \lambda \begin{vmatrix} v(x) \\ v(y) \end{vmatrix} \quad (28)$$

En donde $v(x,y)$ es el vector propio de la matriz de datos y corresponde a todos aquellos vectores que al multiplicarlos por dicha matriz, resultan el mismo vector o un múltiplo entero del mismo. El valor por el que se multiplica este vector propio resultante se denomina valor propio (λ), el cual guarda información de la proporción de varianza explicada por cada vector propio. De esta manera, el vector que corresponde al eje de máxima varianza está asociado al mayor valor propio resultante. Las propiedades matemáticas que tienen los vectores propios son:

- Solo existen para matrices cuadradas. En el caso de que una matriz $n \times n$ tenga vectores propios, el número de ellos sería n .
- Si se escala un vector propio antes de multiplicarlo por la matriz se obtiene un múltiplo del mismo vector propio, consiguiendo unicamente cambiar su longitud pero no su dirección.
- Todos los vectores propios de una matriz son perpendiculares (ortogonales) entre ellos, es decir, no están correlacionados, independiente de las dimensiones que tengan.

ANEXO D: MÓDULOS BIOGEOQUÍMICOS

Modelo NPZD

El modelo NPZD es un modelo biogeoquímico simple basado en el desarrollo de Fasham et al. (1990). Este tipo de modelo de red trófica consiste en un pequeño número de compartimientos donde la diversidad de organismos y especies individuales son reemplazadas por variables genéricas como ‘fitoplancton’ o ‘zooplancton’. Por lo tanto el modelo contiene cuatro variables de estado: nitrógeno inorgánico disuelto o nitrato (NO₃), fitoplancton (P), zooplancton (Z) y detritus (D). La interacción entre las variables de estado se resume en la Figura 50.

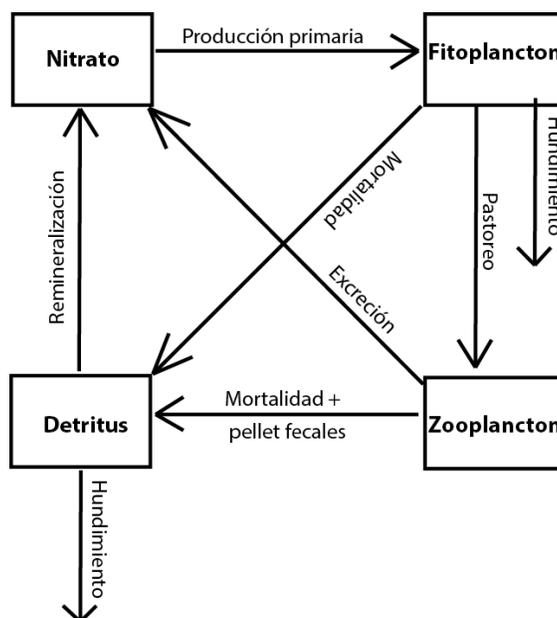


Figura 50: Esquema del modelo NPZD.

Es importante notar que el contenido de oxígeno en la columna de agua es el resultado del siguiente balance de masa, donde varios procesos de producción y consumo son considerados.

$$\frac{dO_2}{dt} = \text{Producción Primaria} - (\text{Respiración} + \text{Remineralización}) \dots \pm (\text{Intercambio océano-atmósfera}) \quad (29)$$

Por lo tanto la concentración de oxígeno está dada por el oxígeno producido durante el proceso de producción primaria, es decir durante el crecimiento del fitoplancton y los procesos que consumen O₂. En los procesos de respiración del zooplancton y de remineralización del detritus, las bacterias utilizan oxígeno como primer oxidante. El

intercambio océano-atmósfera puede ser una pérdida o ganancia de oxígeno, ya que depende de la solubilidad del O₂ en el agua de mar para la salinidad y temperatura de ese momento.

Modelo PISCES

El modelo biogeoquímico *Pelagic Interactive Scheme for Carbon and Ecosystem Studies* (PISCES, Aumont et al., 2003; Aumont y Bopp, 2006; Aumont et al., 2015) simula los ciclos de carbono, oxígeno y los principales nutrientes que controlan el crecimiento del fitoplancton (PO₄³⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Si, Fe). En este modelo el crecimiento del fitoplancton depende de las concentraciones externas de nutrientes. PISCES incluye dos clases de fitoplancton (diatomeas y nanofitoplancton) y dos clases de zooplancton (micro y mesozooplancton). Este modelo incorpora tres compartimentos "no vivos", estos son: materia orgánica disuelta semilábil, pequeñas partículas que se hunden y grandes partículas que se hunden. A continuación se presenta un esquema general que representa la arquitectura del modelo PISCES (Fig. 51)

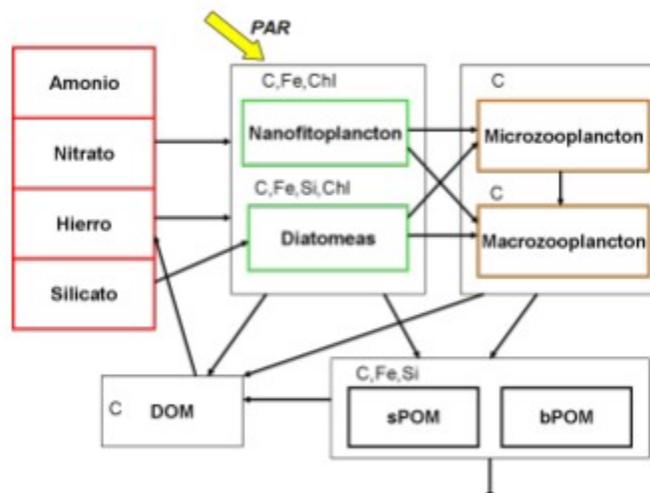


Figura 51: Arquitectura del modelo PISCES extraído de Aumont y Bopp (2006). Este esquema muestra el modelo ecosistémico omitiendo el oxígeno y el sistema de carbonato.

PISCES cuenta con 24 compartimentos y más de 60 parámetros (Aumont y Bopp, 2006), los cuales están especialmente configurados para ROMS a través de una lista disponible para su modificación (namelist.trc.sms). Cabe destacar que la nueva versión de ROMS, CROCO (<https://www.croco-ocean.org>), contiene la versión actual de PISCES (Aumont et al., 2015) en la cual han aumentado el número de parámetros e incorporado cambios a los nutrientes modelados, a los compartimentos de fito y zooplancton y a la materia orgánica disuelta y particulada, entre otros. La implementación de PISCES en la

zona sur-austral de Chile, podría ayudar a resolver problemáticas tan relevantes como aquellas relacionadas con la marea roja, la eutrofización, la disponibilidad de nutrientes y luz para el crecimiento del fitoplancton y la alcalinidad de la columna de agua.

Los trabajos que conjugan modelación biofísica en Chile, se encuentran restringidos particularmente a la zona centro (Concepción y Golfo de Arauco; Baird et al., 2007), a la zona centro-sur (30-40 °S; Gómez et al., 2017, Vergara et al., 2017, Pizarro-Koch et al., 2019) y a la zona norte del Sistema de Corrientes de Humboldt (Perú; Espinoza-Morriberón et al., 2017; 2019). Esto es una limitación para ajustar los coeficientes y parámetros de PISCES. Después de una revisión bibliográfica solo se encontraron 8 parámetros biogeoquímicos para Chile. Los otros parámetros fueron ajustados de la siguiente forma: 9 valores tomados del sistema de surgencia de Perú (Albert et al., 2010) y el resto a valores del trabajo de Kane et al. (2011), los cuales son valores estándar del modelo PISCES.

Los parámetros recopilados para las costas de Chile son los siguientes:

1. Máxima tasa de pastoreo del zooplancton (Bottjer y Morales, 2005).
2. Tasa de remineralización de carbono orgánico disuelto (Pantoja et al., 2004).
3. Tasa de remineralización del carbono orgánico particulado (Cuevas et al., 2004; Pantoja et al., 2004).
4. Tasa de exudación del mesozooplancton (Pérez-Aragón et al., 2011).
5. Tasa de mortalidad del zooplancton (Yáñez et al., 2012).
6. Tasa de nitrificación (Fernández y Farías., 2012).
7. Tasa de excreción de materia orgánica disuelta (González et al., 2007).

Los datos utilizados de nutrientes utilizados como aportes de ríos están resumidos en la Tabla 10.

Tabla 10: Ubicación de los ríos y valores de nutrientes utilizados para la simulación biogeoquímica del 2018 con PISCES.

Longitud	Latitud	PO4 (µM)	NO3 (µM)	Si (µM)	Fe (µM)	NH4 (µM)	Fuente
-73.85	-41.29	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.31	-41.38	0.358	0.633	177.667	0.055	0.750	Proyecto Dydimó
-72.85	-41.48	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.28	-41.50	0.278	0.633	103.167	0.055	0.750	CIMAR
-73.68	-41.63	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	

-72.33	-41.65	0.019	0.135	75.516	0.124	0.283	León-Muñoz <i>et al.</i> (2021)
-73.81	-41.86	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.46	-41.96	0.252	0.567	106.167	0.055	0.750	CIMAR
-72.44	-41.96	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	CIMAR
-72.67	-42.00	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	CIMAR
-74.03	-42.04	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.45	-42.25	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.42	-42.39	0.117	0.810	41.305	0.045	0.750	Pryer <i>et al.</i> (2020)
-72.40	-42.47	0.117	0.810	66.820	0.009	0.750	Pryer <i>et al.</i> (2020)
-72.51	-42.57	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.53	-42.58	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-74.11	-42.65	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.82	-42.67	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.84	-42.75	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.76	-42.94	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-74.20	-42.96	0.117	0.810	125.594	0.055	0.750	Pryer <i>et al.</i> (2020)
-72.72	-43.07	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.73	-43.12	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-74.32	-43.13	0.117	0.810	6.591	0.055	0.750	Curra-Sánchez <i>et al.</i> (2022)
-72.96	-43.27	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.06	-43.41	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.90	-43.62	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.96	-43.75	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.97	-43.76	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.09	-44.09	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	

-72.84	-44.38	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.58	-44.46	0.045	0.800	75.516	0.055	0.605	CIMAR
-72.60	-44.50	0.245	0.800	43.787	0.091	1.275	CIMAR/Pryer <i>et al.</i> (2020)
-73.14	-44.54	0.006	2.413	24.972	0.055	0.750	Dydimo
-72.71	-44.73	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.98	-44.86	0.045	0.850	77.741	0.023	1.720	Dydimo/CIMAR/Pryer <i>et al.</i> (2020)
-73.15	-44.94	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.04	-45.35	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-72.79	-45.41	0.165	0.500	75.516	0.055	0.385	CIMAR
-72.91	-45.45	0.001	0.935	76.229	0.055	0.530	Dydimo/CIMAR/Pryer <i>et al.</i> (2020)
-73.24	-45.64	0.040	0.750	167.292	0.066	0.455	CIMAR/Pryer <i>et al.</i> (2020)
-73.20	-45.67	0.173	0.810	16.614	0.055	0.750	Patagonia Norte
-73.45	-45.76	0.058	0.474	11.512	0.055	0.750	Patagonia Norte
-73.39	-46.01	0.077	0.499	3.276	0.055	0.750	Patagonia Norte
-73.34	-46.03	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.47	-46.15	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.99	-46.18	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.48	-46.29	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.75	-46.48	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	
-73.89	-46.69	0.117	0.810	75.516	0.055	0.750	

Modelo FENNEL

En la etapa 2021-2022, implementamos un tercer modelo el cual consiste en la unión de un modelo basado en el ciclo del nitrógeno con parametrizaciones de la desnitrificación en sedimento descrito por (Fennel et al., 2006, 2013) y un modelo de

química del carbonato descrito por Zeebe and Wolf-Gladow (2001), sin embargo a este modelo lo llamaremos simplemente FENNEL.

El modelo FENNEL representa por una parte el ciclo del nitrógeno biológico en los procesos en la columna de agua (Fig. 52), incluyendo siete variables de estados: dos especie de nitrógeno inorgánico disuelto (NO_3 , NH_4), un grupo funcional de fitoplancton (Phy), clorofila como una variable de estado, un grupo de zooplancton y dos grupos de detrito; partículas de hundimiento rápido (LDet) y partículas suspendida (SDet). Además, el modelo de química del carbonato, simula la alcalinidad y el carbono orgánico total.

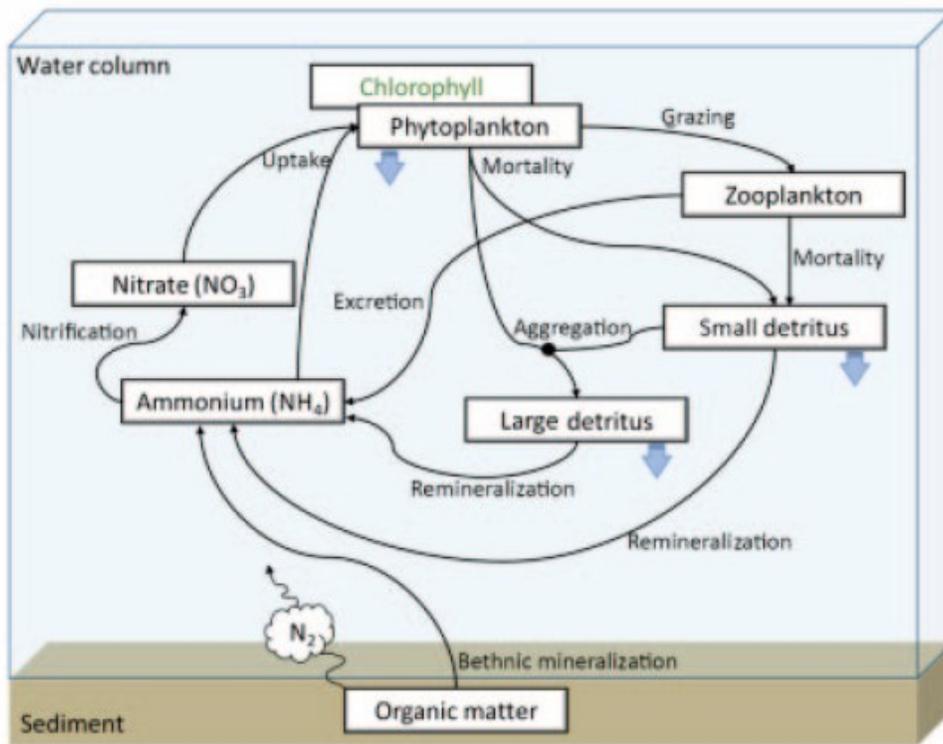


Figura 52: Esquema del modelo biogeoquímico Fennel.

ANEXO E: RECURSOS COMPUTACIONALES

Debido a que se debe asegurar la continuidad operacional de los modelos MOSA-ROMS y MOSA-WRF, estos fueron instalados y configurados en un servidor de alto rendimiento ubicado en el *Data Center* de IFOP en Viña del Mar con los estándares establecidos en las normas internacionales ANSI / TIA / EIA-942. Las especificaciones técnicas de este equipo son resumidos en la Tabla 11.

Tabla 11: Especificaciones técnicas del servidor de alto rendimiento ubicado en *Data Center IFOP en Viña del Mar*.

Nodo líder – Dell PowerEdge R640	Nodos computo (4 unidades) – SGI C1110–RP6 .	Switch Dell Networking S4128f-ON modelo de última generación
2 procesadores Intel Xeon Gold 5118 2.3G, 12C/24T, 10.4GT/s, 16M Cache, Turbo, HT (105W) DDR4-2400	2 procesadores Intel Xeon Gold 5118 2.3G, 12C/24T, 10.4GT/s, 16M Cache, Turbo, HT (105W) DDR4-2400	28 puertos fijos SFP+ de 10 GbE (1/10 GbE)
128 GB RAM • 8 x 16GB RDIMM, 2666MT/s, Dual Rank	64 GB RAM • 4 x 16GB RDIMM, 2666MT/s, Dual Rank	2 puertos QSFP28 10/25/40/50/100 GbE
10 x 1TB 7.2K RPM NLSAS 12Gbps 512n 2.5in Hot-plug Hard Drive	4 x 1TB 7.2K RPM NLSAS 12Gbps 512n 2.5in Hot-plug Hard Drive	Capacidad de la estructura del switch (dúplex completo): 960 Gbps
2 Fuentes de poder redundantes (1+1) 750W Hot Swap	2 Fuentes de poder redundantes (1+1) 750W Hot Swap	
• Broadcom 57416 2 Port 10Gb Base-T + 5720 2 Port 1Gb Base-T, rNDC (conexión LAN) • Broadcom 57412 Dual Port 10Gb, SFP+, PCIe Adapter, Low Profile (Conexión entre servidores a través de switch S4128f)	• Broadcom 57416 2 Port 10Gb Base-T + 5720 2 Port 1Gb Base-T, rNDC (conexión LAN) • Broadcom 57412 Dual Port 10Gb, SFP+, PCIe Adapter, Low Profile (Conexión entre servidores a través de switch S4128f)	

Por otra parte, para el sistema de información oceanográfica CHONOS, utiliza un servidor web con las siguientes características técnicas (Tabla 12):

Tabla 12: Especificaciones técnicas servidor web para CHONOS ubicado en Data Center Viña del Mar.

PowerEdge R640 Server
(2) Intel Xeon Silver 4116 2.1G, 12C/24T, 9.6 GT/s, 16.5 M Cache, Turbo, HT (85W) DDR4-2400 (338-BLUT)
(8) 16GB RDIM, 2666 MT/s, Dual Rank (370-ADND)
8 Standar Fans for R640 (384-BBQJ)
IDRAC9, Enterprise (385-BBKT)
(2) 3.84TB SSD SATA Read Intensive 6Gbps 512n 2.5in Hot-plug Drive, PM863a, 1 DWPD, 7008 TBW (400-ASGL)
Broadcom 5719 QP 1 Gb Network Interface Card, Low Profile (540-BBDF)
Broadcom 57416 2 Port 10 Gb Base-T + 5720 2 Port 1 Gb Base-T, rNDC (540-BBUK)

Además se cuenta con un servidor de almacenamiento de gran capacidad (storage) en IFOP-Putemún, ciudad de Castro. Este servidor se encuentra configurado como sistema RAID 1, lo que permite mantener toda la información doblemente respaldada. Las características principales de este servidor de almacenamiento se encuentran resumidas en la Tabla

Tabla 13: Especificaciones técnicas del servidor de almacenamiento y respaldo de los pronósticos operacionales ubicado en IFOP-Putemún, Castro.

SuperStorage Supermicro Server 6029P-E1CR16T - 64GB ECC/REG - 48 TB SAS 1
1 x SuperStorage Supermicro Server 6029P-E1CR16T
2 x Procesador Intel Xeon Bronze 3106 1.70GHZ 11MB CACHE
4 x Memoria Ram Samsung DDR4-2666 16GB/2Gx4 ECC/REG CL19
1 x Supermicro BTR-TFM8G-LSICVM02 SuperCap Module for 3108 Controller
1 x Supermicro PCI LSI BKT-BBU-BRACKET-05 Remote Mounting Board
2 x Samsung SSD PM863A Series 480GB 2.5 inch SATA3
2 x Supermicro MCP-220-84606-0N Rear Side Dual 2.5
10 x Seagate 8TB Enterprise Capacity 7200 rpm SAS III 3.5"

ANEXO F: GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

- **ADCP:** Instrumento hidroacústico “*Acoustic Doppler Current Profiler*”.
- **AVHRR:** Producto “*Advanced Very High Resolution Radiometer*”
- **ARMOR3D-CLS:** Base de datos “*Multi Observation Global Ocean 3D Temperature Salinity Height Geostrophic Current and MLD*”.
- **CHONOS:** Sistema de información oceanográfico de IFOP.
- **CIMAR:** Crucero de Investigación Marina en Áreas Remotas.
- **CROCO:** Modelo hidrodinámico “*Coastal and Regional Ocean COmmunity model*”.
- **CTD:** Sonda multiparamétrica “*Conductivity, Temperature and Depth*”.
- **DIC:** Carbono inorgánico disuelto.
- **DGA:** Dirección General de Aguas.
- **DOC:** Carbono orgánico disuelto.
- **ESSW:** Agua ecuatorial sub-superficial.
- **FENNEL:** Modelo biogeoquímico basado en el ciclo del nitrógeno con parametrizaciones para la desnitrificación
- **FLOW:** Modelo hidrológico desarrollado por IFOP basado en el modelo VIC.
- **GAM:** Golfo Almirante Montt
- **GEBCO:** Modelo batimétrico “*General Bathymetric Chart of the Oceans*”.
- **GFS:** Modelo atmosférico “*Global Forecast System*”.
- **MFWAM:** Modelo de oleaje francés “*Meteo-France Wave Model*”.
- **MOSA:** Modelo Operacional Sur-Austral
- **MOSA-CROCO:** Componente hidrodinámico del modelo MOSA basado en el modelo CROCO para el dominio de Chiloé-Aysén.
- **MOSA-MAG:** Componente hidrodinámico del modelo MOSA basado en el modelo CROCO para el dominio de Magallanes.
- **MOSA-WRF:** Componente atmosférico del modelo MOSA basado en el modelo WRF.
- **MOSA-WW3:** Componente de oleaje del modelo MOSA basado en el modelo WW3.
- **NPZD:** Modelo biogeoquímico simple basado en el nitrato, fitoplancton, zooplancton y detrito.
- **OISST:** Método interpolación “*Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*”.
- **Opendrift:** Modelo lagrangeano de dispersión de partículas.
- **ORAS5:** Base de datos “*Ocean Reanalysis System 5*”.
- **Parti-MOSA:** Componente operacional de dispersión de partículas del modelo MOSA basado en el modelo Opendrift.
- **PISCES:** Modelo biogeoquímico “*Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*”.
- **ROFI:** Región de influencia de agua dulce.

- **ROMS:** Modelo hidrodinámico “Regional Ocean Model System”.
- **SAAW:** Agua sub-antártica superficial.
- **Sentinel-3:** Constelación de satélites de observación terrestre desarrollada por la Agencia Espacial Europea como parte del Programa Copérnico.
- **SHOA:** Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile
- **SSS-CNR:** Base de datos “*Multi Observation Global Ocean Sea Surface Salinity and Sea Surface Density*”.
- **VIC:** Modelo hidrológico “*Variable Infiltration Capacity*”
- **WaveWatch III.** Modelo de oleaje de tercera generación.
- **WRF:** Modelo atmosférico “*Weather Research & Forecasting Model*”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiken, C. M. (2008). Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).
- Albert, A., Echevin, V., Lévy, M., & Aumont, O. (2010). Impact of nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary productivity in the Peru upwelling system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12).
- Aumont, O., Maier-Reimer, E., Blain, S., & Monfray, P. (2003). An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2).
- Aumont, O., & Bopp, L. (2006). Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(2).
- Aumont, O., Éthé, C., Tagliabue, A., Bopp, L., & Gehlen, M. (2015). PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(2).
- Ávila, M., De Zarate, C., Clement, A., Carbonell, P., & Pérez, F. (2015). Efecto de factores abióticos en el crecimiento vegetativo de *Alexandrium catenella* proveniente de quistes en laboratorio. *Revista de biología marina y oceanografía*, 50, 177-185.
- Baird, M. E., Leth, O. and J. F. Middleton. (2007). Biological response to circulation driven by mean summertime winds off central Chile: A numerical model study. *J. Geophys. Res.* 112, C07031, doi:10.1029/2006JC003655.
- Bottjer, D., and C. E. Morales. (2005). Microzooplankton grazing in a coastal embayment off Concepción, Chile, (~36°S) during non-upwelling conditions. *Journal of Plankton Research* (27) 4: 383, 391.
- Brun, A. A., Ramirez, N., Pizarro, O., & Piola, A. R. (2020). The role of the Magellan Strait on the southwest South Atlantic shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106661.
- Buschmann, A. H., Cabello, F., Young, K., Carvajal, J., Varela, D. A., & Henríquez, L. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean & Coastal Management*, 52(5), 243-249.
- Cucco, A., Martín, J., Quattrocchi, G., Fenco, H., Umgiesser, G., & Fernández, D. A. (2022). Water circulation and transport time scales in the Beagle Channel, southernmost tip of South America. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 941.

- Cuevas, L.A., Daneri, G., Jacob, B. and P. Montero. (2004). Microbial abundance and activity in the seasonal upwelling area off Concepción (~36°S), central Chile: a comparison of upwelling and non-upwelling conditions. *Deep-Sea Research II*, 51: 2427–2440.
- Curra-Sánchez, E. D., Lara, C., Cornejo-D'Ottone, M., Nimptsch, J., Aguayo, M., Broitman, B. R., ... & Vargas, C. A. (2022). Contrasting land-uses in two small river basins impact the colored dissolved organic matter concentration and carbonate system along a river-coastal ocean continuum. *Science of The Total Environment*, 806, 150435.
- Dávila, P. M., Figueroa, D., & Müller, E. (2002). Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35–55 S). *Continental shelf research*, 22(3), 521-534.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., & Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1-21.
- Drévillon, M., Bourdallé-Badie, R., Derval, C., Lellouche, J. M., Rémy, E., Tranchant, B., ... & Garric, G. (2008). The GODAE/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: results, applications and prospects. *Journal of Operational Oceanography*, 1(1), 51-57.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183-204.
- Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Ledesma, J., Vásquez, L., Graco, M. (2017). Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122: 5423–5444. doi:10.1002/2016JC012439.
- Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Gutierrez, D., Graco, M., Ledesma, J., Quispe-Ccalluari, C. (2019). Oxygen Variability During ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Front. Mar. Sci.* 5:526. doi: 10.3389/fmars.2018.00526.
- Fennel, K., Wilkin, J., Levin, J., Moisan, J., O'Reilly, J., & Haidvogel, D. (2006). Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(3).
- Fennel, K., Hu, J., Laurent, A., Marta-Almeida, M., & Hetland, R. (2013). Sensitivity of hypoxia predictions for the northern Gulf of Mexico to sediment oxygen consumption and model nesting. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(2), 990-1002.

- Fernández, C., and L. Farías. (2012). Assimilation and regeneration of inorganic nitrogen in a coastal upwelling system: ammonium and nitrate utilization. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 451: 1-14.
- Flather, R. A. (2000). Existing operational oceanography. *Coastal Engineering*, 41(1-3), 13-40.
- Gómez, F. A., Spitz, Y. H., Batchelder, H. P. and M. A. Correa-Ramirez. (2017). Intraseasonal patterns in coastal plankton biomass off central Chile derived from satellite observations and a biochemical model. *Journal of Marine Systems*, 174: 108-118.
- Gonella, J. (1972, December). A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series. In *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* (Vol. 19, No. 12, pp. 833-846). Elsevier.
- González, H.E., Menschel, E., Aparicio, C., Barría, C.. (2007). Spatial and temporal variability of microplankton and detritus, and their export to the shelf sediments in the upwelling area off Concepción, Chile (36°S), during 2002– 2005. *Prog. Oceanogr.* 75, 435–451.
- Hamman, J. J., Nijssen, B., Bohn, T. J., Gergel, D. R., & Mao, Y. (2018). The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility. *Geoscientific Model Development (Online)*, 11(8).
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.
- Kane, A., Moulin, C., Thiria, S., Bopp, L., Berrada, M., Tagliabue, A., ... & Badran, F. (2011). Improving the parameters of a global ocean biogeochemical model via variational assimilation of in situ data at five time series stations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C6).
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., & Baker, W. E. (1990). Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(10), 1410-1428.
- Laprise, R. (1992). The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review*, 120(1), 197-207.
- Lara, C., Saldías, G. S., Westberry, T. K., Behrenfeld, M. J., & Broitman, B. R. (2017). First assessment of MODIS satellite ocean color products (OC3 and nFLH) in the Inner Sea of Chiloé, northern Patagonia. *Latin american journal of aquatic research*, 45(4), 822-827.

- Lembeye, G., Marcos, N., Sfeir, A., Molinet, C., Jara, F., Clément, A., & Rojas, X. (1998). Seguimiento de la toxicidad en recursos pesqueros de importancia comercial en la X y XI región. *Informe Final Proyecto FIP, 97*, 49-86.
- León-Muñoz, J., Aguayo, R., Marcé, R., Catalán, N., Woelfl, S., Nimptsch, J., ... & Miranda, A. (2021). Climate and Land Cover Trends Affecting Freshwater Inputs to a Fjord in Northwestern Patagonia. *Frontiers in Marine Science, 8*, 628454.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 99*(D7), 14415-14428.
- Mardones, F. O., Perez, A. M., & Carpenter, T. E. (2009). Epidemiologic investigation of the re-emergence of infectious salmon anemia virus in Chile. *Diseases of aquatic organisms, 84*(2), 105-114.
- Mardones, J., Clément, A., Rojas, X., & Aparicio, C. (2010). *Alexandrium catenella* during 2009 in Chilean waters, and recent expansion to coastal ocean. *Harmful Algae News, 41*, 8-9.
- Muñoz, P., Avaria, S., Sievers, H., & Prado, R. (1992). Presencia de dinoflagelados tóxicos del género *Dinophysis* en el Seno Aysén, Chile. *Revista de Biología Marina, 27* (2), 187-212.
- Narváez, D. A., Vargas, C. A., Cuevas, L. A., García-Loyola, S. A., Lara, C., Segura, C., ... & Broitman, B. R. (2019). Dominant scales of subtidal variability in coastal hydrography of the Northern Chilean Patagonia. *Journal of Marine Systems, 193*, 59-73.
- Olivares, G., Sepulveda, H. H., & Yannicelli, B. (2015). Definition of sanitary boundaries to prevent ISA virus spread between salmon farms in Southern Chile based on numerical simulations of currents. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 158*, 31-39.
- Pantoja, S., Sepúlveda, J., & González, H. E. (2004). Decomposition of sinking proteinaceous material during fall in the oxygen minimum zone off northern Chile. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 51*(1), 55-70.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., & McWilliams, J. C. (2006). Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system. *Ocean Modelling, 12*(1-2), 157-187.
- Pérez-Aragón, M., Fernandez, C., & Escribano, R. (2011). Nitrogen excretion by mesozooplankton in a coastal upwelling area: seasonal trends and implications for biological production. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 406*(1-2), 116-124.

- Pielke, R. A., & Pielke, R. A. (1984). *Mesoscale meteorological modelling*. Academic press.
- Pizarro-Koch, M., Pizarro, O., Dewitte, B., Montes, I., Ramos, M., Paulmier, A., & Garçon, V. (2019). Seasonal Variability of the Southern Tip of the Oxygen Minimum Zone in the Eastern South Pacific (30°-38° S): A Modeling Study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12), 8574-8604.
- Pryer, H. V., Hawkings, J. R., Wadham, J. L., Robinson, L. F., Hendry, K. R., Hatton, J. E., ... & Häussermann, V. (2020). The influence of glacial cover on riverine silicon and iron exports in Chilean Patagonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(12), e2020GB006611.
- Roa, V. (2015). Aprendizaje y cambio en políticas a partir de crisis en industrias basadas en recursos naturales: caso de la crisis sanitaria del ISA en la industria del salmón en Chile. In *6to Encuentro Anual Sociedad Chilena de Políticas Públicas*. Facultad de Gobierno Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile.
- Saldías, G. S., Sobarzo, M., & Quiñones, R. (2019). Freshwater structure and its seasonal variability off western Patagonia. *Progress in Oceanography*, 174, 143-153.
- Salinas, S., Contreras, M., & Fierro, J. (2004). Propagación de la onda de marea en el estrecho de Magallanes. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 27(2), 5-20.
- Schiller, A., & Brassington, G. B. (Eds.). (2011). *Operational oceanography in the 21st century*. Springer Science & Business Media.
- Sievers, H. & Silva, N. (2008). Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. Progress in the Oceanographic Knowledge of Chilean Interior Waters, from Puerto Montt to Cape Horn, Comité Oceanográfico Nacional – Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 53–58.
- Silva, N., & Calvete, C. (2002). Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero Cimar-Fiordo 2). *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 25, 1.
- Silva, N., & Palma, S. (2006). 3.2 Oxígeno disuelto, pH y nutrientes en canales y fiordos australes. *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos*. N. Silva & S. Palma (eds.), Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 37-43.
- Silva, N., Rojas, N., & Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for

- Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(16), 1004-1020.
- Silva, N., & Vargas, C. A. (2014). Hypoxia in Chilean patagonian fjords. *Progress in Oceanography*, 129, 62-74.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). *A description of the advanced research WRF version 2* (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
- Soto, G., Pinilla, E., Reche, P., Soto, C., Arriagada, M., Cortés, J., & Venegas, O. (2018). Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte Hidrodinámico, en la región de Aysén. Reporte técnico. Convenio de desempeño 2018. Subsecretaría de Pesca.
- Stauffer, D. R., & Seaman, N. L. (1990). Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Monthly Weather Review*, 118(6), 1250-1277.
- Sweby, P. K. (1984). High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws. *SIAM journal on numerical analysis*, 21(5), 995-1011.
- Thomson, R. & Emery, W. (2004). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography: Third Edition*.
- Tolman, H. L. (2009). User manual and system documentation of WAVEWATCH III TM version 3.14. *Technical note, MMAB Contribution*, 276(220).
- Vargas, C. A., Martinez, R. A., San Martin, V., Aguayo, M., Silva, N., & Torres, R. (2011). Allochthonous subsidies of organic matter across a lake–river–fjord landscape in the Chilean Patagonia: implications for marine zooplankton in inner fjord areas. *Continental Shelf Research*, 31(3-4), 187-201.
- Vásquez, S. I., de la Torre, M. B., Saldías, G. S., & Montecinos, A. (2021). Meridional Changes in Satellite Chlorophyll and Fluorescence in Optically-Complex Coastal Waters of Northern Patagonia. *Remote Sensing*, 13(5), 1026.
- Vergara, O. A., Echevín, V., Sepúlveda, H. H., & Quiñones, R. A. (2017). Controlling factors of the seasonal variability of productivity in the southern Humboldt Current System (30–40 S): A biophysical modeling approach. *Continental Shelf Research*, 148, 89-103.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (Vol. 100). Academic press.

- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79-82.
- Yanez, S., Hidalgo, P., & Escribano, R. (2012). Natural mortality of *Paracalanus indicus* (Copepoda: Calanoida) in coastal upwelling areas associated with oxygen minimum zone in the Humboldt Current system: implications for the passive carbon flux. *Revista De Biología Marina y Oceanografía*, 47(2), 295-310.
- Zeebe, R. E., & Wolf-Gladrow, D. (2001). *CO2 in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes* (No. 65). Gulf Professional Publishing.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

Sección Ediciones y Producción

Almte. Manuel Blanco Encalada 839

Fono 56-32-2151500

Valparaíso, Chile

www.ifop.cl

141/141

CONVENIO DE DESEMPEÑO 2022 – IFOP / SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT: INFORME FINAL

“SISTEMA DE PRONÓSTICOS OCEANOGRÁFICOS Y ATMOSFÉRICOS, 2022-2023”



www.ifop.cl