

2024

INFORME FINAL

Sistema de Pronósticos Oceanográficos
y Atmosféricos,

2024-2025.

Subsecretaría de Economía y EMT
Agosto, 2025.





INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO / DIVISIÓN INVESTIGACIÓN ACUICULTURA



INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2024

Sistema de pronósticos Oceanográficos y Atmosféricos,
2024-2025.

Subsecretaría de Economía y EMT / Agosto, 2025

Requirente

Subsecretaría de Economía y
Empresas de Menor Tamaño

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

Ejecutor

Instituto de Fomento Pesquero, IFOP

Director Ejecutivo
Gonzalo Pereira Puchy

Jefe División Investigación Acuicultura
Gastón Vidal Santana

Jefa Departamento de Medio ambiente
Alejandra Oyanedel Pérez

Jefe de Proyecto
Cristian Ruiz Soto
Autores

Cristian Ruiz
Valentina Besoain
Oliver Venegas
Pedro Valdebenito
Camila Soto-Riquelme
Milton Salas



Índice

RESUMEN EJECUTIVO.....	12
1. Antecedentes.....	15
1.1 Contexto.....	15
1.2 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA.....	17
1.3 Desarrollo del proyecto.....	21
2. Objetivos.....	23
2.1 Objetivo general.....	23
2.2 Objetivos específicos.....	23
3. Glosario.....	24
4. Metodología.....	25
4.1 Metodología objetivo específico 1:.....	25
4.2 Metodología objetivo específico 2:.....	37
4.3 Metodología objetivo específico 3:.....	47
4.4 Metodología objetivo específico 4:.....	52
4.5 Metodología objetivo específico 5:.....	54
5. Resultados.....	60
5.1 Resultados objetivo específico 1:.....	60
5.2 Resultados objetivo específico 2:.....	82
5.3 Resultados objetivo específico 3:.....	100
5.4 Resultados objetivo específico 4:.....	108
5.5 Resultados objetivo específico 5:.....	116
6. Discusiones.....	128
6.1 Modelos operacionales en la Patagonia Norte.....	128
6.2 Modelos operacionales en Magallanes.....	134
6.3 Modelación Biogeoquímica en la Patagonia.....	138
6.4 Mejoras portal Chonos.....	142
7. Conclusiones.....	143
8. Gestión del proyecto.....	145
8.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA.....	145
8.2 Reuniones técnico-académicas.....	146
8.3 Carta Gantt del proyecto.....	147
8.4 Adquisición de nuevos servidores.....	148
9. Referencias bibliográficas.....	149
10. ANEXOS.....	156
Anexo A: Ecuaciones modelo hidrodinámico CROCO y WRF.....	156
Anexo B: Ficha técnica de estaciones meteorológicas REDMET.....	165
Anexo C: Sensibilidad y calibración modelo biogeoquímico.....	175



Índice de Figuras

Figura 1: Operación diaria de MC-Patanor / MC-Mag.....	18
Figura 2: Operación diaria de MW-Patanor / MW-Mag.....	19
Figura 3: Dominio MC-PATANOR, sección mar interior y mar exterior considerados para la validación temporal de la TSM.....	27
Figura 4: Ubicación de las boyas y estaciones meteorológicas utilizadas para evaluar MW-Patanor.....	33
Figura 5: Esquema resumen con metodología usada para la evaluación de MW-Patanor.....	36
Figura 6: Dominio MC-Mag, sección mar interior y mar exterior considerados para la validación temporal de la TSM.....	39
Figura 7: Escenario 1 a evaluar de MW-Mag con 5 km de resolución espacial.....	41
Figura 8: Escenario 2 a evaluar de MW-Mag con dos dominios de 9 y 3 km de resolución espacial.....	42
Figura 9: Ubicación de las boyas y estaciones meteorológicas utilizadas para evaluar los distintos escenarios de MW-Mag.....	44
Figura 10: Ubicación de las boyas y estaciones meteorológicas utilizadas para evaluar MW-Mag operacional.....	45
Figura 11: Esquema resumen con metodología usada para la implementación y evaluación de MW-Mag.....	46
Figura 12: Ubicación de las estaciones utilizadas para evaluar las distintas masas de aguas.....	49
Figura 13: Ubicación de las estaciones de Reloncaví (verde) y del crucero Taitao (naranjo) empleadas para la evaluación de la capa de mezcla y la caracterización de las masas de agua, respectivamente.....	51
Figura 14: Modelos operacionales oceanográficos y atmosféricos actuales y en desarrollo.....	54

Figura 15: Modelos anidados dentro del modelo MC-Patanor, uno en Fiordo Comau y otro en Fiordo Quitraco.....	55
Figura 16: Modelo anidado en MC-Mag, ubicado en el Golfo Almirante Montt.....	56
Figura 17: Transecto de temperatura y salinidad utilizada como condición inicial en corridas de prueba para MC-Comau.....	58
Figura 18: Transecto de temperatura y salinidad utilizada como condición inicial en corridas de prueba para MC-Quitra.....	59
Figura 19: Transecto de temperatura y salinidad utilizada como condición inicial en corridas de prueba para MC-Gam.....	59
Figura 20: Localización de ADCP y Boyas Oceanográficas utilizadas en la validación de MC-Patanor.....	61
Figura 21: Rendimiento del sistema de pronóstico MC-PATANOR durante el periodo operacional 2024–2025. El porcentaje corresponde a los días con pronóstico exitoso respecto al total de días pronosticados (91% en 2024 y 88% en 2025). En azul se indican los días con pronóstico exitoso, en rojo los días con pronóstico fallido y en gris claro los días sin ejecución del pronóstico.....	62
Figura 22: Comparación del promedio diario de la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-PATANOR y el producto satelital AVHRR entre enero de 2017 y mayo de 2025. Se incluye coeficiente de correlación (r), raíz del error cuadrático medio (rmse) y el sesgo (bias), calculados para tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (ver figura en metodología).....	63
Figura 23: (a) Coeficiente de correlación (r), (b) Raíz del error cuadrático medio (rmse), (c) sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MC-PATANOR y AVHRR durante enero 2017 y marzo 2025.....	64
Figura 24: Primer modo del análisis de componentes principales (PCA) aplicado a la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-Patanor y observada por el producto satelital AVHRR entre 2018-2025. Los paneles superiores muestran la distribución espacial de los pesos (EOF), mientras que el panel inferior presenta la evolución temporal de las componentes principales (PCA).....	65



Figura 25: Dispersión de la corriente residual, modelo MC-Patanor (rojo) y ADCP (negro). A) boca del fiordo Reloncaví, b) canal Moraleda.....	66
Figura 26: MOSA: Validación de la estructura vertical de corriente residual en boca fiordo Reloncaví y canal Moraleda. a) EOF vertical de la corriente residual ADCP- Reloncaví, b) EOF vertical de la corriente residual Modelo- Reloncaví, c) serie de tiempo corriente residual componente u ADCP- Reloncaví, d) serie de tiempo corriente residual componente u Modelo- Reloncaví, e) EOF vertical de la corriente residual ADCP-Moraleda, f) EOF vertical de la corriente residual Modelo-Moraleda, g) serie de tiempo corriente residual componente v ADCP-Moraleda, h) serie de tiempo corriente residual componente v Modelo-Moraleda.....	68
Figura 27: (ACS 1). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC- Patanor entre enero de 2024 y julio de 2025.....	70
Figura 28: (ACS 10A). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC- Patanor entre enero de 2024 y julio de 2025.....	71
Figura 29: Rendimiento de MW-Patanor durante el periodo 2024 – 2025.....	72
Figura 30: Evaluación de MW-Patanor con datos de boyas para la temperatura del aire a 2 metros	74
Figura 31: Evaluación de MW-Patanor con datos de boyas para la magnitud del viento a 10 metros	75
Figura 32: Evaluación de MW-Patanor con datos de estaciones terrestres para la temperatura del aire a 2 metros	76
Figura 33: Comparación de rosas de viento entre MW-Patanor y estaciones meteorológicas terrestres.....	77
Figura 34: Campos de correlación estacionales entre MW-Patanor y ERA5 para el periodo entre junio de 2024 y mayo de 2025. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros.....	78



Figura 35: Campos de sesgo estacionales entre MW-Patanor y ERA5 para el periodo entre junio de 2024 y mayo de 2025. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros.....	79
Figura 36: Comparación del viento promedio estacional entre ERA5 y MW-Patanor, para la zona norte del dominio de MW-Patanor.....	80
Figura 37: Comparación del viento promedio estacional entre ERA5 y MW-Patanor, para la zona sur del dominio de MW-Patanor.....	81
Figura 38: Rendimiento del sistema de pronóstico MC-Mag durante el periodo operacional 2024–2025. El porcentaje corresponde a los días con pronóstico exitoso respecto al total de días pronosticados (94% en 2024 y 90% en 2025). En azul se indican los días con pronóstico exitoso, en rojo los días con pronóstico fallido y en gris claro los días sin ejecución del pronóstico.....	83
Figura 39: Comparación del promedio diario de la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-Mag y el producto satelital AVHRR entre enero de 2022 y mayo de 2025. Se incluye coeficiente de correlación (r), raíz del error cuadrático medio (rmse) y el sesgo (bias), calculados para tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (ver figura en metodología).....	84
Figura 40: Comparación del promedio diario de la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-Mag y el producto satelital AVHRR entre enero de 2022 y mayo de 2025. Se incluye coeficiente de correlación (r), raíz del error cuadrático medio (rmse) y el sesgo (bias), calculados para tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (ver figura en metodología).....	85
Figura 41: Dispersión de la corriente residual, modelo MC-Mag, en Canal Sarmiento, Región de Magallanes.....	86
Figura 42: MC-Mag: Validación de la estructura vertical de corriente residual en el canal Sarmiento. a) EOF vertical de la corriente residual ADCP-Sarmiento, b) EOF vertical de la corriente residual Modelo-Sarmiento, c) serie de tiempo corriente residual componente v ADCP-Sarmiento, d) serie de tiempo corriente residual componente v Modelo-Sarmiento.....	87
Figura 43: (ACS 43A). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo	



ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC-Mag entre enero de 2024 y julio de 2025.....	89
Figura 44: (ACS 1). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC-Mag entre enero y julio de 2025.....	90
Figura 45: Dominio actual de MC-Mag.....	91
Figura 46: Máscara y batimetría de MC-Mag entre Seno Almirantazgo y Canal Beagle.....	91
Figura 47: Operación diaria de MC-Mag.....	93
Figura 48: Evaluación de la Magnitud del viento para los escenarios de 5 km y 3 km con datos observados para la ACS43A (a), ACS50B (b) y Golfo Almirante Montt (c).....	95
Figura 49: Evaluación de la temperatura del aire a 2 metros para los escenarios de 5 km y 3 km con datos observados para la ACS43A (a), ACS50B (b) y Golfo Almirante Montt (c).....	96
Figura 50: Rendimiento de MW-Mag durante el periodo de operación.....	97
Figura 51: Evaluación de MW-Mag con datos de boyas para la temperatura del aire a 2 metros y la magnitud del viento a 10 metros.....	98
Figura 52: Evaluación de MW-Mag con datos de estaciones meteorológicas para la temperatura del aire a 2 metros.....	98
Figura 53: Comparación de rosas de viento entre MW-Mag y estaciones meteorológicas terrestres.....	99
Figura 54: Diagrama de temperatura-salinidad y oxígeno disuelto (ml/l) para los años 2018, 2019 y 2020, a partir de datos observados (fila superior) y simulados por el modelo (fila inferior). Las líneas grises indican isolíneas de densidad (σ_t) y se señalan las principales masas de agua presentes en el área: Agua Estuarina (AE), Agua Subantartica Modificada (ASAAM), Agua Subantartica (ASAA) y Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS).....	102



Figura 55: Distribución espacial del promedio de verano (enero-febrero-marzo) de clorofila superficial (mg m^{-3}) para los años 2018, 2019 y 2020, obtenida a partir de observaciones satelitales MODIS (fila superior) y simulaciones del modelo (fila inferior).....	104
Figura 56: Distribución de la anomalía de densidad ($\sigma-t$) en el sector de Reloncaví durante marzo del 2018. Se indican las profundidades de la capa de mezcla: observada (línea roja), estimada por el modelo SIM01 (línea morada) y por el modelo SIM02 (línea naranja).....	105
Figura 57: Masas de agua y concentraciones de oxígeno disuelto observadas en las estaciones del crucero TAITAO (noviembre de 2018), comparadas con los resultados simulados por los modelos SIM01 y SIM02, además la proporción de las distintas masas de aguas.....	107
Figura 58: Diagrama de flujo de la consulta de usuario en Partimosa.....	108
Figura 59: Nueva figura generado a través de la nueva interfaz bajo la opción "Imagen png".....	112
Figura 60: Nueva interfaz de PartiMOSA.....	113
Figura 61: Despliegue de resultados en la interfaz de PartiMOSA. Notar que se pueden seleccionar trayectorias singulares y conocer su profundidad, velocidad y posición.....	115
Figura 62: Máscara y batimetría del dominio del modelo anidado MC-Comau, dispuesto para los fiordos Comau y Reñihue, región de Los Lagos.....	117
Figura 63: Máscara y batimetría del dominio del modelo anidado MC-Quitra, dispuesto para el fiordo Quitrailco, region de Aysén.....	118
Figura 64: Máscara y batimetría del dominio del modelo anidado MC-GAM, dispuesto para Golfo Almirante Montt, region de Magallanes.....	119
Figura 65: Arriba: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en fiordo Comau y del modelo MC-Comau. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2,N2 y K1.....	122
Figura 66: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en el fiordo Quitalco y del modelo MC-Quitra. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2,N2 y K1.....	124



Figura 67: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en Puerto Natales y del modelo MC-Gam. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2,N2 y K1.....	126
Figura 68: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en el paso Morla Vicuña y del modelo MC-Gam. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2,N2 y K1.....	127
Figura 69: Mapa de la región evaluada de MW-Patanor, con mascara de tierra y topografía junto a boyas y estaciones usadas para este informe. A la izquierda se muestra la resolución actual (3km); a la derecha, la resolución propuesta más fina (1 km).....	133
Figura 70: Distribución de niveles verticales tipo sigma.....	160
Figura 71: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).....	162
Figura 72: Ubicación de las estaciones meteorológicas que comprenden REDMET para la Patagonia chilena.....	165
Figura 73: Cobertura porcentual (%) de datos de clorofila satelital de MODIS-AQUA de 4km.....	176
Figura 74: Distribución de salinidad a lo largo del Canal Moraleda de los datos observados datos de IFOP, control y GLS a lo largo de la transecta de Moraleda.....	177
Figura 75: Diagramas TS y oxígeno disuelto de los datos observados y de las distintas condiciones iniciales.....	178



Índice de Tablas

Tabla 1: Posición de los ADCP utilizados en la evaluación de MC-Patanor.....	29
Tabla 2: Tabla resumen con las distintas fuentes de datos utilizadas para la evaluación de MW-Patanor.....	32
Tabla 3: Periodo utilizado en las boyas y estaciones meteorológicas para evaluar MW-Patanor.....	35
Tabla 4: Posición del ADCP utilizado en la evaluación de MC-Mag.....	40
Tabla 5: Descripción de la configuración 2018-2020 (SIM01).....	48
Tabla 6: Criterio de salinidad para definir las masas de aguas.....	48
Tabla 7: Descripción de la configuración utilizada en SIM02.....	50
Tabla 8: Parámetros espaciales de las grillas actuales y en desarrollo.....	57
Tabla 9: Principales configuraciones físicas usada en los anidados.....	57
Tabla 10: Tabla resumen con estadísticos utilizados para evaluar la temperatura del aire a 2 metros, en los escenarios de 5 km y 3 km. En verde se destaca el mejor valor según el estadístico.....	94
Tabla 11: Tabla resumen con estadísticos utilizados para evaluar la temperatura del aire a 2 metros, en los escenarios de 5 km y 3 km. En verde se destaca el mejor valor según el estadístico.....	95



RESUMEN EJECUTIVO

Este informe presenta los resultados del programa *Sistema de Pronósticos Oceanográficos y Atmosféricos 2024–2025*, creado con el objetivo de cubrir la necesidad de contar con información oceanográfica relevante, oportuna y confiable que permita conocer los estados presentes y futuros del mar en la Patagonia. Con el tiempo, el sistema se ha expandido hasta convertirse en un conjunto integrado de modelos atmosféricos y oceanográficos, y ha iniciado el desarrollo de componentes de oleaje y de biogeoquímica. Este avance no solo sustenta un sistema de pronósticos, sino que también habilita herramientas derivadas de la modelación para la gestión de contingencias sanitarias y ambientales, como la dispersión de partículas y propagación de patógenos. En esta etapa nos hemos enfocado principalmente en los modelos oceanográficos, atmosféricos y biogeoquímico, dejando el desarrollo del modelo de oleaje para la siguiente fase, en la que se espera retomar y consolidar el trabajo iniciado en la etapa anterior.

El trabajo se centró en la evaluación, validación y mejora de los modelos existentes, junto con la implementación de un nuevo modelo atmosférico de alta resolución para la región de Magallanes. Además, se avanzó en el desarrollo de la modelación biogeoquímica, la generación de modelos anidados de alta resolución en los fiordos Comau, Quitralco y el golfo Almirante Montt, así como en la mejora de la aplicación PartiMOSA, actualmente alojada en el portal CHONOS.

Las evaluaciones muestran que el modelo oceanográfico de Patagonia Norte presenta un mejor ajuste que en Magallanes, especialmente en su capacidad para reproducir patrones estacionales y estratificación vertical, un rasgo característico de las zonas estuarinas de la Patagonia. En términos generales, la temperatura en Patagonia Norte alcanza correlaciones superiores a 0,9 y un sesgo menor a 1 °C. En Magallanes, las correlaciones son similares, pero el sesgo es negativo y cercano a 2 °C, mientras que la salinidad presenta un sesgo promedio cercano a 3 PSU aunque este valor es fuertemente dependiente de la zona, variando entre 1 a 6 PSU. No obstante, las evaluaciones con boyas oceanográficas muestran que los modelos son capaces de reproducir la variabilidad sinóptica. Las corrientes presentan buenos ajustes, destacando la habilidad del modelo para representar los principales modos de oscilación asociados a la circulación estuarina y la formación de estructuras de tres capas.



La diferencia de desempeño entre las zonas se debe principalmente a una mejor representación de los flujos de agua dulce en Patagonia Norte. En Magallanes en cambio, la presencia de campos de hielo, el derretimiento de nieve y, en menor medida, el hielo marino, agrega mayor complejidad a la modelación. No obstante, se ha trabajado para reducir esta brecha mediante una nueva grilla y la incorporación de un nuevo forzante atmosférico para Magallanes, con una resolución espacial de 5 km, donde se espera que mejore los flujos de calor hacia la zona, así como los procesos de mezcla en las capas superficiales.

Por su parte, los modelos atmosféricos también muestran un alto nivel de ajuste con las observaciones, siendo ligeramente superiores en Patagonia Norte respecto de Magallanes. Las evaluaciones indican que los pronósticos atmosféricos reproducen adecuadamente procesos sinópicos, estacionales y eventos particulares. En contraste, al compararlos con el modelo global ERA5, se observa una diferencia notoria, mientras ERA5 no logra representar fenómenos locales de encajonamiento, los modelos desarrollados en este sistema sí logran reproducirlos con mayor realismo.

De igual modo durante esta etapa se avanzó de manera significativa en el desarrollo de un modelo biogeoquímico actualmente en fase de calibración, pero que a futuro busca construir un ATLAS. Las simulaciones iniciales (SIM01 y SIM02) han mostrado que el modelo es capaz de reproducir de manera general las principales masas de agua, aunque aún persiste la necesidad de mejorar la representación del aporte de agua dulce, un factor crítico en zonas estuarinas. En particular, SIM02 —que incorporó un mayor spin-up y ajustes en los procesos de mezcla vertical— logró una representación más realista de la estratificación, aunque mantuvo una subestimación de los niveles de oxígeno disuelto. La validación mediante imágenes satelitales MODIS-AQUA permitió confirmar que el modelo reproduce adecuadamente los patrones espaciales de clorofila, aunque tiende a subestimar los máximos en la costa oceánica de Chiloé. Este resultado apunta a la necesidad de afinar parámetros biológicos, especialmente las tasas de crecimiento del fitoplancton.

En conjunto, los avances alcanzados en esta etapa constituyen un paso clave hacia la consolidación de un sistema biogeoquímico integrado, capaz de complementar las simulaciones físicas y atmosféricas ya operativas. Las mejoras previstas en la calibración permitirán no solo una mejor representación de procesos ecosistémicos, sino también el desarrollo futuro de aplicaciones en



gestión ambiental, monitoreo de floraciones de algas nocivas y apoyo a la acuicultura.

Paralelamente, en este informe se presenta el desarrollo de una nueva versión de la aplicación Partimosa la cual incluye mejoras en el código, expansión del catálogo de partículas y una nueva y más completa interfaz gráfica, la cual está disponible actualmente en el portal de información oceanográfica CHONOS (chonos.ifop.cl).

Finalmente destacar que el desarrollo de modelos operacionales en zonas costeras complejas, como los fiordos del sur de Chile, resulta fundamental para la gestión sostenible de actividades económicas y la protección ambiental. Experiencias internacionales muestran que contar con pronósticos de alta resolución permite enfrentar riesgos como marejadas, variabilidad hidrográfica y eventos extremos, además de apoyar la gestión de actividades productivas como la acuicultura, mitilicultura y la pesca. De esta manera, un sistema de modelación operacional robusto no solo proveerá mejores pronósticos, sino que se convertirá en una herramienta estratégica para la gestión integrada de la Patagonia chilena



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, mitilicultores, 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 Cacao, 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. 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., 2010). 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 salmonídeos 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 deben considerar herramientas operacionales cuantitativas que otorguen información relevante del estado del mar, tales como oleaje significativo, vientos, anomalías térmicas, flujos de oxígeno disuelto, etc, a fin de garantizar una operación segura.

El desarrollo de sistemas operacionales de pronóstico océano-atmosférico resulta estratégico para un país como Chile, donde los mares interiores de la Patagonia concentran actividades productivas tales como acuicultura y mitilicultura, altamente vulnerables a cambios ambientales. Contar con predicciones diarias de alta resolución es clave para la planificación territorial, la gestión de emergencias (mareas rojas, brotes de patógenos, hipoxia, derrames de hidrocarburos, ondas de calor, etc), y la adaptación frente al cambio climático, que ya modifica el régimen hidrológico y las condiciones de estratificación en la región (León-Muñoz et al., 2024). Experiencias en otras cuencas marginales como el Mar de Barents (Röhrs et al., 2023) y el Mar Negro (Ciliberti et al., 2021) muestran cómo los sistemas de pronóstico proveen soporte a la seguridad marítima, la gestión ambiental y la toma de decisiones gubernamentales. Esto subraya la necesidad de consolidar y mejorar continuamente las capacidades operacionales en Patagonia para anticipar riesgos y asegurar la sostenibilidad de sus ecosistemas y economías locales.



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 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 para 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. A partir de un modelo operacional podemos obtener 3 tipos de productos: modelos retrospectivos (Hindcast), modelos 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 en su conjunto fue nombrado como “Modelo Operacional Sur-Austral” (MOSA).

MOSA integra actualmente dos categorías de modelos numéricos, oceanográficos, encargados de simular la dinámica marina, y atmosféricos, utilizados para definir las condiciones de contorno en la superficie del océano. 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. Tanto CROCO, un modelo de circulación oceánica de tipo hidrostático y no hidrostático, como WRF, un modelo de circulación atmosférica, resuelven las ecuaciones primitivas de conservación de momento, energía y masa sobre una malla estructurada de tipo rectangular (véase **Anexo A**). En particular, WRF cuenta con un esquema no hidrostático que permite el desplazamiento libre de las parcelas de aire a lo largo de la columna atmosférica (véase **Anexo A**). En términos generales, se utilizará la denominación MC-Patanor (antiguamente denominado MOSA-CROCO) para referirse al modelo oceanográfico correspondiente a la zona norte de la Patagonia chilena, comprendida entre las regiones de Los Lagos y Aysén; MC-MAG (antiguamente denominado MOSA-MAG) para el modelo oceanográfico centrado en la región de Magallanes (entre los 52°S y 56.5°S); MW-Patanor (antiguamente denominado MOSA-WRF) para el modelo atmosférico aplicado a la Patagonia norte; y MW-MAG para el modelo correspondiente a la región de Magallanes.

Para operar diariamente MC-Patanor, se construye el modelo basado en un dominio con 1 km de resolución horizontal y 42 niveles verticales, donde obtiene sus condiciones de borde atmosféricas desde de modelo MW-Patanor, mientras sus condiciones de borde son descargadas desde Copernicus Marine Service. además incluye caudales de los principales ríos de la Patagonia como fuentes de dispersión obtenidos del modelo hidrológico FLOW (chonos.ifop.cl/flow) (**Figura 1**).

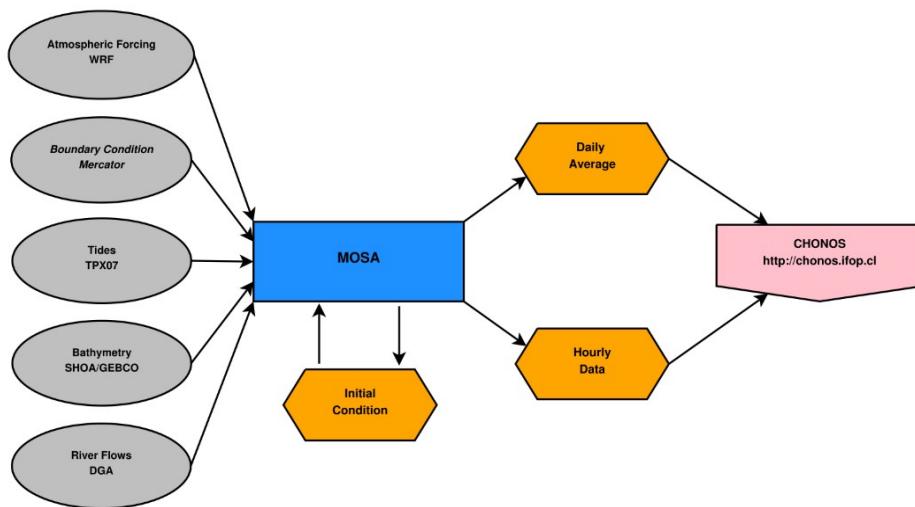


Figura 1: Operación diaria de MC-Patanor / MC-Mag

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. Con esta actualización podemos acceder a las 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, el primero corresponde a MC-Patanor 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, MC-Mag, su desarrollo comenzó el 2019 y las pruebas operacionales durante el 2021. Ambos modelos tienen una resolución espacial aproximada de 1 a 1.5km.

SISTEMA DE PRONÓSTICOS ATMOSFÉRICOS MOSA-WRF

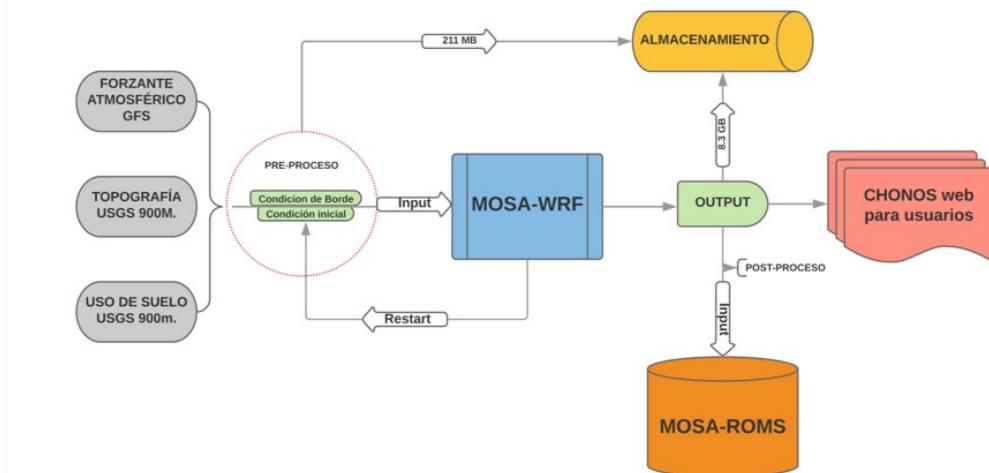


Figura 2: Operación diaria de MW-Patanor / MW-Mag.



Para que el modelo numérico pueda resolver las ecuaciones primitivas en cada paso de tiempo, es necesario contar con información detallada de variables oceanográficas tanto en el plano horizontal como vertical. Estas variables incluyen velocidad de corriente, temperatura, salinidad y nivel del mar, y constituyen lo que se conoce como condiciones de borde o condiciones de frontera, especialmente cuando presentan variabilidad temporal. En este sistema, dichas condiciones se aplican diariamente en los bordes abiertos del dominio, es decir, en aquellos límites donde existe intercambio de masa de agua. Además, a lo largo de estos bordes se implementa una capa esponja de 10 km de ancho, con el fin de atenuar reflexiones indeseadas y evitar la generación de ondas espurias (Penven et al., 2006).

Actualmente, los modelos utilizan condiciones de borde interpoladas a partir de diversos productos de Copernicus Marine Services, junto con una condición inicial derivada del pronóstico del día anterior. De esta manera, son capaces 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 entre otros. 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. Los campos de las variables atmosféricas actualmente son obtenidos del pronóstico operacional atmosféricos MW-Patanor de 3 km de resolución espacial (**Figura 2**) implementado especialmente para MC-Patanor. En el caso del modelo para Magallanes, desde esta etapa se utiliza el modelo MW-Mag, modelo basado en WRF con 5 km de resolución.

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 picnoclina 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 de agua dulce para el dominio de Chiloé-Aysén y 25 fuentes para el dominio de Magallanes, ambos con flujos con variabilidad diaria obtenidos desde el modelo hidrológico FLOW.

Además de los modelos oceanográficos y atmosféricos se está trabajando en la implementación de un modelo operacional de oleaje, del cual se presentó el diseño en el informe de etapa anterior, y en modelación Biogeoquímica, cuyos avances son presentados en este informe, ambos focalizados en los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén.

1.3 Desarrollo del proyecto

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 las etapas del proyecto.

En la primera fase (2014–2016) el proyecto se centró en el diseño e implementación del modelo hidrodinámico basado en ROMS-AGRIF, denominado inicialmente como MOSA-ROMS, el cual integraba información del modelo global Mercator-Ocean y pronósticos atmosféricos GFS, y entregaba resultados visibles en línea a través de la plataforma CHONOS (chonos.ifop.cl). Se hizo un diagnóstico de la información oceanográfica disponible y se evaluó el modelo de forma preliminar. Posteriormente, se inició un proceso de calibración y mejora para reducir errores, apoyado en literatura científica y datos de observación de IFOP y



otras instituciones, así como la evaluación de tecnologías para transmisión de datos en tiempo real desde nuevos puntos de observación.

La segunda fase (2016–2020) estuvo marcada por la creación de aplicaciones web para estimar transporte de materiales asociados a la acuicultura, la incorporación de mejoras al modelo y la implementación de un modelo atmosférico propio (En su momento denominado MOSA-WRF). Se añadieron nuevas fuentes de agua dulce, se ajustó la batimetría y se comenzó a evaluar un modelo biogeoquímico basado en el modulo NPZD de ROMS-AGRIF. En 2019, el modelo pasó a su nueva versión CROCO, cuyas salidas alimentaron el modelo de dispersión de partículas Parti-MOSA; se evaluaron los modelos MW-Patanor y dos modelos biogeoquímicos (NPZD y PISCES), y se realizó un diagnóstico de un modelo físico para Magallanes.

La tercera fase (2020–2024) incluyó evaluaciones y mejoras de MC-Patanor y MW-Patanor para distintas regiones del sur de Chile, la incorporación y ajuste de modelos biogeoquímicos para diagnóstico (NPZD, PISCES y FENNEL), mejoras a la batimetría, además del inicio de desarrollo del modelo de oleaje MOSA-WW3 y la evaluación de un modelo físico específico para Magallanes, consolidando un sistema operacional integrado y multi-modelo.

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/>), utilizando las palabras “sinóptico” o “pronósticos” como filtro de búsqueda.



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

- 1.** Actualizar la evaluación del sistema operacional MOSA con las últimas observaciones ambientales disponibles en las regiones de Los Lagos y Aysén.

- 2.** Calibrar y evaluar el modelo MOSA para la región de Magallanes y la Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas.

- 3.** Evaluar el modelo biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo durante los años 2018-2020.

- 4.** Implementar Parti-MOSAv2.0 en el portal web CHONOS.

- 5.** Diseñar modelos anidados de alta resolución espacial entre la región de Los Lagos y Magallanes y la Antártica Chilena.



3. Glosario

En este informe utilizaremos una nomenclatura genérica para referirnos a los diversos modelos que corren. Los nombres de los modelos operacionales se componen de una **M** inicial por MOSA (modelo operacional sur austral), seguido de la inicial del modelo utilizado, CROCO (**C**), WRF (**W**) o Wave Watch 3 (**WW3**), seguido de la zona que representa, De esta forma se usa una nomenclatura genérica y auto explicativa. Por ejemplo, **MC-Patanor**, es el modelo operacional (**M**) basado en CROCO (**C**) para la Patagonia norte (**Patanor**). Este modelo anteriormente era denominado MOSA-CROCO. En este informe usaremos el siguiente Glosario:

MC-COMAU: Modelo anidado en fiordo Comau.

MC-GAM: Modelo anidado en Golfo Almirante Montt

MC-PATANOR: Modelo operacional basado en CROCO de pronósticos oceanográficos para Patagonia Norte, Se extiende entre mares interiores de las regiones de Los Lagos y Aysén. Antiguamente denominado MOSA-CROCO.

MC-MAG: Modelo operacional basado en CROCO de pronósticos oceanográficos para la región de Magallanes. Se extiende entre Estero Peer y Cabo de Hornos Antiguamente denominado MOSA-MAG.

MC-QUITRA: Modelo anidado en fiordo Quitralco.

MW-PATANOR: Modelo operacional basado en WRF de pronósticos atmosféricos para Patagonia norte. Antiguamente denominado MOSA-WRF.

MW-MAG: Modelo operacional basado en WRF de pronósticos atmosféricos para Magallanes.

MWW3-PATANOR: Modelo de oleaje en Patagonia norte. (aun no operacional)

MOSA: sistema de modelos operacionales Sur Austral.



4. Metodología

4.1 Metodología objetivo específico 1:

“Actualizar la evaluación del sistema operacional MOSA con las últimas observaciones ambientales disponibles en las regiones de Los Lagos y Aysén”.

En esta sección se presenta la metodología del desarrollo y evaluación del modelo operacional de pronósticos oceánicos de 3 días basado en CROCO, Mc-Patanor, y también la metodología del desarrollo y evaluación del modelo operacional atmosférico MW-Patanor, el cual está basado en WRF y genera pronósticos a 5 días. Ambos modelos están enfocados en la zona norte de la Patagonia Chilena, entre las regiones de Los Lagos y Aysén. Se está desarrollando un modelo de pronóstico de oleaje para el mar interior de Chiloé, denominado MWW3-Patanor, el cual fue evaluado en el informe anterior de este programa. El modelo aun no está operacional.

4.1.1 Océano (Modelo MC-Patanor)

Los productos satelitales disponibles casi en tiempo real han permitido llevar un monitoreo continuo de la capacidad del modelo en reproducir la estacionalidad de la temperatura superficial además de evidenciar cómo se ha ido ajustando a lo largo del desarrollo del sistema. Sin embargo, debido a la resolución espacial y la alta cobertura nubosa presente en la región, estos productos presentan una limitación en su capacidad de observar la variabilidad dentro del mar interior de Chiloé y de Aysén, principalmente en procesos de escala local que ocurren en el interior de los fiordos, bahías y canales presentes en la región. Últimamente se cuenta con los datos del programa Centro de datos para la acuicultura, el cual contiene una valiosa red de boyas oceanográficas y atmosféricas, lo cual nos permite ampliar la fuente de datos disponibles para evaluar y calibrar el modelo. La validación del modelo de pronósticos MC-Patanor se llevó a cabo mediante una comparación estadística con un enfoque espacio-temporal que integró temperatura superficial del mar (TSM) de datos satelitales y mediciones in situ de temperatura, salinidad y corrientes.



En primera instancia, se evaluó la continuidad y éxito de los pronósticos durante el periodo operacional enero de 2024 y junio de 2025. Se definieron como días exitosos aquellos en los que los procesos de ejecución del pronóstico se realizaron sin interrupciones, generando y almacenando correctamente los archivos de salida en la base de datos. A partir de este criterio, se calculó el porcentaje de éxito respecto al total de días pronosticados, identificando también los días con ejecución fallida, lo que permitió caracterizar la estabilidad operacional del sistema.

Evaluación de TSM, MC-Patanor

Para la evaluación de la variabilidad de la TSM, se realizó una comparación entre las simulaciones de MC-Patanor y datos observados de productos satelitales. A escala diaria, se utilizaron datos del sensor AVHRR entre enero de 2017 y mayo de 2025, con el fin de evaluar la concordancia entre las series temporales del modelo y las observaciones. Se calcularon promedios espaciales en tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (**Figura 3**). Para cada una, se estimaron métricas estadísticas tales como el coeficiente de correlación de Pearson (r), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (bias) que permitieron cuantificar la precisión, el error y las desviaciones sistemáticas del modelo respecto a las observaciones. De manera complementaria, y con el objetivo de analizar la variabilidad espacial de las métricas de validación, para el periodo enero de 2017 y marzo de 2025, se construyeron mapas con el coeficiente de correlación, el RMSE y el sesgo entre la TSM pronosticada por MC- Patanor y la observada por AVHRR.

El producto AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) es una base de datos generada a partir de la combinación de información de diversas plataformas (oceánicas y satelitales) con el fin de obtener la mejor interpolación posible a una resolución de $0,25^\circ$, empleando la metodología Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) desarrollada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Los datos satelitales están disponibles en: <https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/>

Adicionalmente, se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) a las series mensuales de TSM provenientes de MC-Patanor y AVHRR para el periodo 2018–2025. Se interpolaron linealmente las salidas del modelo operacional a la grilla de menor resolución de AVHRR. Este análisis permitió identificar los patrones espacio-temporales dominantes de la variabilidad de la TSM y compararlos entre las fuentes de información mencionadas. Los resultados se presentaron mediante funciones ortogonales empíricas (EOF), que muestran la distribución espacial de los pesos de los modos que describen la evolución temporal de dicho modo, facilitando la comparación de la coherencia temporal entre el modelo y las observaciones.

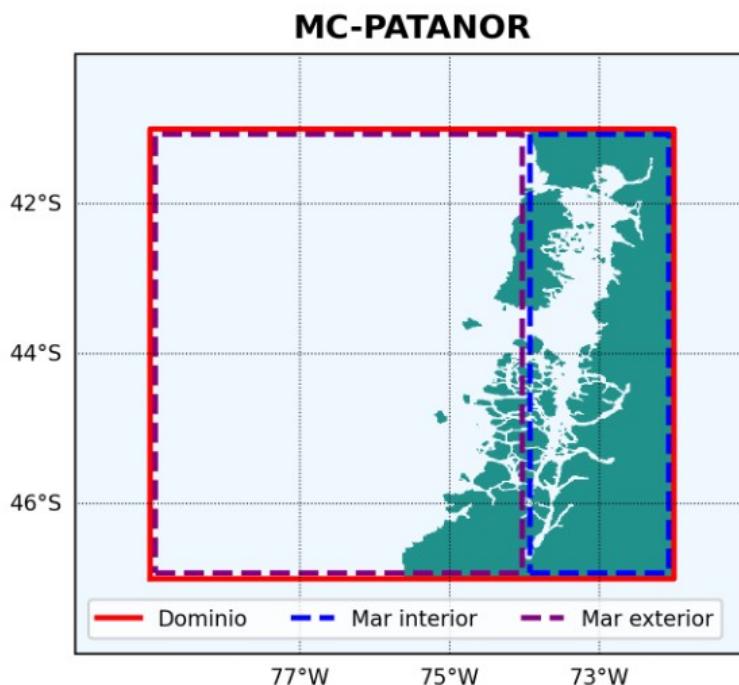


Figura 3: Dominio MC-PATANOR, sección mar interior y mar exterior considerados para la validación temporal de la TSM.



La validación también consideró el comportamiento estacional de la TSM durante las temporadas JJA-2024, SON-2024, DJF-2024/25 y MAM-2025. Para ello, se utilizaron datos satelitales diarios del sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), procesados por el Ocean Biology Processing Group del NASA Goddard Space Flight Center. El producto empleado corresponde a un mapa global de nivel 3 (Standard Mapped Image) grillado, con una resolución espacial de 4,64 km aproximadamente .

A partir de estos datos, se compararon los promedios estacionales obtenidos por el modelo MC-Patanor con los observados por VIIRS, acompañado del cálculo del porcentaje de cobertura de datos en cada píxel para cada estación del año, con el fin de identificar posibles sesgos derivados de la disponibilidad de observaciones satelitales. Los datos VIIRS fueron descargados desde el portal de la NASA Ocean Color: <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>.

Evaluación de la corriente del modelo MC-Patanor

La evaluación de corriente en el modelo MC-Patanor se realizó en base a mediciones de correntometría en la columna de agua en la boca del fiordo Reloncaví, y canal Moraleda, la corriente fue medida con 2 ADCP anclados a media agua (100 m), midiendo hacia arriba con una frecuencia de medición de 1 hora, se utilizó ADCP RDI 300kHz, la información detallada de los anclajes se encuentra en la **Tabla 1**. Estos anclajes son parte del programa de Monitoreo y Modelación numérica en Patagonia ejecutados por el grupo de Oceanografía de la División de Acuicultura de IFOP.

Se realizó un análisis preliminar entre los cuatro transductores del ADCP, sólo se trabajó con los datos que obtuvieron 90% de correlación y se eliminó el nivel más cercano a la superficie, para remover el efecto de variación de nivel del mar. Posteriormente, se realizó la corrección magnética correspondiente a cada punto, de esta manera los datos fueron orientados al norte geográfico.

Se calculó el flujo residual de la corriente, aplicando un filtro de pasa-baja, coseno de Lanczos de 121 pesos y periodo de corte de 40 horas. La capacidad del modelo hidrodinámico de reproducir los principales procesos que modulan la estructura temporal y espacial de las corrientes en la boca del fiordo Reloncaví y canal Moraleda fue evaluada mediante un análisis de Función Ortogonal Empírica



(EOF) (Thomson y Emery, 2014), contrastando las corrientes submareales modeladas y las provistas por un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante un periodo 9 meses (**Tabla 1**).

Tabla 1: Posición de los ADCP utilizados en la evaluación de MC-Patanor.

Ubicación	Latitud (S)	Longitud (W)	Fecha inicial	Fecha final	z
Reloncavi (RDI 300)	-41.723	-72.6127	12/09/22	15/10/2023	8.94m - 88.94m
Moraleda (RDI 300)	-44.6667	-73.5161	21/08/2018	10/03/19	5.1m - 57.1m

Boyas oceanográficas

Finalmente se realizó una validación utilizando datos *in situ* provenientes de boyas oceanográficas instaladas en las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) en Patagonia. La información, almacenada en el Centro de Datos Ambientales de la Acuicultura de IFOP (Programa de centro de datos oceanográficos y ambientales en la zona Sur-Austral de Chile), está disponible para su descarga en la aplicación Centro de Datos del portal CHONOS: <https://chonos.ifop.cl/acs/start/>.

Para el análisis se compararon los promedios diarios de las series temporales de TSM y salinidad. La información diaria de las variables pronosticadas por MC-Patanor se obtuvieron mediante una interpolación lineal en las coordenadas horizontales (longitud y latitud) y verticales (profundidad) hacia las posiciones correspondientes a los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (72,32953° O; 41,6037° S, a profundidades de 5 m y 50 m) y ACS 10A (73,5719° O; 42,6466° S (<https://chonos.ifop.cl/acs/start/>), a profundidades de 10 y 50 m), para el periodo comprendido entre enero de 2024 y julio de 2025. En el caso particular de la salinidad registrada en la estación ACS1 a 5 metros de profundidad, se aplicó una media móvil de 7 días con el fin de atenuar el ruido en la señal. Esta comparación permitió evaluar la capacidad del modelo para reproducir la estructura vertical de la columna de agua y su variabilidad temporal en puntos específicos de la zona de estudio.

4.1.2 Atmósfera (modelo MW-Patanor)

El modelo MW-Patanor corresponde a un sistema de pronóstico atmosférico regional implementado y operado por IFOP en el marco del presente proyecto. Este modelo ha operado de manera continua desde el año 2018, generando salidas diarias con resolución temporal horaria y un horizonte de pronóstico de 72 horas, abarcando variables meteorológicas tales como temperatura del aire a 2 metros y las componentes zonal (U) y meridional (V) del viento a 10 metros, entre otras.

Las simulaciones se ejecutan sobre una malla de alta resolución espacial (3 km) centrada en la Patagonia Norte, lo que permite representar con mayor detalle las condiciones atmosféricas locales, especialmente en áreas complejas desde punto de vista topográfico y costero. Las salidas del modelo constituyen la base para forzar el modelo hidrodinámico MC-Patanor, además se utilizaran para alimentar al modelo operacional de oleaje en desarrollo, y como forzante de superficie en simulaciones de deriva de partículas flotantes en Partimosa.

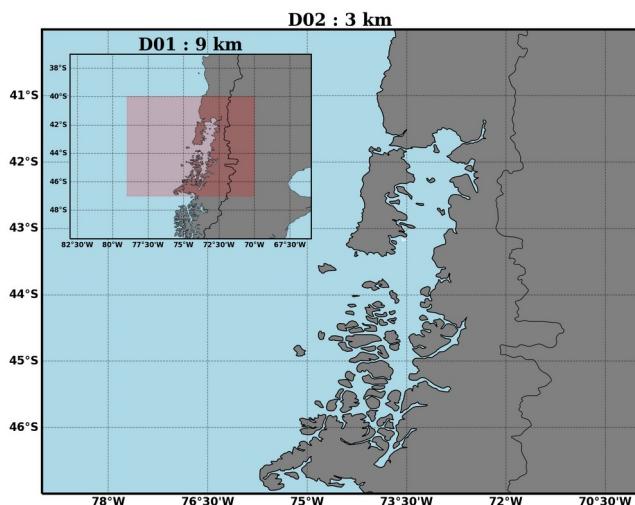


Figure 1: Dominios de MW-Patanor.

La evaluación del modelo se realizó con datos observacionales provenientes de dos tipos de plataformas de medición en terreno, Estaciones meteorológicas y Boyas oceanográficas.



Las estaciones forman parte de la red de monitoreo atmosférico operada por IFOP, REDMET (<https://chonos.ifop.cl/redmet/>), implementada desde el 2018 en el marco de este proyecto. Están distribuidas en las regiones de Los lagos, Aysén y Magallanes, y cuentan con sensores de temperatura, magnitud y dirección del viento, entre otros, con registros cada 10 minutos. Estos datos permiten realizar evaluaciones puntuales del modelo en diversas zonas costeras, tanto en áreas abiertas como en regiones de topografía más compleja. (Para más detalles sobre REDMET, ver **Anexo B**).

Por su parte las boyas fueron instaladas a partir del año 2023 en el contexto del proyecto “Centro de datos para la acuicultura” (<https://chonos.ifop.cl/acs/start/>). Las boyas están ubicadas dentro de distintas Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) y además están equipadas con sensores meteorológicos y oceanográficos. Miden entre otros parámetros, la temperatura del aire y la velocidad del viento, con registros de frecuencia horaria. Esta fuente de datos permite evaluar el desempeño del modelo en ambientes marinos, donde las condiciones atmosféricas presentan diferencias importantes respecto a las registradas en estaciones terrestres. Cabe señalar que en esta etapa la variable dirección del viento no fue considerada en el análisis con boyas debido a que no superó los controles de calidad aplicados.

Como tercera fuente de información se utilizaron datos del modelo de reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2018b), desarrollado por el Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF). ERA5 representa una reconstrucción global del estado de la atmósfera, ampliamente validada y reconocida por la comunidad científica.

Este conjunto de datos tiene una resolución espacial de 0.25°, cobertura temporal horaria desde 1940 hasta la actualidad, y una extensión vertical hasta los 80 km de altitud (137 niveles). En la Patagonia Occidental, ERA5 ha sido empleado en múltiples estudios, evidenciando su valor para la investigación regional (Vásquez et al., 2023; Gómez-Fontalba et al., 2022). Este producto fue utilizado como referencia para comparar la distribución espacial del modelo MW-Patanor, bajo el supuesto de que representa una estimación confiable a gran escala de las condiciones atmosféricas promedio. Se consideraron las variables temperatura del aire a 2 metros, magnitud y componentes ortogonales (U y V) del viento a 10 metros, procesadas para el mismo período de análisis cubierto por

MW-Patanor. (*El conjunto de datos está disponible en <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.*

A continuación, en la **Tabla 2** se presenta un resumen de las distintas fuentes de datos utilizadas para la evaluación del modelo MW-Patanor, con sus principales características, incluyendo el tipo de dato, las variables evaluadas, la frecuencia y cobertura temporal, la ubicación geográfica y observaciones relevantes asociadas a su uso en este estudio.

Tabla 2: Tabla resumen con las distintas fuentes de datos utilizadas para la evaluación de MW-Patanor.

Fuente de datos	Tipo	Variable clave	Frecuencia	Cobertura temporal	Ubicación geográfica	Observación adicional
MW-Patanor (MOSA-WRF)	Modelo de pronóstico	Temp. aire (2 m), Viento U/V (10 m)	Horaria	Desde 2018	Patagonia Norte (resolución 3 km)	Base del sistema integrado, alimenta MC-Patanor
Estaciones meteorológicas IFOP	Observación en tierra	Temp. aire, Mag./Dir. del viento	10 minutos	Desde 2018	Regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes	Topografía variada: zonas abiertas y complejas
Boyas oceanográficas (ACS)	Observación en mar	Temp. aire (2 m), Mag. del viento	Horaria	Desde 2023	ACS's Regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes	No se consideró la dirección del viento por calidad de datos
ERA5 (ECMWF)	Reanálisis global	Temp. aire (2 m), Viento U/V (10 m)	Horaria	1940 - Actualidad	Global (resolución 0.25°)	Comparación espacial como referencia externa confiable

Evaluación temporal en estaciones meteorológicas y boyas

La evaluación temporal del modelo MW-Patanor se realizó mediante la comparación de sus salidas con observaciones provenientes de estaciones meteorológicas terrestres y boyas oceanográficas instaladas en la región de Patagonia Norte (**Figura 4**). Aunque las fechas de inicio de operación varían entre las distintas plataformas, todas comenzaron a entregar datos durante el año 2023. El análisis se enfocó en este periodo reciente ya que corresponde a la etapa más actual de operación del modelo, cuya configuración ha alcanzado mayor estabilidad. Cabe señalar que los periodos previos ya han sido evaluados de

forma sistemática en informes técnicos anteriores, por lo que no se abordan en el presente documento.

Esta evaluación se enfocó exclusivamente en una zona de análisis, abarcando un conjunto específico de cinco estaciones terrestres y tres boyas oceanográficas, seleccionadas por su representatividad geográfica, cobertura espacial y temporal. Se consideraron tres boyas ubicadas en sectores clave dentro de las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS), específicamente en ACS1, ACS10A y ACS34 (<https://chonos.ifop.cl/acs/start/>). Se analizó la temperatura del aire y magnitud del viento. Mientras que las series originales, de frecuencia horaria, fueron transformadas a promedios diarios, con el objetivo de reducir la variabilidad de alta frecuencia y facilitar su análisis comparativo con las salidas del modelo.

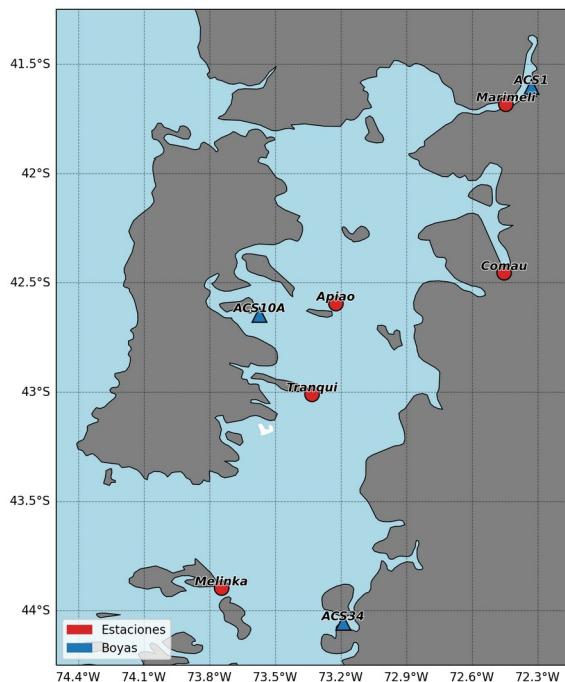


Figura 4: Ubicación de las boyas y estaciones meteorológicas utilizadas para evaluar MW-Patanor.



Nota: La dirección del viento no fue considerada en el análisis con boyas, debido a que los datos no superaron los filtros de control de calidad aplicados.

Estaciones meteorológicas terrestres

Se utilizaron cinco estaciones pertenecientes a REDMET, ubicadas en las localidades de Apiao, Comau, Marimeli, Isla Tranqui y Melinka (chonos.ifop.cl/redmet). Estas estaciones operan con sensores atmosféricos de alta frecuencia, distribuidas en zonas costeras con distinta complejidad topográfica, lo que permite una evaluación detallada del modelo en entornos diversos (ver **Figura 4**).

Se analizó la Temperatura del aire a 2 metros, y la dirección y magnitud del viento (rosas de viento). Para el procesamiento de datos de temperatura se tomo los datos originales, registrados cada 10 minutos, y fueron promediados de forma diaria para su comparación con los resultados del modelo. Por su parte las rosas de viento se generaron a partir de promedios horarios de la dirección y magnitud del viento, permitiendo una representación visual de los patrones dominantes en cada sitio. Para cada estación y boya se extrajeron series temporales virtuales directamente desde las salidas horarias del modelo MW-Patanor, en las coordenadas más cercanas a cada sitio de observación. En el caso del viento, se derivaron tanto la magnitud como la dirección a partir de las componentes zonal (U) y meridional (V) simuladas a 10 metros de altura.

La comparación entre las series observadas y modeladas se realizó mediante los siguientes indicadores estadísticos, calculados para cada sitio y variable evaluada:

- Sesgo (Bias): diferencia promedio entre los datos del modelo y las observaciones.
- Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE): medida del error promedio en magnitud.
- Correlación de Pearson (r): indicador de asociación lineal entre ambas series.



Adicionalmente, para las estaciones meteorológicas se generaron rosas de viento comparativas entre las observaciones y las salidas del modelo, con un enfoque visual y descriptivo orientado a identificar diferencias en la velocidad y frecuencia del viento predominante. Los períodos efectivos de operación considerados para este informe, por cada estación y boya se detallan en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Período utilizado en las boyas y estaciones meteorológicas para evaluar MW-Patanor.

Plataforma	Nombre	Tipo	Fecha inicio	Fecha fin
Centro de Datos	ACS1	Meteo. marina	07/12/2023	26/06/2025
Centro de Datos	ACS10	Meteo. marina	23/03/2023	26/06/2025
Centro de Datos	ACS34	Meteo..marina	16/04/2023	25/04/2025
REDMET	Apiao	Meteo. terrestre	01/01/2023	18/07/2025
REDMET	Comau	Meteo. terrestre	01/01/2023	18/07/2025
REDMET	Marimeli	Meteo. terrestre	08/02/2023	16/06/2025
REDMET	Tranqui	Meteo. terrestre	01/01/2023	03/07/2025
REDMET	Melinka	Meteo. terrestre	01/01/2023	18/07/2025

Comparación espacial con ERA5

Con el objetivo de contrastar la representación espacial del modelo MW-Patanor con un producto de referencia ampliamente reconocido y validado a nivel internacional, se realizó una comparación directa con datos del reanálisis ERA5, desarrollado por el ECMWF.

La comparación abarcó un período anual comprendido entre junio de 2024 y mayo de 2025, que coincide con la fase más reciente de desarrollo y operación del modelo en el marco de este proyecto. Se compararon las variables de temperatura del aire a 2 metros, magnitud del viento a 10 metros y vectores de viento (componentes zonal y meridional) a 10 metros.

Las componentes zonal (U) y meridional (V) del viento simuladas por MW-Patanor fueron interpoladas para coincidir con la resolución espacial de ERA5 (0.25°), utilizando técnicas de re muestreo espacial que permiten una comparación directa punto a punto sobre una grilla común. De estas componentes se derivaron la magnitud y dirección del viento para ambos productos. La temperatura del aire a 2 metros del modelo también fue re muestreada a la resolución de ERA5.

Las salidas de MW-Patanor y ERA5 fueron agrupadas por estaciones del año; invierno, primavera, verano y otoño, con el fin de identificar posibles variaciones estacionales en el desempeño del modelo. Para cada estación del año, se calcularon estadísticos puntuales en cada celda de la grilla:

Finalmente, se realizó una comparación visual de los vectores promedios estacionales del viento, para analizar similitudes y diferencias en la dirección y magnitud del flujo atmosférico entre ambos productos, además de su distribución espacial considerando las distintas resoluciones.

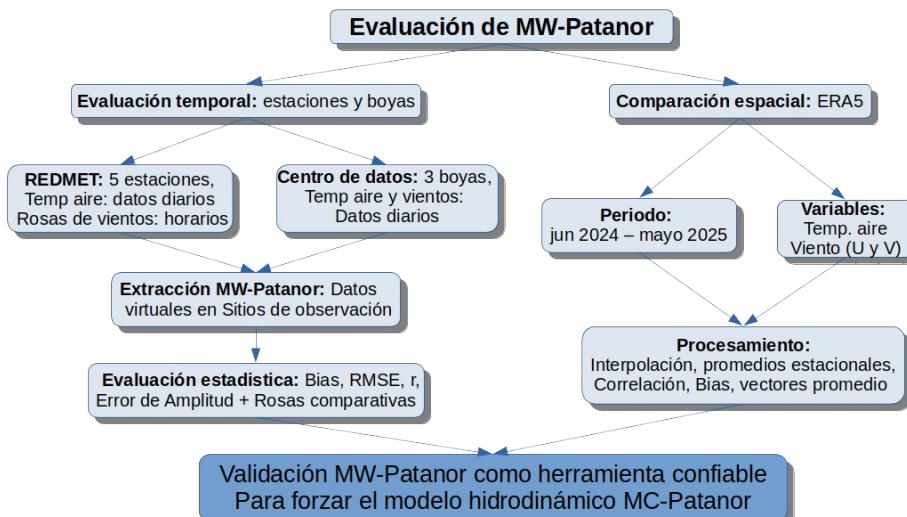


Figura 5: Esquema resumen con metodología usada para la evaluación de MW-Patanor.



4.2 Metodología objetivo específico 2:

“Calibrar y evaluar el modelo MOSA para la región de Magallanes y la Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas”.

4.2.1 Océano (Modelo MC-Mag)

En esta sección presentaremos las evaluaciones del modelo, así como mejoras en grilla e implementación de un nuevo forzante atmosférico de alta resolución, MW.Mag.

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 tiene un modelo basado en una grilla equilibrada entre una batimetría realista y la estabilidad numérica del modelo. El objetivo de MC-Mag es tener un modelo operacional que sea capaz de generar pronósticos a un horizonte de 3 días para la región de Magallanes, además 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 etapas previas hemos presentado como se ha ido construyendo paso a paso las diferentes partes del modelo.

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 (~51 °S), hasta el sur del archipiélago de Cabo de Hornos (~57 °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 abierto en los 4 puntos cardinales. Se consideró que la extensión del dominio debe contener zonas de interés para futuros modelos anidados de mayor resolución espacial como el seno Ottway, seno Skyring y Golfo Almirante Montt, estrecho de Magallanes, Canal Beagle e Isla Navarino.

La metodología utilizada para la evaluación del modelo operacional MC-Mag fue análoga a la empleada en el modelo MC-Patanor. Se desarrolló una comparación estadística con un enfoque espacio-temporal, integrando información



de datos satelitales y mediciones in situ. El objetivo fue evaluar su desempeño tanto en términos de continuidad operacional como en su capacidad para reproducir la variabilidad observada en la temperatura superficial del mar (TSM) y en la columna de agua, la salinidad y corrientes.

En primer lugar, se analizó la continuidad operacional del modelo durante el periodo 2024–2025. Se calculó el porcentaje de éxito respecto al total de días pronosticados, identificando también los días con ejecución fallida, lo que permitió caracterizar la estabilidad operacional del sistema MC-Mag.

Para la evaluación de la TSM, se compararon las simulaciones de MC-Mag con observaciones satelitales del sensor AVHRR, a escala diaria, para el periodo enero de 2022 y mayo de 2025. Se calcularon promedios espaciales en tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (este último definido como el área resultante de restar el mar interior al dominio completo) (**Figura 6**). Para cada área se estimaron métricas estadísticas; coeficiente de correlación de Pearson (r), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y sesgo medio (bias), con el fin de cuantificar la precisión, el error y las desviaciones sistemáticas del modelo respecto a las observaciones. Asimismo, se evaluó la variabilidad espacial de estas métricas, entre enero de 2022 y marzo de 2025, el coeficiente de correlación, el RMSE y el sesgo.

También se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) a las series mensuales de TSM de MC-Mag y AVHRR para el periodo 2022–2025. Los resultados se representaron mediante funciones ortogonales empíricas (EOF), que describen la distribución espacial de los pesos asociados al primer modo, y componentes principales (PCA), que muestran la evolución temporal de dicho modo, facilitando la comparación de la coherencia temporal entre modelo y observaciones. Al igual que en MC-Patanor, la validación incluyó el análisis del comportamiento estacional de la TSM para las temporadas JJA-2024, SON-2024, DJF-2024/25 y MAM-2025, empleando datos diarios del sensor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Se compararon los promedios estacionales obtenidos por el modelo con los observados por VIIRS, incorporando el cálculo del porcentaje de cobertura de datos en cada píxel para cada temporada, con el fin de identificar posibles sesgos asociados a la disponibilidad de observaciones satelitales.

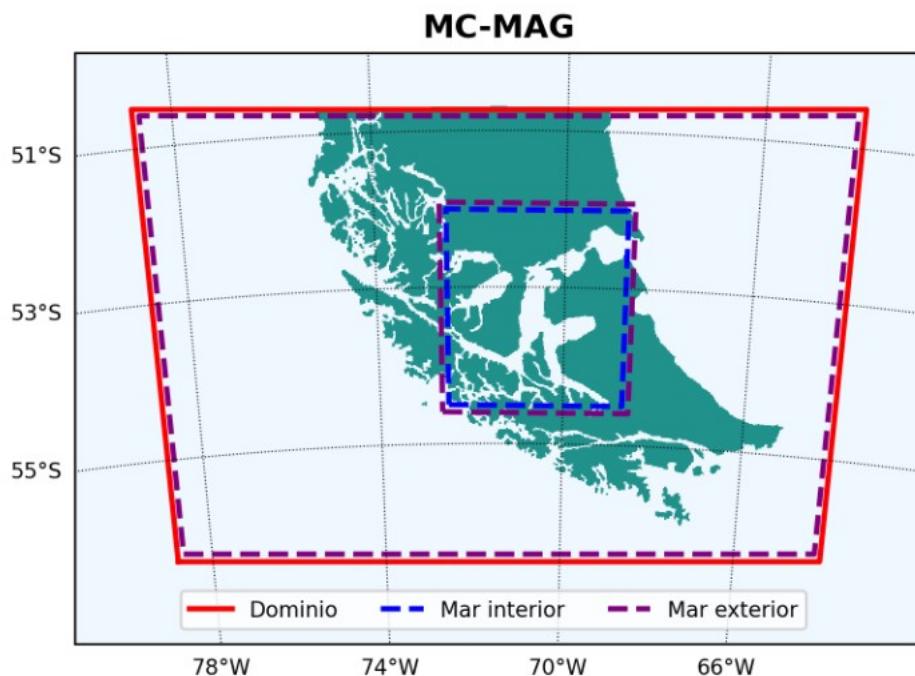


Figura 6: Dominio MC-Mag, sección mar interior y mar exterior considerados para la validación temporal de la TSM.

Evaluación de la corriente del modelo MC-Mag

La evaluación de corriente en el modelo MC-MAG se realizó en base a mediciones de correntometría en la columna de agua en el Canal Sarmiento, la corriente fue medida con un ADCP anclado a media agua (100 m), midiendo hacia arriba con una frecuencia de medición de 1 hora, se utilizó un ADCP RDI 300kHz, la información detallada del anclaje se encuentra en la **Tabla 4**.

Se realizó un análisis preliminar entre los cuatro transductores del ADCP, sólo se trabajó con los datos que obtuvieron 90% de correlación y se eliminó el nivel más cercano a la superficie para reducir el efecto de variación de nivel del mar. Posteriormente se realizó la corrección magnética correspondiente a cada punto, de esta manera los datos fueron orientados al norte geográfico.

Se calculó el flujo residual de la corriente aplicando un filtro de pasa-baja coseno de Lanczos de 121 pesos y periodo de corte de 40 horas. La capacidad



del modelo hidrodinámico de reproducir los principales procesos que modulan la estructura temporal y espacial de las corrientes en la boca del fiordo Reloncaví y canal Moraleda fue evaluada mediante un análisis de Función Ortogonal Empírica (EOF) (Thomson y Emery, 2014), contrastando las corrientes submareales modeladas y las provistas por un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante un periodo 4 meses (**Tabla 4**).

Tabla 4: Posición del ADCP utilizado en la evaluación de MC-Mag.

Ubicación	Latitud (S)	Longitud (W)	Fecha inicial	Fecha final	z
Sarmiento (RDI 300)	-51.7023	-73.9463	15/01/2016	29/04/2016	5.23m - 95.2 m

Boyas oceanográficas

Finalmente, se realizó una validación con datos *in situ* provenientes de boyas oceanográficas instaladas en la Agrupación de Concesiones de Salmónidos (ACS) en la Patagonia. Esta información, administrada por el Centro de Datos Ambientales de la Acuicultura de IFOP (Programa de Centro de Datos Oceanográficos y Ambientales en la Zona Sur-Austral de Chile), está disponible para su descarga en el portal CHONOS: <https://chonos.ifop.cl/acs/start/>. Se compararon los promedios diarios de TSM y salinidad pronosticados por MC-Mag con mediciones de las estaciones ACS 43A (73,61399° O; 51,9174° S, a 10 y 60m), ACS 46 (72,7758° O; 51,9467° S, a 5 y 60m) y ACS 48 (73,03° O; 52,153° S, a 5 y 50m). El periodo de comparación fue de enero de 2024 a julio de 2025 para la estación ACS 43A, y de enero a julio de 2025 para las estaciones ACS 46 y ACS 48. Esta evaluación permitió determinar la capacidad del modelo para reproducir la estructura vertical de la columna de agua y su variabilidad temporal en puntos específicos de la zona de estudio.

4.2.2 Atmósfera (Modelo MW-Mag)

4.2.2.1 Implementación y evaluación del modelo MW-Mag

Esta actividad corresponde al desarrollo, implementación y evaluación de un nuevo sistema de pronóstico atmosférico regional para la zona de Magallanes, denominado MW-Mag. Este modelo fue diseñado principalmente para usarlo como forzante superficial del modelo hidrodinámico MC-Mag.

Escenarios

Con el fin de identificar la configuración óptima en términos de precisión y eficiencia computacional, se compararon dos escenarios con distinta resolución espacial:

- Escenario 1: Dominio único con resolución de 5 km, compuesto por 225 cuadriculas en sentido este-oeste y 130 en sentido norte-sur (**Figura 7**).

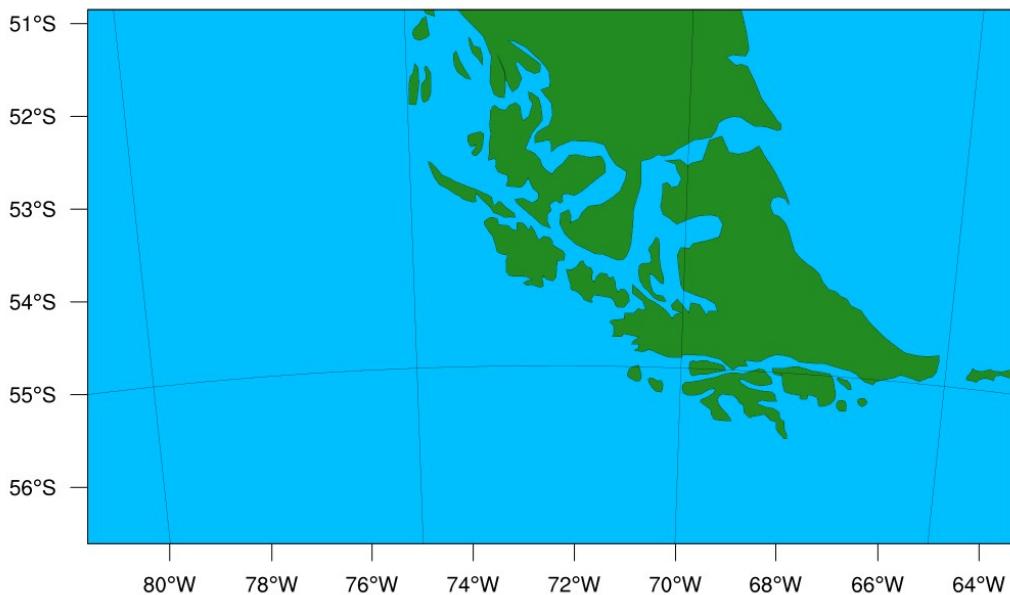


Figura 7: Escenario 1 a evaluar de MW-Mag con 5 km de resolución espacial.

- Escenario 2: Configuración con dos dominios, un dominio externo (padre) de 9 km de resolución (191×115 elementos) y un dominio interno (hijo) de 3 km (355×232 elementos) (**Figura 8**).

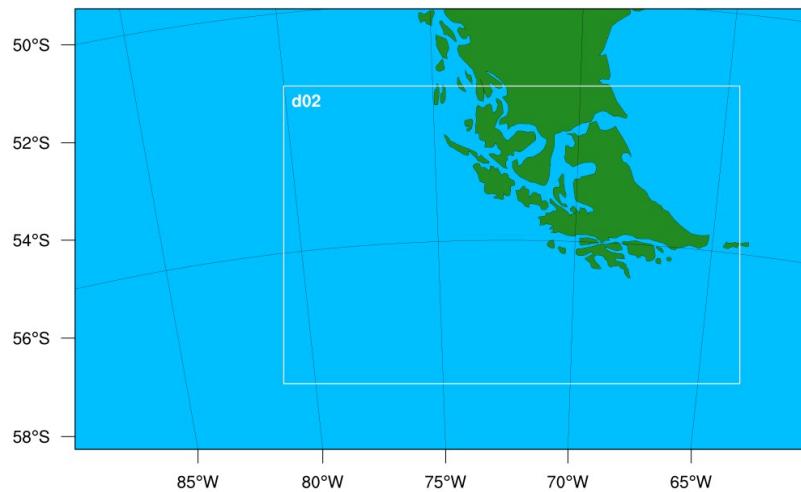


Figura 8: Escenario 2 a evaluar de MW-Mag con dos dominios de 9 y 3 km de resolución espacial.

Ambos escenarios fueron utilizados para ejecutar simulaciones retrospectivas del tipo hindcast correspondientes al mes de junio de 2024, seleccionado por su representatividad climática en la región, así como por coincidir con el período de operación de los sensores de observación disponibles. Las simulaciones usaron como forzantes los datos de análisis global FNL (NCEP, 2015), topografía de 30 segundos de la USGS, proyección Lambert, y una configuración vertical de 30 niveles sigma que siguen el terreno. La resolución temporal fue horaria. Estos escenarios fueron configurados con un conjunto específico de parametrizaciones físicas, seleccionadas para representar de manera adecuada los procesos subescalares relevantes en la región de Magallanes. Las opciones empleadas fueron las siguientes:

- Microfísica: esquema Thompson (opción 8), que incluye graupel y permite una representación detallada de los procesos de formación de nubes y precipitación.



- Radiación de onda larga: esquema RRTM (Rapid Radiative Transfer Model, opción 1), ampliamente utilizado por su capacidad para simular con precisión la transferencia de radiación de onda larga en la atmósfera.
- Radiación de onda corta: esquema Dudhia (opción 1), una opción eficiente y adecuada para simulaciones regionales de escala meso.
- Capa superficial: esquema QNSE (opción 4), diseñado para condiciones estables, como las que frecuentemente se presentan en latitudes altas, y que se complementa con el mismo esquema para la capa límite planetaria.
- Capa límite planetaria (PBL): esquema QNSE (opción 4), desarrollado para mejorar la simulación de turbulencia en condiciones estratificadas o estables, especialmente en regiones frías.
- Superficie terrestre: esquema térmico de cinco capas (5-layer thermal diffusion, SLAB, opción 1), que permite una representación simplificada pero eficaz del intercambio de calor entre el suelo y la atmósfera.
- Convección (parametrización de cúmulos): esquema Kain-Fritsch, versión mejorada para el modelo Eta (opción 1), utilizado en el dominio padre para representar el desarrollo convectivo subescalar, mientras que en el dominio hijo (resolución de 3 km) esta parametrización fue desactivada, permitiendo una representación explícita de la convección.

Fuente de datos para evaluación

Para evaluar el rendimiento preliminar de cada escenario, se compararon las simulaciones con datos observados (provenientes de la estación meteorológica Golfo Almirante Montt (GAM), perteneciente a REDMET y de las boyas oceanográficas ACS43A y ACS50B, instaladas en el marco del programa “Centro de Datos Oceanográficos y Ambientales en la Zona Sur-Austral de Chile” (**Figura 9**) . Se evaluaron dos variables, temperatura del aire a 2 metros y magnitud del viento a 10 metros. Las series modeladas y observadas se ajustaron a una misma resolución temporal (horaria).

Esta evaluación preliminar permitió determinar cuál de las dos

configuraciones ofrecía un mejor balance entre precisión de los resultados y requerimientos computacionales, sentando así las bases para la implementación definitiva del modelo operacional MW-Mag.

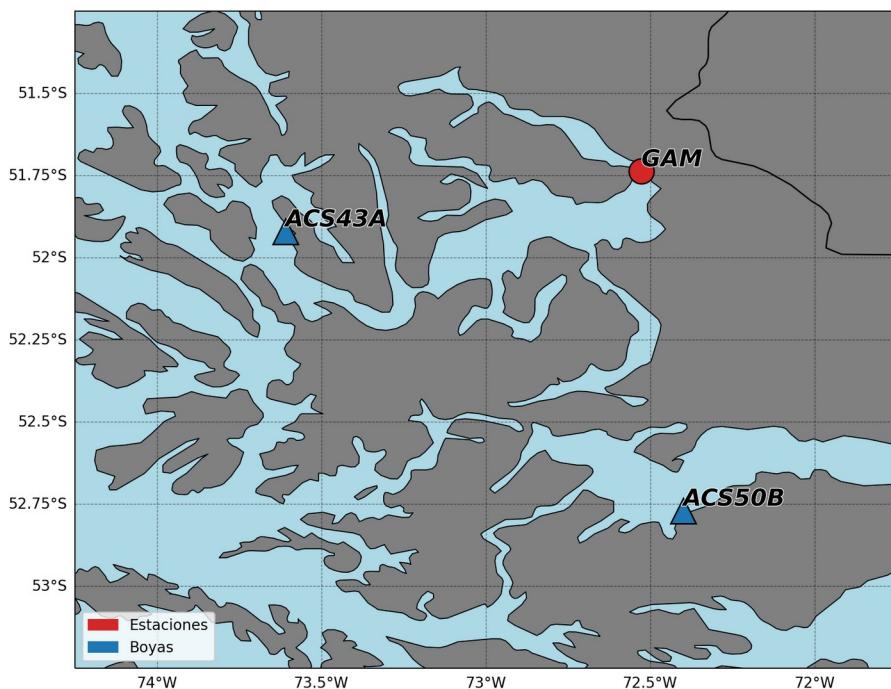


Figura 9: Ubicación de las boyas y estaciones meteorológicas utilizadas para evaluar los distintos escenarios de MW-Mag.

Evaluación del modelo en operación

Una vez seleccionada la configuración óptima, se puso en marcha el modelo MW-Mag de forma operacional. Para evaluar su desempeño en el período en que ha estado activo, se realizó una comparación temporal entre sus salidas y datos observados en la región. Las fuentes utilizadas en esta segunda etapa fueron las estaciones meteorológicas Golfo Almirante Montt (GAM) y Seno Skyring, ambas pertenecientes a REDMET y la boya oceanográfica **ACS43A**. (ver **Figura 10**).

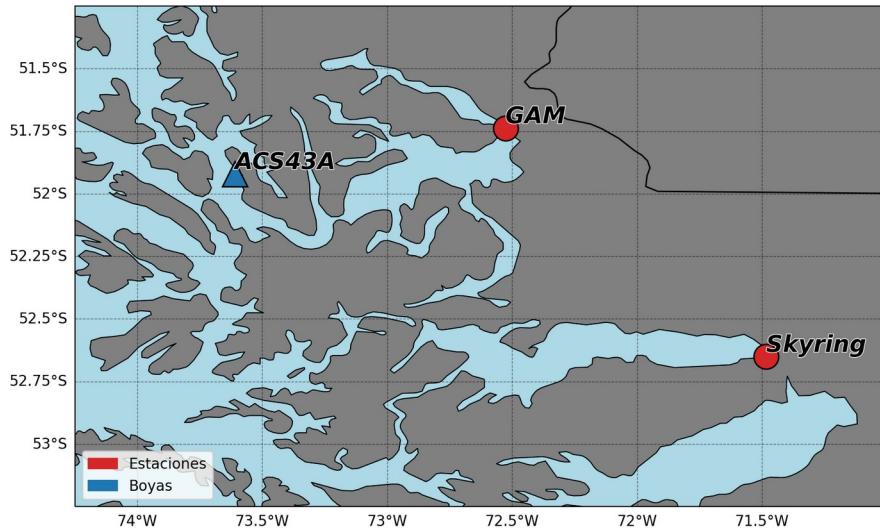


Figura 10: Ubicación de las boyas y estaciones meteorológicas utilizadas para evaluar MW-Mag operacional.

En la boyas ACS43A se evaluaron los promedios diarios de temperatura del aire y magnitud del viento. Mientras que en las estaciones GAM y Skyring se evaluó el promedio de temperatura diaria, mientras el viento fue representado mediante rosas de viento basadas en datos horarios de dirección y magnitud.

La comparación entre datos modelados y observados se realizó utilizando los mismos indicadores empleados en la etapa anterior: sesgo, RMSE, correlación de Pearson y error de amplitud. Las rosas de viento proporcionaron un análisis visual complementario, permitiendo identificar posibles diferencias en los patrones de dirección y velocidad del viento entre las observaciones y el modelo.

La evaluación del modelo MW-Mag, tanto en su fase de implementación como durante su operación continua, permitió validar su capacidad de representar adecuadamente las condiciones meteorológicas en la región de Magallanes. Esto es fundamental para su rol como forzante principal del modelo hidrodinámico MC-Mag.

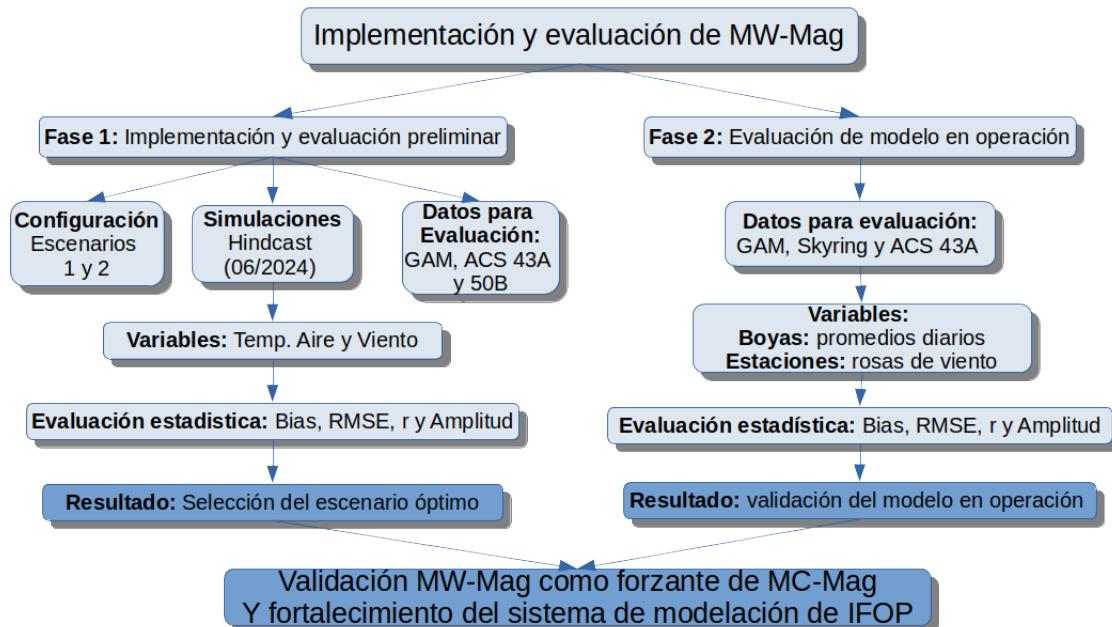


Figura 11: Esquema resumen con metodología usada para la implementación y evaluación de MW-Mag.



4.3 Metodología objetivo específico 3:

“Evaluar el modelo biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo durante los años 2018-2020”.

En esta etapa del proyecto, el objetivo fue por una parte continuar con la evaluación del atlas bioquímico para los años 2018 al 2020, y evaluar una nueva configuración para el año 2018 en la región de Chiloé y Aysén.

Para realizar las simulaciones de los años 2018 así como los de los años 2019 y 2020, hemos empleado el modelo Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (sigla en inglés PISCES) (Aumont et al., 2015; Aumont & Bopp, 2006), el cual se caracteriza por su complejidad intermedia. PISCES ha sido utilizado en estudios globales, regionales y en zonas de surgencias para entender los ciclos biogeoquímicos marinos, como el ciclo del oxígeno (e.g. Buchanan & Tagliabue (2021)), entre otros.

Este modelo simula la productividad marina y los ciclos biogeoquímicos del carbono y los principales nutrientes. Tiene tres compartimentos no vivos (materia orgánica disuelta semilábil, pequeñas partículas y grandes que sedimentan), cuatro compartimentos vivos representados por dos clases de tamaño de fitoplancton (nanofitoplancton y microfitoplancton), dos clases de zooplancton (microzooplancton y mezooplancton). Además, el modelo simula las concentraciones de oxígeno disuelto (O_2) manejado por la advección, intercambio océano-atmósfera, producción por fotosíntesis y consumo por respiración del plancton y la remineralización de la materia orgánica. Además de los nutrientes como nitrógeno (NO_3), amonio (NH_4), fosfato (PO_4), silicato (Si), hierro (Fe), carbono orgánico disuelto (DOC) y carbono inorgánico disuelto (DIC). Asimismo, los nutrientes ingresan al océano desde tres fuentes externas: deposición atmosférica, ríos y sedimentos. Sin embargo, debido a su capacidad para simular 24 variables, este modelo implica un alto costo computacional, aproximadamente cuatro veces más que un modelo capaz de simular seis variables biogeoquímicas, como un modelo simple de nutriente-fitoplancton-zooplancton-detritus (NPDZ, por sus siglas en inglés).

La configuración del modelo biogeoquímico 2018-2020 con 42 niveles verticales se detallan en la **Tabla 5** y la hemos denominado SIM01.

Tabla 5: Descripción de la configuración 2018-2020 (SIM01).

Simulación	Condición inicial	Condición de borde	Forzante	Característica
SIM01	<ul style="list-style-type: none"> - Hidrodinamica GLORYS12V1 - Biogeoquimica. GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_01_029	Hidrodinamica GLORYS12V1 Biogeoquimica. GLOBAL_MULTIYEAR_BG C_001_029	Atmosférica ERA5	- Numero de Ríos 98 fuentes diarias de FLOW Descarga en las primeras 20 capas. - Esquema de mezcla LMD (Large- McWilliams- Doney)

Para evaluar si las simulaciones del período 2018–2020 lograban reproducir las masas de agua asociadas a determinadas características de oxígeno disuelto, se elaboró un diagrama T–S utilizando datos de distintas estaciones de CTD realizadas por IFOP en el sector de la Boca del Guafo durante esos años (**Figura 12**). Para ello, se seleccionaron los puntos de simulación más cercanos a cada estación, extrayendo los valores de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto correspondientes al mismo día y año de cada medición. Además, se aplicó el criterio de salinidad propuesto por Sievers and Silva (2008), el cual se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6: Criterio de salinidad para definir las masas de aguas.

Masa de agua	Rango de salinidad
Agua estuarina (AE)	< 31
Agua subantártica Modificada (ASAAM)	31-33
Agua subantártica (ASAA)	33-33,8
Agua ecuatorial Subsuperficial (AESS)	>33,8

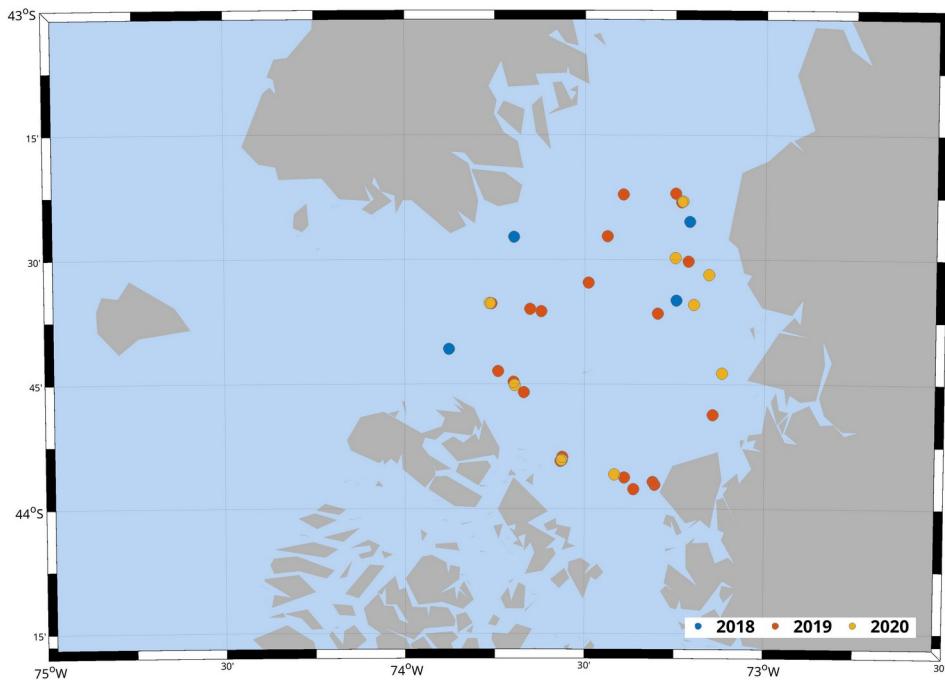


Figura 12: Ubicación de las estaciones utilizadas para evaluar las distintas masas de aguas.

Además, se evaluó la clorofila superficial a partir de imágenes satelitales MODIS-AQUA diarias (resolución de 4 km) correspondientes a distintos años. Para el procesamiento, se eliminaron los valores superiores a 20 mg/m^3 y se calculó el promedio estacional de verano (considerando los meses de enero, febrero y marzo) utilizando únicamente los píxeles con más de 23 días de datos, equivalentes a una cobertura superior al 25 %, esto para asegurar que los promedios sean representativos. Esta temporada fue seleccionada por presentar el mayor número de datos disponibles (ver **Anexo C**, donde se detalla la cantidad de datos registrados por MODIS para cada temporada en los distintos años). Uno de los resultados clave del informe de la etapa anterior fue la identificación de una insuficiencia de agua dulce en el sistema. Para abordar esta brecha, durante esta etapa se llevó a cabo un experimento de sensibilidad enfocado en evaluar el esquema de mezcla (ver **Anexo C** donde se evaluó el experimento del esquema mezcla). Además, se observó una falta de variación significativa entre la capa de



mezcla y las capas más profundas. Se planteó que esta situación podría deberse a que las condiciones iniciales estaban demasiado oxigenadas y a la ausencia de un período de estabilización adecuado, lo cual impidió que las condiciones de borde se propagaran completamente a lo largo del dominio, limitando así la mejora de los resultados. Por esta razón, en esta etapa se probó una nueva configuración con una condición inicial diferente (ver **Anexo C** donde se evaluó la condición inicial) y se realizó una nueva simulación para el año 2018, considerando un período de estabilización de un año y medio. Para evaluar su desempeño, se comparó esta nueva simulación, denominada 'SIM02' con la simulación previa 'SIM01', cuyas características se detallan en la **Tabla 7**.

Tabla 7: Descripción de la configuración utilizada en SIM02.

Simulación	Condición inicial	Condición de borde	Forzante	Característica
SIM02	- Hidrodinamica GLORYS12V1 - Biogeoquímica. CARS	Hidrodinamica GLORYS12V1 - Biogeoquímica. GLOBAL_MULTIYEAR_BG C_001_029	- Atmosférica ERA5	- Número de Ríos, 98 fuentes diarias de FLOW Descarga en las primeras 20 capas. - Esquema de mezcla, GLS (General Length Scale)

Posteriormente, a partir de los resultados de las simulaciones, se calculó la profundidad de la base de la capa de mezcla mediante la ubicación del valor máximo de la frecuencia de boyantes (Brunt-Väisälä) en estaciones de muestreo realizadas en Reloncaví; estos resultados se compararon con datos de salinidad obtenidos durante una campaña oceanográfica del IFOP realizada en el mismo año. Además, se elaboró un diagrama T-S para evaluar la representación de las masas de agua observadas en el crucero Taitao llevado a cabo por COPAS (ver **Figura 13**).

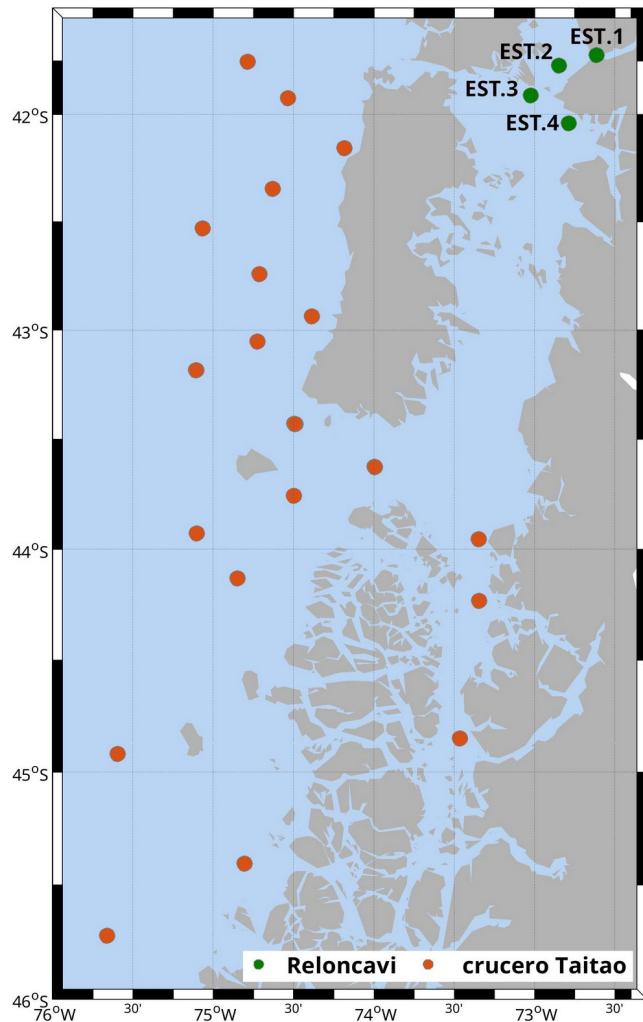


Figura 13: Ubicación de las estaciones de Reloncaví (verde) y del crucero Taitao (naranja) empleadas para la evaluación de la capa de mezcla y la caracterización de las masas de agua, respectivamente.



4.4 Metodología objetivo específico 4:

“Implementar Parti-MOSAv2.0 en el portal web CHONOS”.

Con el objetivo de disponer de una herramienta de gestión para escenarios de dispersión de partículas en el mar, se implementó el modelo PartiMOSA, alojado en el sistema de observación oceanográfico CHONOS (<https://chonos.ifop.cl/partimosa>). PartiMOSA se basa en la librería de código abierto OpenDrift (Dagestad et al. 2018), desarrollada en Python, la cual permite modelar trayectorias lagrangianas de partículas en el océano y adaptarse a diferentes tipos de objetos o especies biológicas. El modelo recibe como forzamiento los campos de corrientes y nivel del mar del sistema MOSA, y posteriormente ejecuta simulaciones de dispersión de partículas bajo distintos escenarios.

En una primera versión, PartiMOSA operaba como un modelo simple de dispersión de partículas inertes. En la nueva etapa, se realizaron mejoras tanto en el núcleo del modelo como en la plataforma web de acceso:

- Migración tecnológica: la interfaz web fue reescrita en Django (Python), reemplazando la implementación previa en PHP, lo que permite un sistema más estable, escalable y fácil de mantener.
- Ampliación de funcionalidades de usuario: se implementaron nuevas opciones en la interfaz, tales como asignar un nombre a las simulaciones, visualizar coordenadas exactas con el cursor sobre el mapa, definir rangos de profundidad de liberación, ajustar la duración de las corridas (72 o 720 h según el modelo), seleccionar el radio de dispersión inicial y escoger el tipo de partícula a utilizar (inertes, Caligus, plásticos, petróleo, entre otros). Asimismo, se integró un sistema de registro que permite consultar simulaciones en curso e históricas asociadas a cada usuario.
- Extensión del catálogo de partículas: además de partículas inertes, se adaptaron módulos específicos de OpenDrift para simular organismos y materiales relevantes para la gestión pesquera y ambiental:
 - *Caligus rogercresseyi*: con mortalidad dependiente de temperatura (< 4.2 °C) y salinidad (< 20 PSU), y comportamiento de deriva



superficial, en línea con antecedentes biológicos del parásito.

- Loco (Concholepas concholepas): se incorporaron fases de deriva libre, bentónica y migración vertical, así como crecimiento dependiente de temperatura expresado en *grados-día*. Aun en desarrollo.
- Plásticos: a través del modelo PlastDrift de OpenDrift, que permite simular partículas flotantes con parámetros de persistencia. Aun no disponible.
- Petróleo (Diesel marino): utilizando el modelo OpenOil, configurado para escenarios de derrames superficiales ($z = 0$), con posibilidad de adaptarse a fugas a distintas profundidades. Aun no disponible.

A su vez, para mejorar la respuestas al ambiente se añadieron propiedades activas a las partículas para interactuar con condiciones ambientales, tales como mortalidad dependiente de temperatura y salinidad, preferencia por condiciones de luminosidad mínimas para alimentación, velocidad de nado prescripta (0.5 mm/s, configurable en función de crecimiento), y crecimiento en función de la temperatura del agua (degree-days). Dado que los archivos NetCDF de CROCO no cumplen completamente con el estándar CF, se incorporó un procedimiento de post-procesamiento que incluye el renombrado de variables (scrum_time → ocean_time), la actualización de atributos de tiempo, y la adición de variables verticales (Vstretching, s_rho, s_w, Cs_r, Cs_w, h, Vtransform, theta_s, theta_b, hc), de modo que las salidas sean directamente utilizables en OpenDrift (actualmente versión 1.4.2).

Como mejoras adicionales se actualizó la librería de cálculo solar de pysolar a pvlib, se integraron nuevas librerías auxiliares (pvlib, pytz, pandas), y se añadieron variables extra en las salidas de simulación (temperatura, luz superficial y a profundidad, posición vertical de larvas, etc.). También se incluyeron rutinas para generación de gráficos y animaciones de trayectorias.

La implementación de PartiMOSA contempló tanto el desarrollo de nuevas funcionalidades para el usuario como la incorporación de módulos biológicos y ambientales dentro de OpenDrift, además de la adaptación de la arquitectura web.

4.5 Metodología objetivo específico 5:

“Diseñar modelos anidados de alta resolución espacial entre la región de Los Lagos y Magallanes y la Antártica Chilena”.

Con el objeto de mejorar la calidad de los pronósticos oceanográficos de los modelos operacionales de Patagonia norte (MC-Patanor), y región de Magallanes (MC-Mag), en este objetivo se busca la implementación de modelos anidados de alta resolución en 3 zonas diferentes, Fiordo Comau, Fiordo Quitraco y Golfo Almirante Montt. Estos anidados se realizan de la forma ONE-WAY, es decir, usa los bordes del los modelos regionales, pero el regional no recibe información desde ellos, se construyen usando un coeficiente de refinado de 3, lo que implica que tendrán un tercio de la resolución de los dominios padre. Estos modelos serán denominados MC-Comau para los fiordos Comau y Reñihue, MC-Quitra, para modelo anidado en zona de Fiordo Quitraco y MC-Gam, para modelo anidado en Golfo Almirante Montt. Este objetivo no considera incorporar este nuevo producto en el sitio web de MOSA ni la puesta en marcha de manera operacional, solo obtener grillas estables y evaluar su factibilidad, su puesta en marcha depende de la capacidad de computo disponible, lo cual se espera que suceda durante la etapa actual del programa, y así pasar a integrar el sistema de modelos de pronósticos actuales ilustrado en la **Figura 14**. Los dominios de los modelos anidados y sus modelos padre Patagonia Norte y Magallanes se presentan en las **figuras 15 y 16** respectivamente.

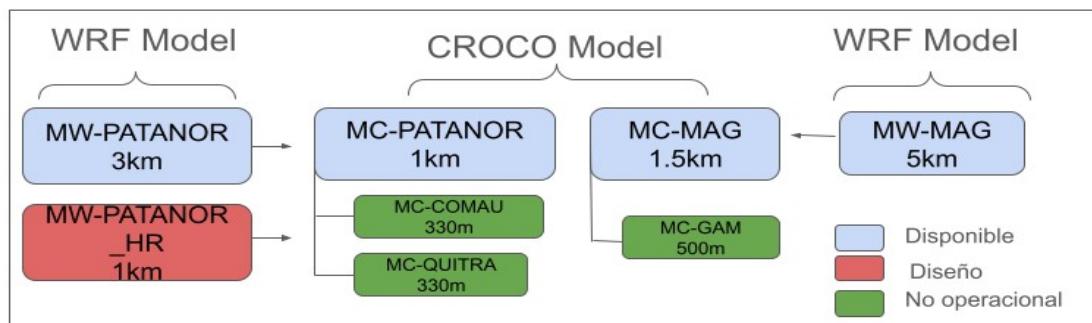


Figura 14: Modelos operacionales oceanográficos y atmosféricos actuales y en desarrollo.

Los modelos anidados están basados en la versión 2.1.0 de CROCO, actualmente disponible en <https://gitlab.inria.fr/croco-ocean/croco/-/releases/v2.1.0>.

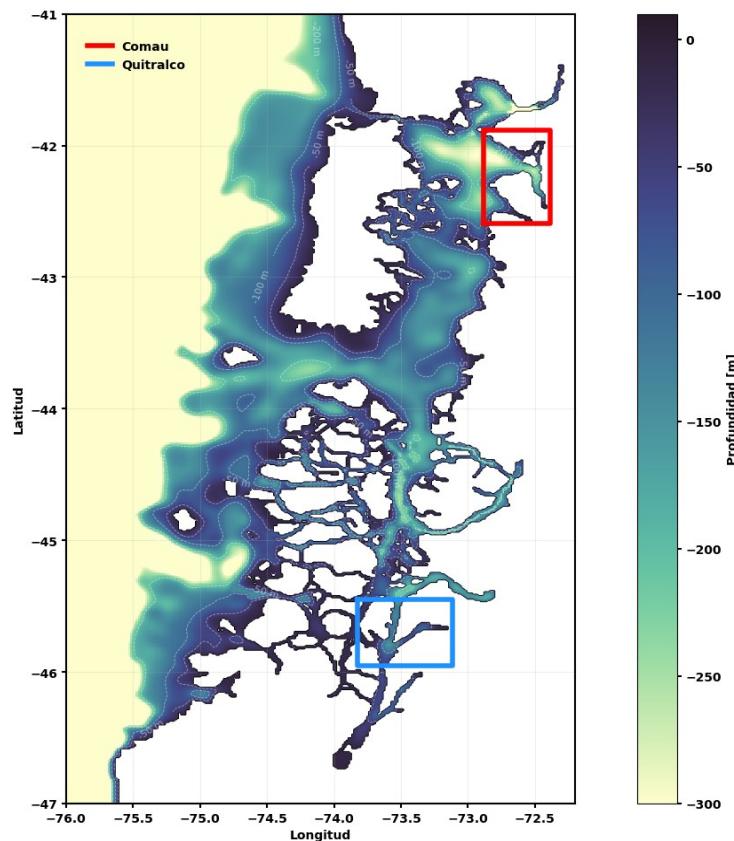


Figura 15: Modelos anidados dentro del modelo MC-Patanor, uno en Fjordo Comau y otro en Fjordo Quitrailco.

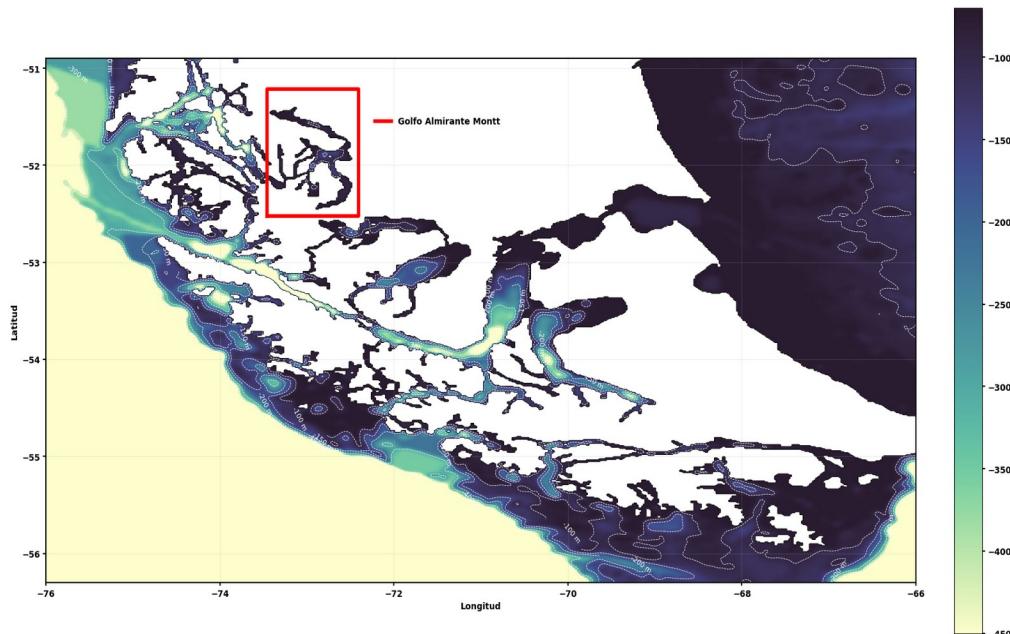


Figura 16: Modelo anidado en MC-Mag, ubicado en el Golfo Almirante Montt

4.5.1 Construcción de Modelos

Las grillas constituye la batimetría, la máscara y los parámetros espaciales del modelo. Primero se construyeron las máscaras, donde se determina que pixel es agua y cual es tierra. Para ello se usó una linea de costa obtenida desde osmdata.openstreetmap.de. La máscara pasa por un proceso de filtrado que permite aislar pixeles conflictivos y que puedan causar inestabilidades. Luego se incorpora la batimetría, la cual es obtenida desde cartas náuticas publicadas por el Servicio de Hidrografía y Oceanografía de la Armada (SHOA). Estos datos son editados manualmente a fin de controlar cambios abruptos, y datos fuera de la normal. Esta batimetría pasa por un proceso de filtrado con el fin de tener una batimetría suavizada y estable. Este proceso puede tomar un tiempo mayor, ya que cada filtrado puede provocar perfiles no realistas. Se busca encontrar un equilibrio entre perfiles realistas pero suaves, a modo de garantizar la estabilidad del modelo. Los parámetros de grilla se muestran en la **Tabla 8**.

*Tabla 8: Parámetros espaciales de las grillas actuales y en desarrollo*

Modelo	Resolución	N-band	Hmin	Hmax	grid
MC-PATANOR	1km	20	10	4000	505 x 603
MC-COMAU	330m	15	10	480	110 x 209
MC-QUITRA	330m	15	10	250	155 x 119
MC-MAG	1.5km	2	70	5000	815 x 520
MC-GAM	500m	5	10	300	176 x 350

Luego se compilaron los modelos de acuerdo a las físicas deseadas. En nuestro caso se destaca el uso de esquemas de mezcla vertical Generic Length Scale, GLS (Warner et al 2005), así como Trazado de mezcla horizontal Laplaciana, uso de coordenadas verticales sigma. Un resumen de la configuración física de los modelos anidados se presenta en la **Tabla 9**.

Tabla 9: Principales configuraciones físicas usada en los anidados.

Componente	Setup
Resolución	~300 m en Patanor y 500m en Magallanes
Vertical	42 σ-niveles (NEW_S_COORD; θs=7, θb=2, Hc=200 m)
Tiempos	dt=10 s; NDTFAST=75 → dt_fast≈0.13 s
Ventana del test	2025-01-01 → 2025-03-01
Mareas	TIDES + SSH_TIDES, UV_TIDES, POT_TIDES (con TIDERAMP)
Mezcla turbulenta	GLS k-ε (GLS_MIXING, GLS_KEPSILON, CANUTO_A)
Advección/Dispersión	UV_HADV_UP3; TS_HADV_RSUP3 + C4; VADV_SPLINES; TS_DIF4
Drag de fondo	RDRG=3.0e-4 m/s; RDRG2=5.0e-3; Zob=0.03 m
Sponge lateral	X_SPONGE=3000 m; V_SPONGE=200 m ² /s
Forzamiento atm.	BULK_FLUX + GUSTINESS + LW (con ANA_BS/BTFLUX)

4.5.2 Evaluación y pruebas

Las pruebas de testeо se realizaron en un servidor de pruebas localizado en Santiago.

Una vez construidas las mallas, se realizaron corridas de pruebas para evaluar la estabilidad, así como el nivel de mar. Se realizaron pruebas de 3 meses donde se evaluó con datos de mareógrafos para evaluar la estabilidad de la batimetría y la resolución del nivel del mar. Estas corridas fueron realizadas para el periodo enero-marzo de 2025, y se utilizaron forzante climatológicos, en específico para las condición inicial de borde se utilizó World Ocean Atlas 2009 (WOA2009), mientras que para el forzante atmosférico de superficie se utiliza ERA5. Las mareas se ingresan a partir de los 10 constituyentes armónicos principales obtenido del modelo TPXO7.

Las condiciones iniciales de temperatura y salinidad utilizadas en las corridas de prueba para MC-Comau, MC-Quitra y MC-Mag son presentadas en las **Figuras 17, 18 y 19** respectivamente a través de un transecto a lo largo del dominio.

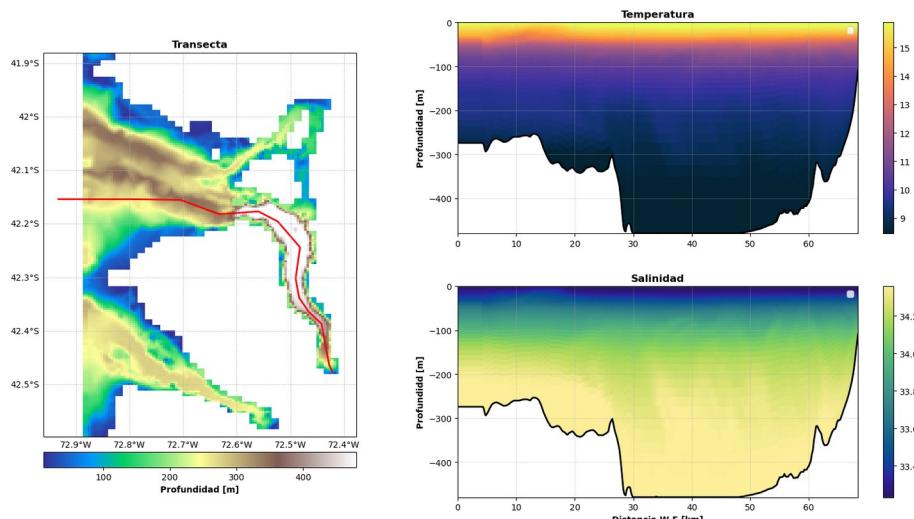


Figura 17: Transecto de temperatura y salinidad utilizada como condición inicial en corridas de prueba para MC-Comau.

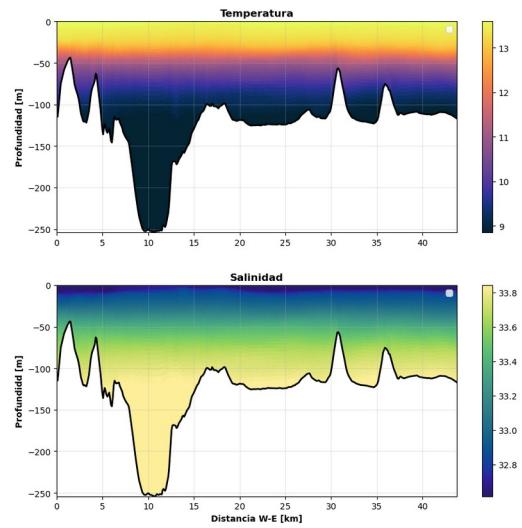
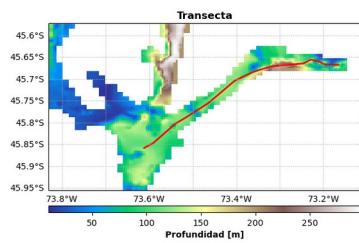


Figura 18: Transecto de temperatura y salinidad utilizada como condición inicial en corridas de prueba para MC-Quitra.

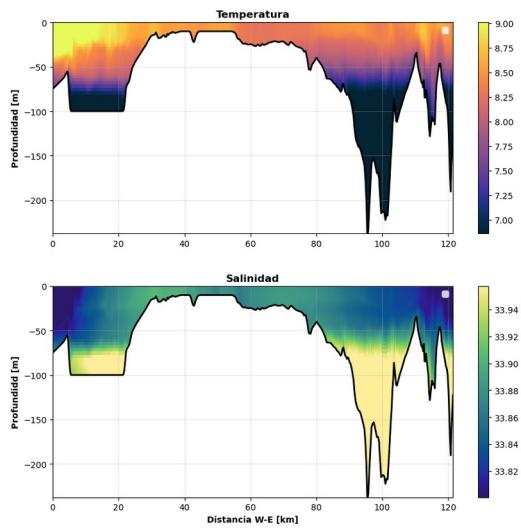
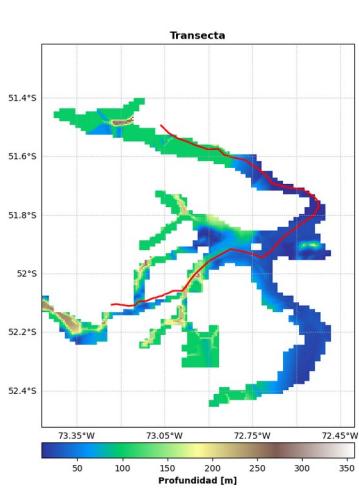


Figura 19: Transecto de temperatura y salinidad utilizada como condición inicial en corridas de prueba para MC-Gam.



5. Resultados

5.1 Resultados objetivo específico 1:

“Actualizar la evaluación del sistema operacional MOSA con las últimas observaciones oceanográficas y meteorológicas disponibles en el mar interior de Chiloé y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo”.

En este objetivo se presentan las evaluaciones de los modelos *MC-Patanor* y *MW-Patanor*, además de pruebas en desarrollo. Para ordenar los resultados, la sección será separada para modelos oceánicos y atmosféricos.

5.1.1 Océano

El modelo operación para Patagonia norte (en adelante MC-Patanor) se evaluó con temperatura superficial del mar de datos satelitales (AVHRR), corrientes medidas en campañas oceanográficas realizadas por el grupo de Oceanografía Putemún, y datos de Boyas de monitoreo del proyecto Centro de datos para la Acuicultura (<https://chonos.ifop.cl/acs/start/>). Anteriormente se ha evaluado la distribución de temperatura y salinidad en diversas zonas del dominio, donde en general se ha presentado una distribución espacial-temporal que responde a los patrones estacionales esperados, es decir, el desarrollo de estructuras de estratificación en verano primavera y un aumento de profundidad de la capa de mezcla en otoño-invierno, acompañado de un aumento de salinidad superficial. Revisar informes anteriores (<https://www.ifop.cl/busqueda-de-informes/>).

En la **Figura 20** se muestran las posiciones de los equipos ADCP y de las Boyas oceanográficas utilizados en esta evaluación.

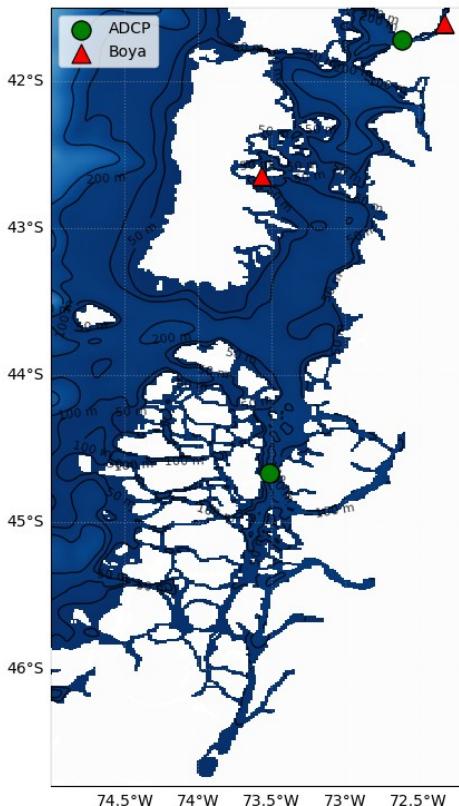


Figura 20: Localización de ADCP y Boyas Oceanográficas utilizadas en la validación de MC-Patanor.

5.1.1.1 Rendimiento

El modelo operacional ha estado en funcionamiento desde 2017 hasta la fecha, destacándose por su alta estabilidad, lo que se refleja en el elevado porcentaje de días pronosticados. Durante el último periodo se observó un porcentaje de 91% de días pronosticados en 2024. Sin embargo, al considerar los datos hasta junio de 2025, el porcentaje disminuye a un 88% (**Figura 21**) Esta caída en el rendimiento se asocia a cambios en la configuración del forzante

global utilizado y ajustes en los recursos computacionales que provocaron interrupciones temporales.

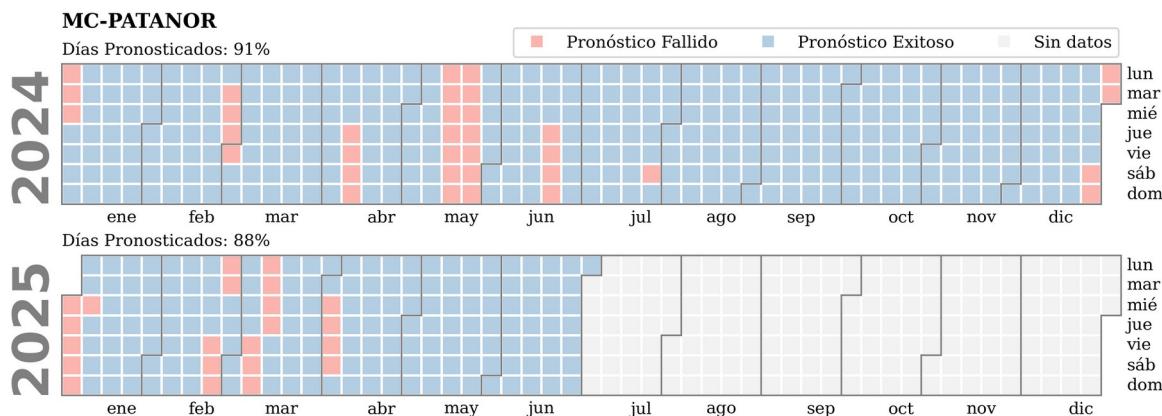


Figura 21: Rendimiento del sistema de pronóstico MC-PATANOR durante el periodo operacional 2024–2025. El porcentaje corresponde a los días con pronóstico exitoso respecto al total de días pronosticados (91% en 2024 y 88% en 2025). En azul se indican los días con pronóstico exitoso, en rojo los días con pronóstico fallido y en gris claro los días sin ejecución del pronóstico.

5.1.1.2 Temperatura superficial del Mar (TSM)

Se construyeron series de tiempo TSM entre enero 2018 y julio de 2025 de todo el dominio del modelo, la zona costera y la zona oceánica. Luego estas series fueron comparadas con valores diarios de TSM de AVHRR para las mismas zonas (ver **Figura 22**).

Las series diarias muestran en general que el modelo a partir de 2018 presenta un alto grado de ajuste con lo observado, alcanzando un $R = 0.97$, lo que da cuenta de una alta sincronización con los procesos más importantes de TSM. Mientras que el error es $< 0.5^{\circ}\text{C}$, el sesgo promedio es de 0.02°C , indicando una calidad satisfactoria en la representación de la TSM.

Al dividir el dominio entre mar interior y mar exterior, notamos una leve caída en los parámetros de calidad dentro del mar interior, con una correlación $R=0.93$, un leve aumento de el error a 0.6°C y el sesgos a 0.06°C . Esto principalmente debido a 2 factores, primero con la calidad de los datos satelitales

en los mares interiores (hay menos pixeles disponibles, lo que disminuye los ajustes). Segundo, un sesgo propio del modelo en zonas interiores debido a procesos locales de advección y flujos de calor no representados, aunque los errores y sesgo siguen siendo despreciables, posicionando al modelo con un alto ajuste de TSM.

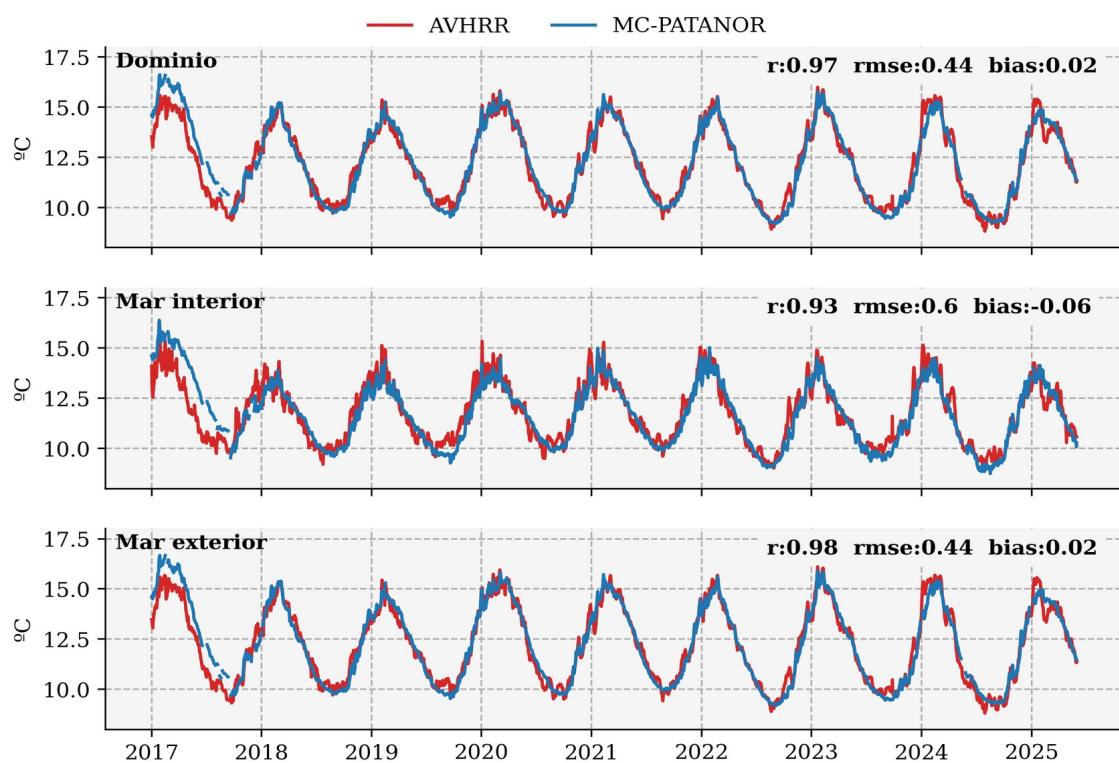


Figura 22: Comparación del promedio diario de la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-PATANOR y el producto satelital AVHRR entre enero de 2017 y mayo de 2025. Se incluye coeficiente de correlación (r), raíz del error cuadrático medio (rmse) y el sesgo (bias), calculados para tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (ver figura en metodología).

De igual modo con los datos de AVHRR se evaluó la distribución espacial del error cuadrático medio, la correlación y sesgo, la que se presenta en la **Figura 23**. En este caso observamos que la correlación disminuye levemente en el mar

interior de Chiloé, aunque no baja de 0.90. Mientras que el error cuadrático medio (RMSE) alcanza su máximo cerca del Golfo de Ancud con un valor de 1.5° C. Por su parte el sesgo se presenta positivo en la zona del mar interior de Chiloé, lo que indica una sobreestimación del modelo entre 0.5°C y 1°C. Estos desajustes pueden deberse principalmente a la poca cantidad de datos satelitales en las zonas interiores, como también a desajustes en el modelo con respecto a procesos locales de advección, y radiación solar en menor medida.

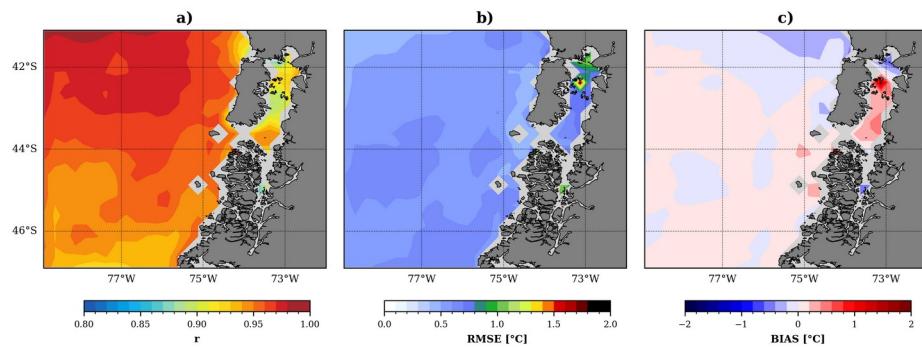


Figura 23: (a) Coeficiente de correlación (r), (b) Raíz del error cuadrático medio (rmse), (c) sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MC-PATANOR y AVHRR durante enero 2017 y marzo 2025.

Usando los promedios diarios de AVHRR y de *MC-Patanor* para el periodo 2018- 2025, se calcularon los 3 primeros modos ortogonales empíricos (EOF) para cada serie, siendo el modo 1 el que presenta una dominancia con 96.4% y 93.3% de varianza explicada en datos AVHRR y *MC-Patanor* respectivamente. Esto denota la dominancia de la señal estacional en la señal de TSM en el dominio, a su vez mostrando un alta correlación en la distribución oscilatoria de la varianza en el modelo y lo datos observados (Ver **Figura 24**). Por su parte el modo 2 capta ~ 1% de la varianza (no mostrado en este informe), también logro un alto ajuste (>0.9), lo cual indica que incluso procesos locales y de pequeña escala también están bien representados.

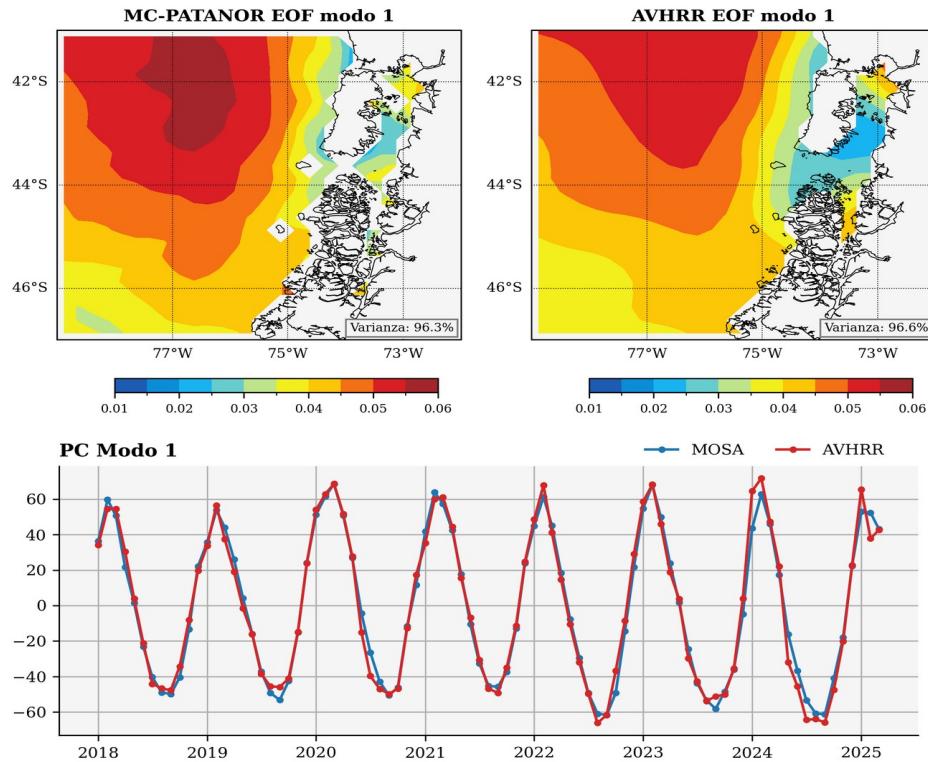


Figura 24: Primer modo del análisis de componentes principales (PCA) aplicado a la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-Patanor y observada por el producto satelital AVHRR entre 2018-2025. Los paneles superiores muestran la distribución espacial de los pesos (EOF), mientras que el panel inferior presenta la evolución temporal de las componentes principales (PCA).

5.1.1.3 Corrientes

La evaluación de la corriente residual del modelo se realizó en 2 puntos, uno por cada región; en el fiordo Reloncaví (región de Los Lagos) y en canal Moraleda (región de Aysén).

La dispersión de la corriente logra ser simulada por el modelo en los 2 puntos (**Figura 25**) fluctuando de oeste-este en la boca de Reloncaví y norte-sur en el canal Moraleda, presentándose consistente en el tiempo aunque el modelo tiende a presentar una mayor dispersión que el modelo.

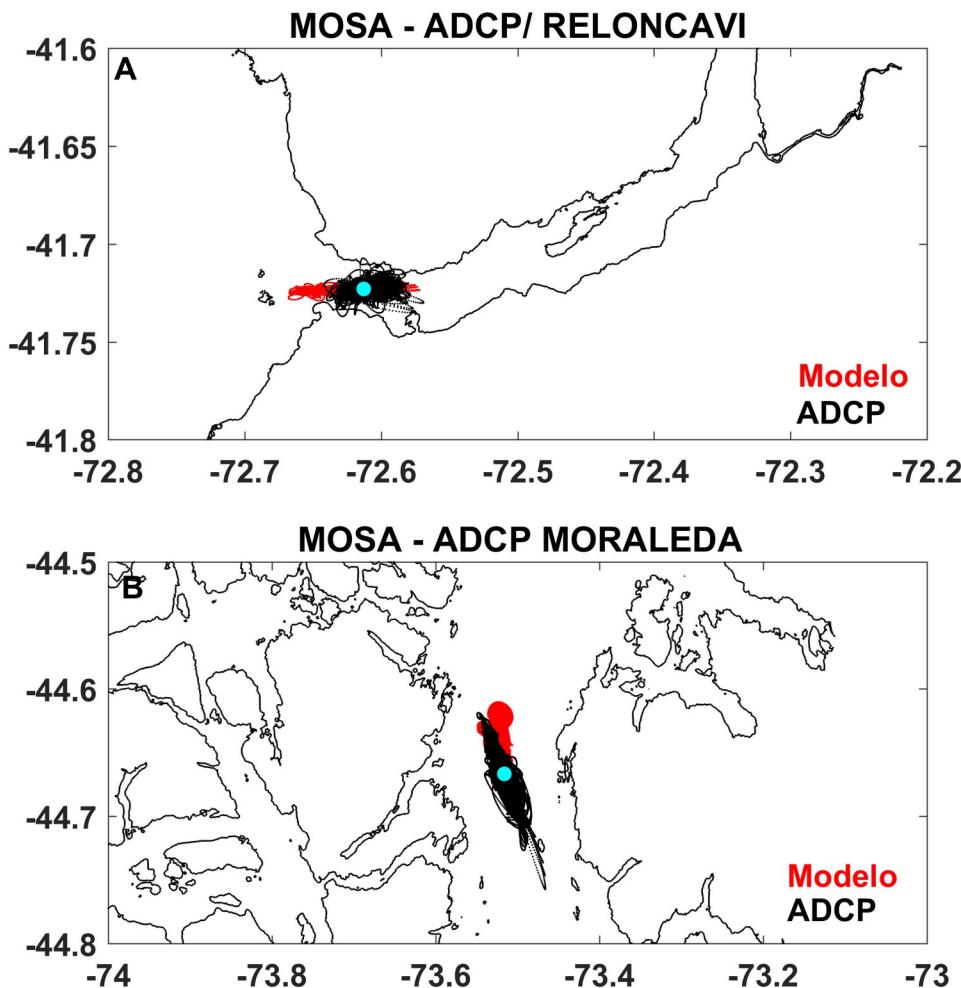


Figura 25: Dispersión de la corriente residual, modelo MC-Patanor (rojo) y ADCP (negro). A) boca del fiordo Reloncaví, b) canal Moraleda.



Por su parte, el análisis de EOF de la corriente residual que se observa en la **Figura 26**, muestra como el modelo logra replicar la variabilidad de la corriente de la boca en Reloncaví, los 3 principales modos verticales de la corriente concentran sobre el 90% de la variabilidad total de la corriente residual en el modelo y en el ADCP. El modo 1 mostró una estructura barotrópica hacia el este, con una amplitud que disminuye con la profundidad, en el modelo explicó el 55% de la variabilidad total al igual que el modo 1 del ADCP que alcanzó un 55% de la variabilidad total. El modo 2 presentó una estructura baroclínica de corriente residual que explicó el 28% de la variabilidad total de la corriente en el modelo y un 34% de la variabilidad total de la corriente en el caso del ADCP. El modo 3 indica una estructura de 3 capas tanto en el modelo como ADCP, explicando un 9% y 5% de variabilidad total respectivamente. Estas estructuras de 3 capas son características de sistemas estuarinos donde el viento es un forzante relevante (Soto-Riquelme et al, 2023). La corriente modelada en Reloncaví es más intensa con mayor velocidad que lo observado.

La corriente en Moraleda por su parte fluctúa a lo largo del canal (norte-sur), lo cual es simulado por el modelo, por otro lado la estructura vertical de Moraleda logra ser replicada por el modelo. En el canal Moraleda domina la estructura vertical de 2 capas explicado por circulación estuarina. Los 2 principales modos verticales de la corriente concentran sobre el 90% de la variabilidad total de la corriente residual en el modelo y en el ADCP. El modo 1 mostró una estructura baroclínica, con una amplitud que disminuye con la profundidad, el modo 1 del modelo explicó el 77% de la variabilidad total, mientras el modo 1 del ADCP alcanzó un 76% de la variabilidad total. El modo 2 presentó una estructura baroclínica, donde el modo 2 de la corriente residual explicó el 18% de la variabilidad total de la corriente en el modelo y un 18% de la variabilidad total de la corriente en el caso del ADCP. Mientras que el modo 3 es una estructura de 3 capas que concentra el 2% y 3% de la variabilidad total en el modelo y ADCP. La serie de tiempo del modelo muestra una marcada circulación estuarina con velocidades más intensas a las observadas. (ver **Figura 26**)

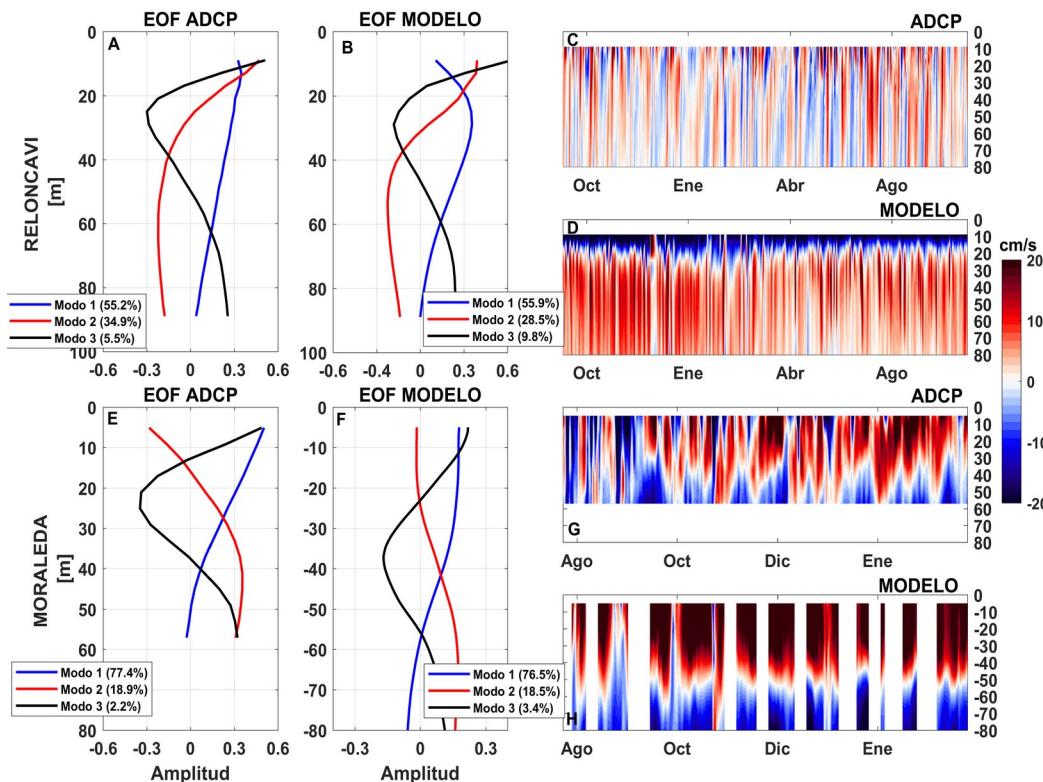


Figura 26: MOSA: Validación de la estructura vertical de corriente residual en boca fiordo Reloncaví y canal Moraleda. a) EOF vertical de la corriente residual ADCP- Reloncaví, b) EOF vertical de la corriente residual Modelo- Reloncaví, c) serie de tiempo corriente residual componente u ADCP- Reloncaví, d) serie de tiempo corriente residual componente u Modelo- Reloncaví, e) EOF vertical de la corriente residual ADCP-Moraleda, f) EOF vertical de la corriente residual Modelo-Moraleda, g) serie de tiempo corriente residual componente v ADCP-Moraleda, h) serie de tiempo corriente residual componente v Modelo-Moraleda.



5.1.1.4 Datos de Boyas del programa Centro de Datos para la Acuicultura

Se utilizó datos de temperatura del mar y salinidad de boyas de monitoreo del Centro de Datos para la acuicultura, en específico se utilizó la boyas ACS1 ubicada en el fiordo Reloncaví y la ACS10A ubicada cerca de Castro en Chiloé(chonos.ifop.cl/acs/start/). En cada caso se muestra el periodo disponible de datos de cada boyas. Si bien este sistema es una fuente valiosa de información, aun muchas boyas presentan inconsistencias, fluctuaciones caóticas de los datos, periodos sin medición y cambios no naturales, lo cual refleja la complejidad y desafíos que presenta un sistema como este. En este caso los datos de boyas tiene medias móviles para reducir el ruido. Para cada boyas se tienen datos superficiales y profundos.

La boyas ACS1 (Reloncaví) muestra que la temperatura superficial en MOSA podría estar bajo lo esperado, con un error entre 2 y 3 °C en superficie, aunque la correlación se mantiene sobre 0.9. Mientras que el sensor profundo muestra un desajuste de casi 1°C entre julio 2024 y enero 2025. A partir de esta fecha la temperatura se presenta con un ajuste alto y un error menor a 0.1°C (ver **Figura 27**). La salinidad en la boyas se ve con alta variabilidad superficial, mientras que el modelo no presenta dichas fluctuaciones, esta alcanzó diferencias sobre 3 PSU en algunos periodos, mientras que la correlación entre el modelo y la boyas es de 0.54 y 0.63 en superficie y capa profunda respectivamente. Se muestra como si bien MC-Patanor presenta una estacionalidad en la salinidad, esta es más débil que la observada, posiblemente a una subestimación de los flujos de agua dulce estacionales, como también a una posible sobre mezcla en el modelo. (ver **Figura 27**)

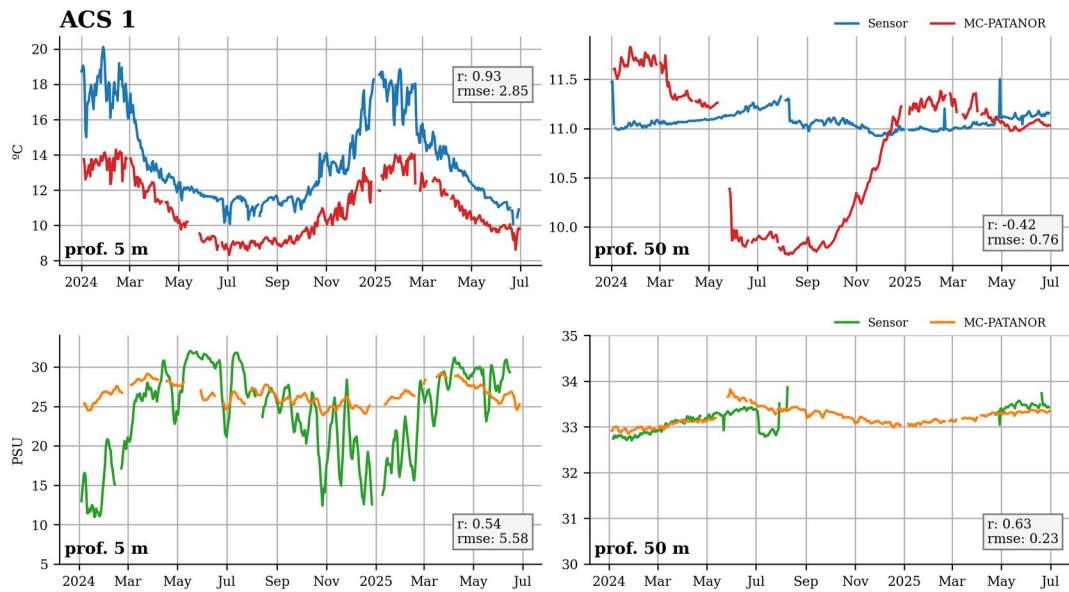


Figura 27: (ACS 1). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC-Patanor entre enero de 2024 y julio de 2025.

La boyas ACS10A (cerca de Castro) tiene datos a 10m para superficie y 50m en capa profunda. Los datos de temperatura del mar muestra un alto ajuste con el modelo, con un $r = 0.93$, un error de 0.5°C en la capa superficial, mientras que la capa profunda tiene una leve correlación a 0.88 , aunque el error se mantiene cercano a 0.5°C , lo cual indica un buen ajuste del modelo, aunque en meses de verano el modelo se presentó levemente más cálido que lo observado en la boyas (ver **Figura 28**).

Los resultados muestran que en general MC-Patanor reproduce los patrones estacionales de temperatura y salinidad, y que responde favorablemente a la evolución temporal en escalas sinópticas de estas variables. además la corriente en el modelo presenta una estructura vertical que se ajusta a lo observando, logrando reproducir satisfactoriamente los 3 principales modos oscilatorios

presentes en las mediciones, los cuales contienen más del 90% de la varianza observada.

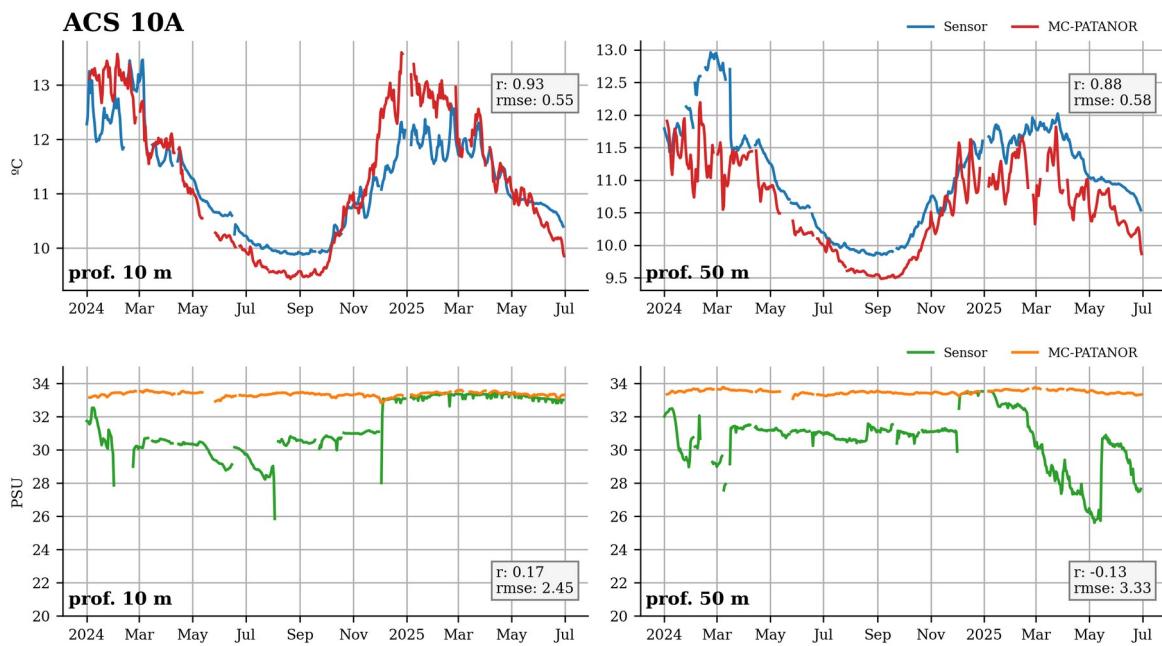


Figura 28: (ACS 10A). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC-PATANOR entre enero de 2024 y julio de 2025.

5.1.2 Atmósfera

5.1.2.1 Rendimiento

El modelo atmosférico MW-Patanor ha operado de forma continua desde 2018, entregando pronósticos diarios con resolución temporal horaria sobre una malla de 3 km para la Patagonia Norte. El rendimiento de este sistema para el último periodo se evaluó entre el 1 de enero de 2024 y el 12 de agosto de 2025, presentando solo tres caídas (**Figura 29**), todas asociadas a fallas en los servidores de descarga de datos, sin afectar la continuidad general del modelo. Esta alta disponibilidad operacional, superior al 99%, refleja una buena estabilidad del sistema, permitiendo una evaluación robusta de su desempeño con datos observacionales y productos de reanálisis. Además, MW-Patanor ha seguido cumpliendo su rol clave como insumo para el modelo hidrodinámico MC-Patanor y otros productos operativos del sistema integrado.

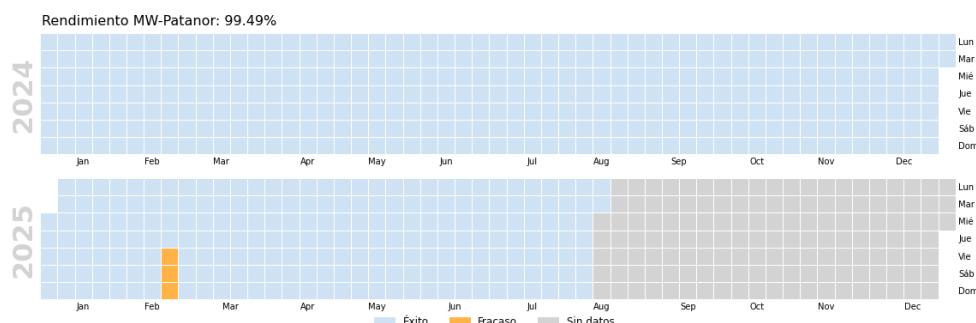


Figura 29: Rendimiento de MW-Patanor durante el periodo 2024 – 2025.

En esta primera etapa de la evaluación, se analizó la capacidad del modelo para reproducir la temperatura del aire y los vientos a 2 y 10 metros respectivamente, utilizando promedios diarios en 3 boyas: ACS1, ACS10A y ACS34, y 5 estaciones meteorológicas terrestres: Apiao, Comau, Marimeli, Tranqui y Melinka.



5.1.2.2 Boyas

Para el caso de la temperatura del aire a dos metros (**Figura 30**), en términos generales, se observó una alta coherencia entre los datos modelados y los observados en cuanto a la evolución temporal. Las tres boyas presentaron correlaciones elevadas, con valores superiores a 0.9, lo que indica que el modelo fue capaz de captar adecuadamente la fase de las variaciones diarias y estacionales de temperatura.

A pesar de esta buena correspondencia en términos de la fase, el modelo mostró una tendencia sistemática a subestimar las amplitudes de las variaciones térmicas, siendo esta subestimación más marcada en la boyas ACS1. En contraste, la ACS34 presentó un ajuste más cercano en este aspecto. El sesgo fue reducido en las boyas ACS1 y ACS10A, con desviaciones promedio menores a $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, lo que sugiere que el modelo representó con buena precisión los valores medios de temperatura en esas ubicaciones. Sin embargo, en la boyas ACS34 se observó una subestimación más pronunciada, alcanzando aproximadamente -1.5°C . En cuanto a la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el mejor desempeño se registró en la boyas ACS10A, con un valor cercano a 0.76°C , mientras que la ACS1 y la ACS34 presentaron errores mayores, reflejando una menor precisión en esas zonas.

En conjunto, estos resultados sugieren que el modelo reproduce de manera satisfactoria la variabilidad temporal de la temperatura del aire en las zonas monitoreadas, aunque con ciertas limitaciones en la magnitud de las variaciones, especialmente en sectores específicos como el representado por la ACS34.

El análisis del viento en las boyas mostró un desempeño más heterogéneo del modelo en comparación con la temperatura del aire (**Figura 31**). Aunque en general se logró capturar la variabilidad temporal de la magnitud del viento, la precisión varió considerablemente entre las distintas ubicaciones. La mejor representación se observó en la boyas ACS10A, donde el modelo logró seguir con mayor fidelidad los cambios en la magnitud del viento, tanto en términos de fase como de intensidad. Por el contrario, en las boyas ACS1 y ACS34, el ajuste fue más limitado, con una menor correlación entre los datos modelados y observados.

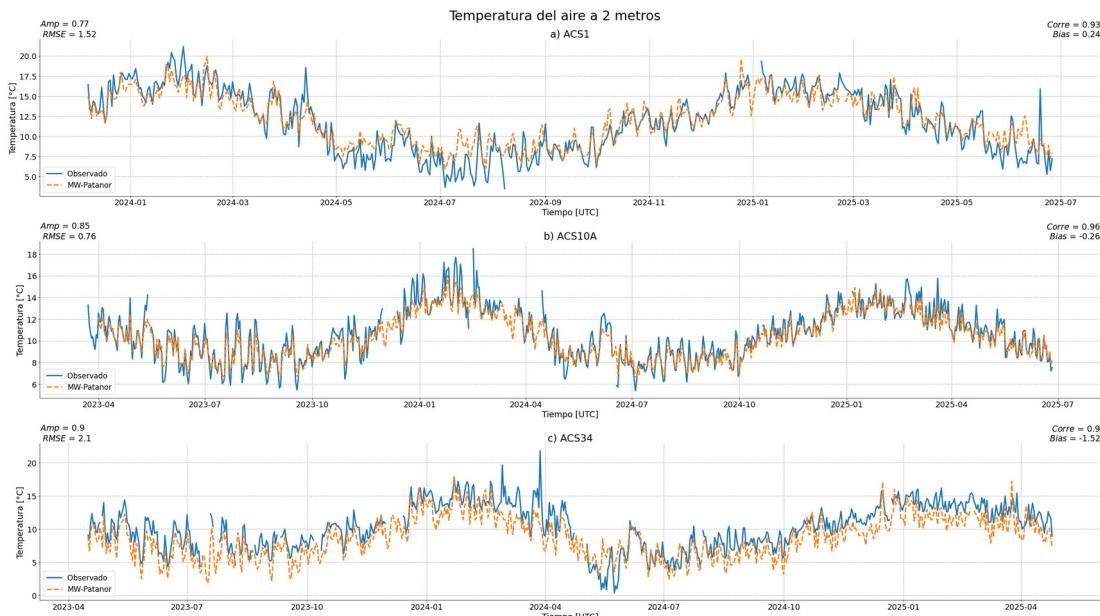


Figura 30: Evaluación de MW-Patanor con datos de boyas para la temperatura del aire a 2 metros .

En cuanto a la amplitud de la señal, el modelo tendió a sobreestimar los valores en dos de las boyas, mientras que en la ACS10A se observó una ligera subestimación. Este comportamiento sugiere que, en ciertas zonas, el modelo amplifica las variaciones del viento más de lo que ocurre en la realidad.

A pesar de estas diferencias, el sesgo se mantuvo bajo en las tres ubicaciones, lo que indica que el modelo no presentó errores sistemáticos importantes en los valores medidos de viento. Especialmente en la ACS34, el ajuste fue bastante preciso, con una diferencia casi nula entre los valores simulados y los observados.

La raíz del error cuadrático medio reforzó esta evaluación, mostrando que el modelo fue más preciso en la ACS10A, donde el error fue considerablemente menor en comparación con las otras dos boyas. En general, estos resultados destacan un desempeño más confiable del modelo en zonas específicas, mientras que en otras se evidencian limitaciones que podrían estar relacionadas con factores locales no bien representados.

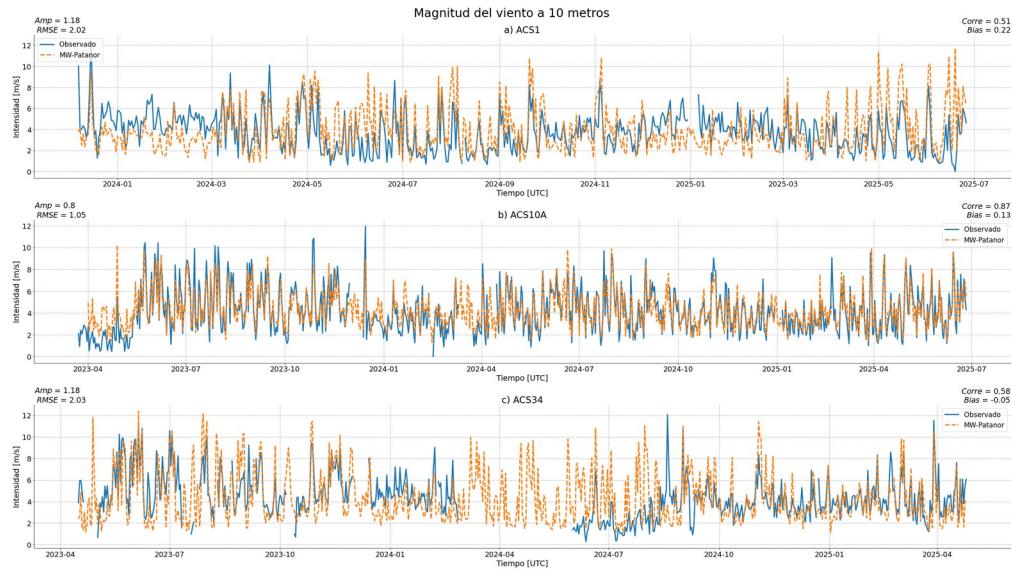


Figura 31: Evaluación de MW-Patanor con datos de boyas para la magnitud del viento a 10 metros .

5.1.2.3 Estaciones meteorológicas REDMET

En general, el modelo mostró un buen desempeño en la simulación de la temperatura del aire a dos metros (**Figura 32**), con una alta correlación entre las series modeladas y observadas en todas las estaciones, superando el umbral de 0.9. Esto indica que el modelo fue capaz de reproducir adecuadamente la evolución temporal de la temperatura en las distintas ubicaciones.

En lo que respecta a la amplitud de las señales, se observó un ajuste preciso en las estaciones de Comau, Marimeli y Tranqui, donde los valores simulados estuvieron próximos a los observados. Sin embargo, en las estaciones de Apiao y Melinka el modelo tendió a subestimar las variaciones térmicas, reflejando una menor amplitud en las simulaciones, lo que sugiere que en estas ubicaciones el modelo suaviza las fluctuaciones reales de temperatura.

El análisis del sesgo mostró que, en la mayoría de las estaciones, el modelo subestimó levemente los valores de temperatura. Las diferencias más pequeñas se registraron en Melinka y Apiao, donde el ajuste fue bastante cercano a los valores reales. En contraste, estaciones como Tranqui y Marimeli presentaron una subestimación más marcada.

En cuanto a la raíz del error cuadrático medio, la estación de Apiao mostró

el mejor desempeño, con el menor error general. Las estaciones de Comau y Tranqui también presentaron errores relativamente bajos y similares entre sí, mientras que Marimeli y Melinka exhibieron los valores más altos, aunque aún dentro de rangos aceptables.

En conjunto, estos resultados indican que el modelo representa de forma robusta la evolución temporal de la temperatura del aire en la mayoría de las estaciones analizadas, aunque persisten algunas limitaciones en la estimación de amplitudes y valores medios en ciertos puntos específicos.

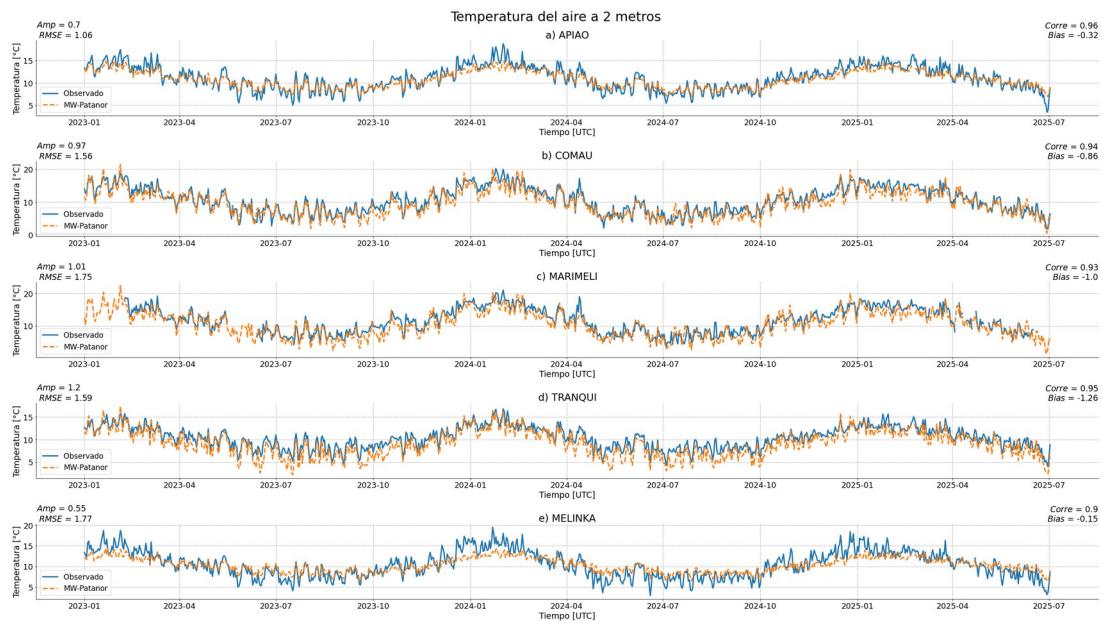


Figura 32: Evaluación de MW-Patanor con datos de estaciones terrestres para la temperatura del aire a 2 metros .

Como complemento al análisis estadístico, se realizó una comparación visual y descriptiva de las rosas de viento para cada una de las estaciones meteorológicas (**Figura 33**), con el objetivo de evaluar la representación de la dirección predominante del viento, su frecuencia de ocurrencia y las magnitudes asociadas. En el caso de Apiao, el modelo logró una excelente concordancia con las observaciones, reproduciendo con gran fidelidad tanto las magnitudes como la dirección predominante del viento desde el norte. En Comau, las intensidades fueron bien captadas, aunque con una ligera discrepancia en la dirección, mientras

las observaciones indican una predominancia del noroeste, el modelo tiende a favorecer el norte. Por su parte la estación Marimeli destacó por la buena correspondencia en la dirección predominante (oeste), aunque el modelo sobreestimó ligeramente la intensidad del viento, sin afectar la coherencia global del patrón. En Isla Tranqui el modelo capturó correctamente los vientos más fuertes provenientes del norte, además resolvió una componente secundaria del oeste, lo que concuerda con los datos de la estación, pero con mayor ocurrencia. Finalmente, en Melinka se representaron adecuadamente las intensidades máximas asociadas a vientos del norte y nor-noreste, y el patrón de menor frecuencia de vientos desde el oeste se mantuvo coherente entre modelo y observación.

En general, el modelo muestra una capacidad sólida para reproducir la dirección y magnitud del viento en estas estaciones, lo cual es evidente en la mayoría de los casos, aunque persisten pequeñas discrepancias vinculadas a factores locales o a la resolución del modelo.

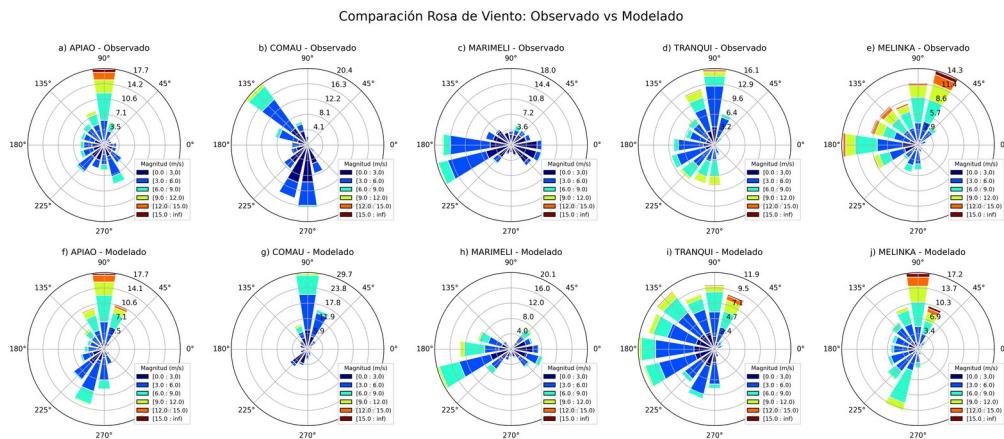


Figura 33: Comparación de rosas de viento entre MW-Patanor y estaciones meteorológicas terrestres.

5.1.2.4 Evaluación espacial con ERA5

Para evaluar la representación espacial del modelo MW-Patanor, se realizó una comparación con datos del producto ERA5, la cual, permite valorar cómo un modelo de alta resolución (~3 km) se comporta frente a un producto estándar

consolidado, distinguiendo fortalezas y limitaciones en la escala regional, considerando variaciones estacionales y la coherencia de la distribución espacial para la magnitud del viento y temperatura del aire a 10 y 2 metros respectivamente.

El análisis de la correlación punto a punto revela un patrón claro, tanto para la magnitud del viento como para la temperatura del aire (**Figura 34**), exhiben valores más elevadas en zonas de océano abierto, y disminuyen al adentrarse en tierra y particularmente en áreas de altitud elevada, como la cordillera de los Andes. En el caso del viento, incluso se aprecia una caída de la correlación durante el verano en la Isla de Chiloé. Para la temperatura del aire, las correlaciones más bajas se concentran en invierno, acentuándose en zonas con topografía más exigentes.

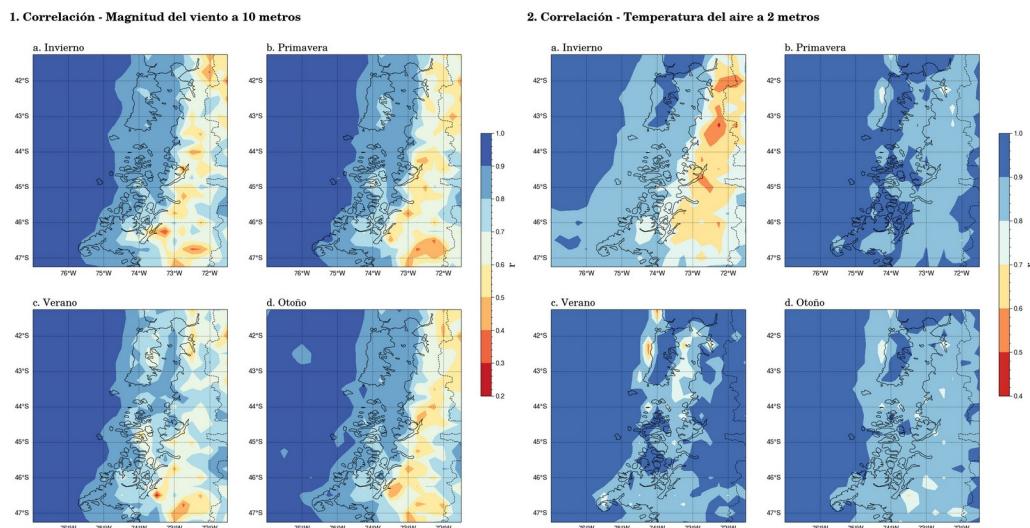


Figura 34: Campos de correlación estacionales entre MW-Patanor y ERA5 para el periodo entre junio de 2024 y mayo de 2025. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros.

Los mapas de sesgo de la magnitud del viento (**Figura 35**) muestran que en áreas costeras y terrenos abiertos el desajuste de los promedios es acotado, rondando en torno a ± 2 m/s. No obstante, conforme se avanza hacia zonas terrestres con relieve más complejo, los sesgos se tornan consistentemente positivos, alcanzando su máxima magnitud en regiones de alta topografía. Este

patrón se intensifica especialmente durante la primavera. De forma similar, los sesgos en la temperatura del aire permanecen bajos en áreas relativamente planas y abiertas, pero aumentan en terrenos irregulares. Se observa una clara estacionalidad, durante el invierno predominan los sesgos positivos sobre estimaciones), mientras que en verano predominan los sesgos negativos .

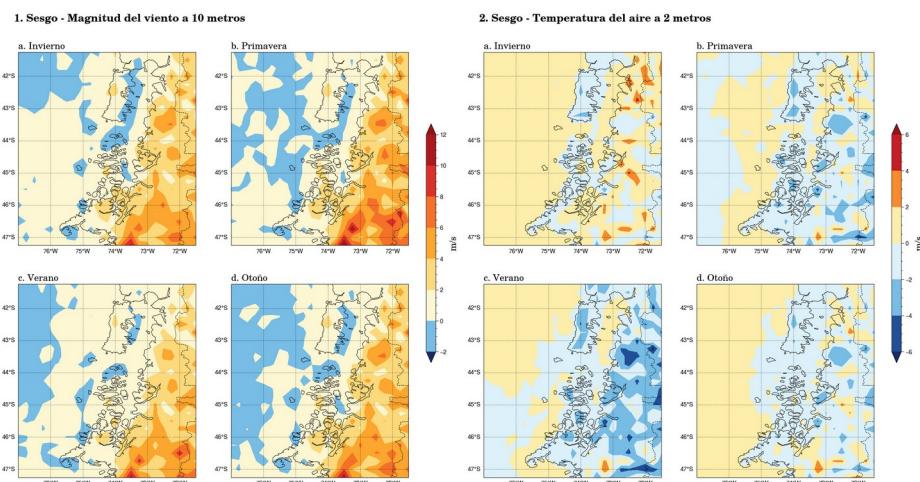


Figura 35: Campos de sesgo estacionales entre MW-Patanor y ERA5 para el periodo entre junio de 2024 y mayo de 2025. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros.

Para analizar las diferencias en la representación del viento, se seleccionaron dos áreas con topografía compleja dentro del dominio de estudio. La primera se ubica en la zona norte, abarcando el estuario de Reloncaví y el fiordo Comau; la segunda, en la zona sur, centrada en los canales Jacaf y Puyuhuapi.

En el área norte, ambos productos muestran un cambio estacional marcado en la dirección de los vientos (**Figura 36**), captando adecuadamente la variabilidad general del patrón. No obstante, en MW-Patanor este comportamiento comienza a modificarse localmente a medida que el viento interactúa con la topografía compleja, generando flujos canalizados que siguen el relieve, lo que no se observa en ERA5, donde la dirección del viento permanece uniforme en toda la zona. También se evidencian diferencias en la magnitud, siendo significativamente más intensos los vientos simulados por MW-Patanor, particularmente en primavera.

En el área sur, se mantiene una dirección predominante del viento desde el norte a lo largo del año (**Figura 37**), con una componente adicional desde el oeste durante la primavera y el verano. Ambos modelos reflejan este patrón en zonas abiertas, pero al avanzar hacia el este, donde el relieve es más accidentado, MW-Patanor representa claramente desvíos locales en la dirección del viento, siguiendo el trazado de los canales y valles, mientras que ERA5 no muestra cambios apreciables. Al igual que en el caso anterior, el modelo regional simula velocidades de viento más altas en primavera.

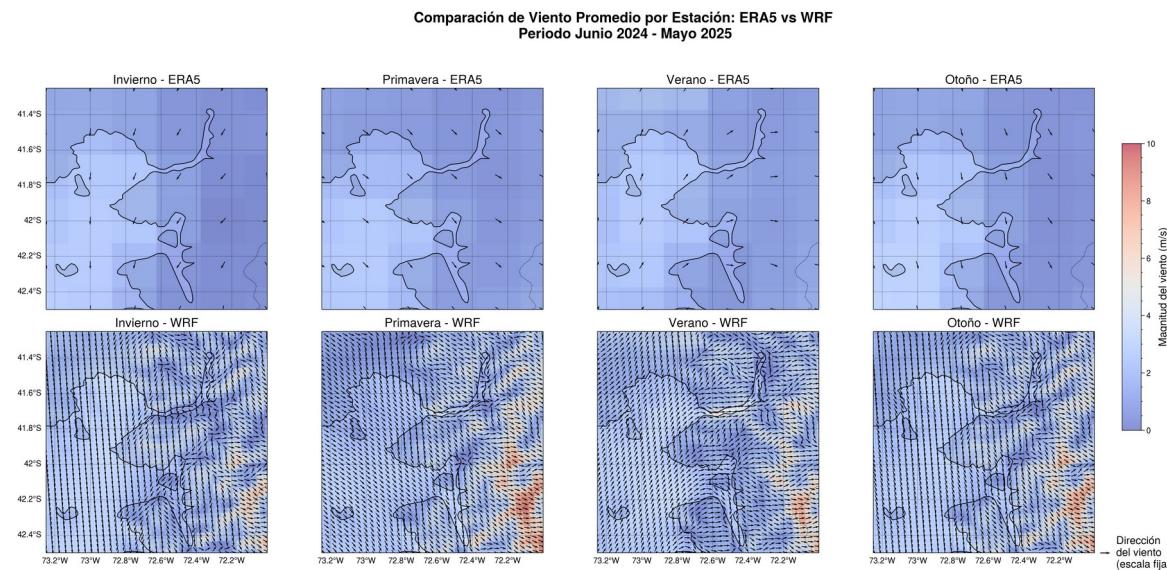


Figura 36: Comparación del viento promedio estacional entre ERA5 y MW-Patanor, para la zona norte del dominio de MW-Patanor.

Comparación de Viento Promedio por Estación: ERA5 vs WRF
Período Junio 2024 - Mayo 2025

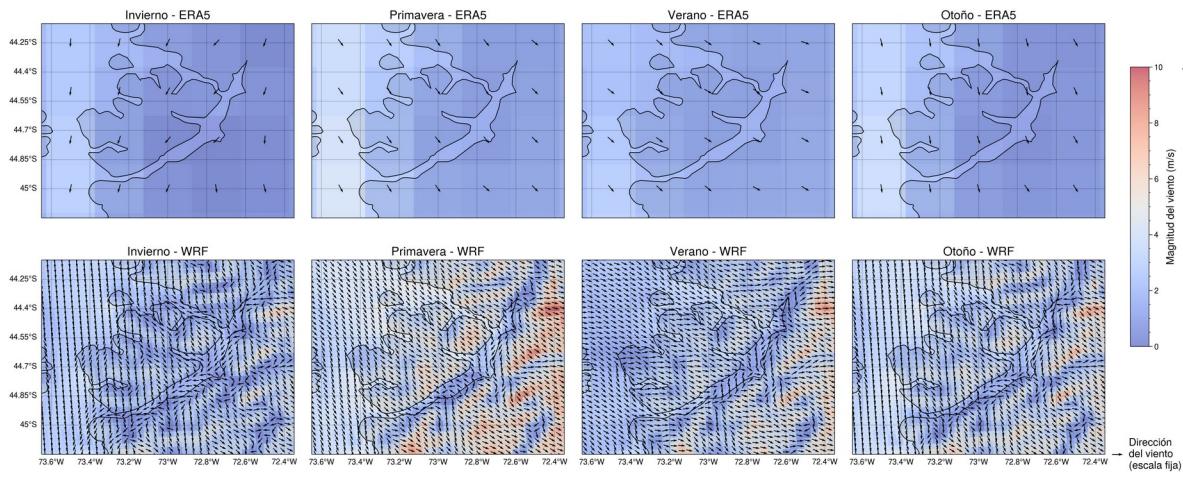


Figura 37: Comparación del viento promedio estacional entre ERA5 y MW-Patanor, para la zona sur del dominio de MW-Patanor.

En general el modelo MW-Patanor presenta un alto ajuste con respecto a las observaciones, logrando reproducir patrones estacionales y también desarrollar estructuras sinópticas en el viento y la temperatura del aire. Además se presenta como un modelo de alta resolución que es capaz de reproducir fenómenos de encajonamiento local del viento en zonas de canales y fiordos, frente a productos globales de baja resolución que no son capaces de reproducir este rasgo, presentándose así como una fortaleza a destacar del modelo MW-Patanor.



5.2 Resultados objetivo específico 2:

“Calibrar y evaluar el modelo MOSA para la región de Magallanes y la Antártica Chilena con observaciones oceanográficas y históricas”.

En este objetivo se presentan las evaluaciones de los modelos *MC-Mag* y *MW-Mag*, además de pruebas en desarrollo. Para ordenar los resultados, la sección será separada para modelos oceánicos y atmosféricos.

5.2.1 Océano

El modelo operacional para la región de Magallanes (en adelante *MC-Mag*) se evaluó con temperatura superficial del mar de datos satelitales, datos de Boyas de monitoreo del proyecto Centro de datos para la Acuicultura (<https://chonos.ifop.cl/acs/start/>) y corrientes.

La escasez de información observacional, la baja resolución de los productos satelitales 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 un sistema de fiordos, glaciares e influencia subpolar como lo es la región de Magallanes. En este objetivo se presenta la validación de la temperatura superficial del mar (TSM), la temperatura y salinidad en la columna de agua, nivel del mar y corrientes pronosticadas por el modelo operacional *MC-Mag*, tomando en cuenta la información disponible hasta la fecha.

5.2.1.1 Desempeño operacional

El modelo *MC-Mag* comenzó a funcionar de manera operacional en el servidor de cómputos en 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 se han debido a diversos motivos. 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”, donde el modelo no puede resolver las ecuaciones de movimiento para esas condiciones y por lo tanto

se interrumpe la simulación. Estas fallas, también pueden deberse a problemas con las descargas de datos globales y en algunos casos a problemas de hardware, tales como almacenamiento de datos, memoria del equipo y fallas en los nodos de cálculo. El año 2024 su rendimiento fue del 98%, mientras que en hasta junio de 2025 su rendimiento es de 90% (ver **Figura 38**).

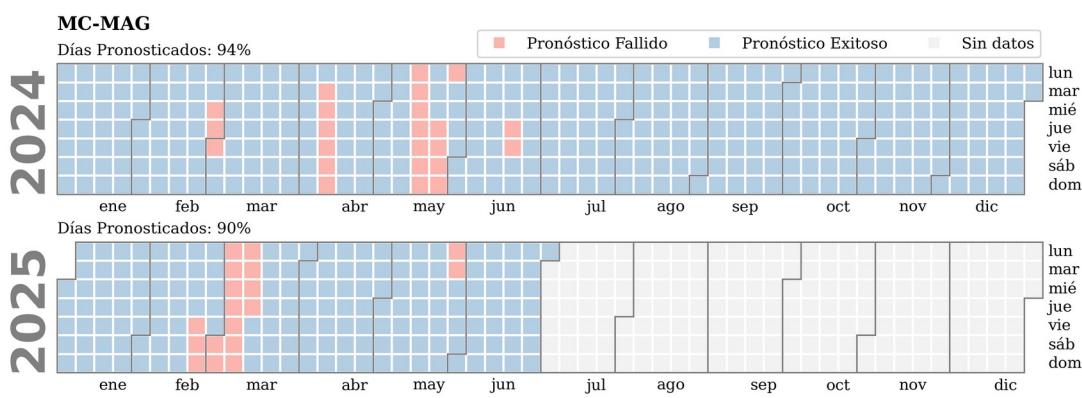


Figura 38: Rendimiento del sistema de pronóstico MC-Mag durante el periodo operacional 2024–2025. El porcentaje corresponde a los días con pronóstico exitoso respecto al total de días pronosticados (94% en 2024 y 90% en 2025). En azul se indican los días con pronóstico exitoso, en rojo los días con pronóstico fallido y en gris claro los días sin ejecución del pronóstico.

5.2.1.2 Temperatura Superficial del Mar (TSM)

Se utilizó datos de TSM del producto AVHRR para evaluar el desempeño presente e histórico de MC-Mag en: todo el dominio, solo usando los datos disponibles al interior del Estrecho de Magallanes y del dominio oceánico sin el Estrecho de Magallanes. Notar que este producto no cubre completamente las zonas de mares interiores, solo incluye algunos puntos dentro del Estrecho de Magallanes, los cuales se evaluaron separadamente como “mar interior”.

El dominio completo presentó una correlación de 0.95 con respecto a lo observado, dando cuenta de una buena representación del ciclo estacional de TSM, con un error y $<1^{\circ}\text{C}$ y un sesgo de 0.73°C . Esto ultimo indica que el modelo

se presenta más frío que lo observado, incrementando esta tendencia en los veranos, donde el desajuste se incrementa levemente. Cuando sepáramos el dominio entre mares interior y exteriores encontramos que si bien las correlaciones se mantienen sobre 0.9 en ambos, el error aumenta a 1°C en el interior, mientras que el dominio exterior se mantiene bajo 1°C. Esto denota como los procesos locales en el modelo podrían estar subestimados. También se destaca que el sesgo se mantiene negativo en ambos casos, confirmando que la subestimación promedio de TSM es tanto al interior como en el océano exterior del dominio de MC-Mag (ver **Figura 39**).

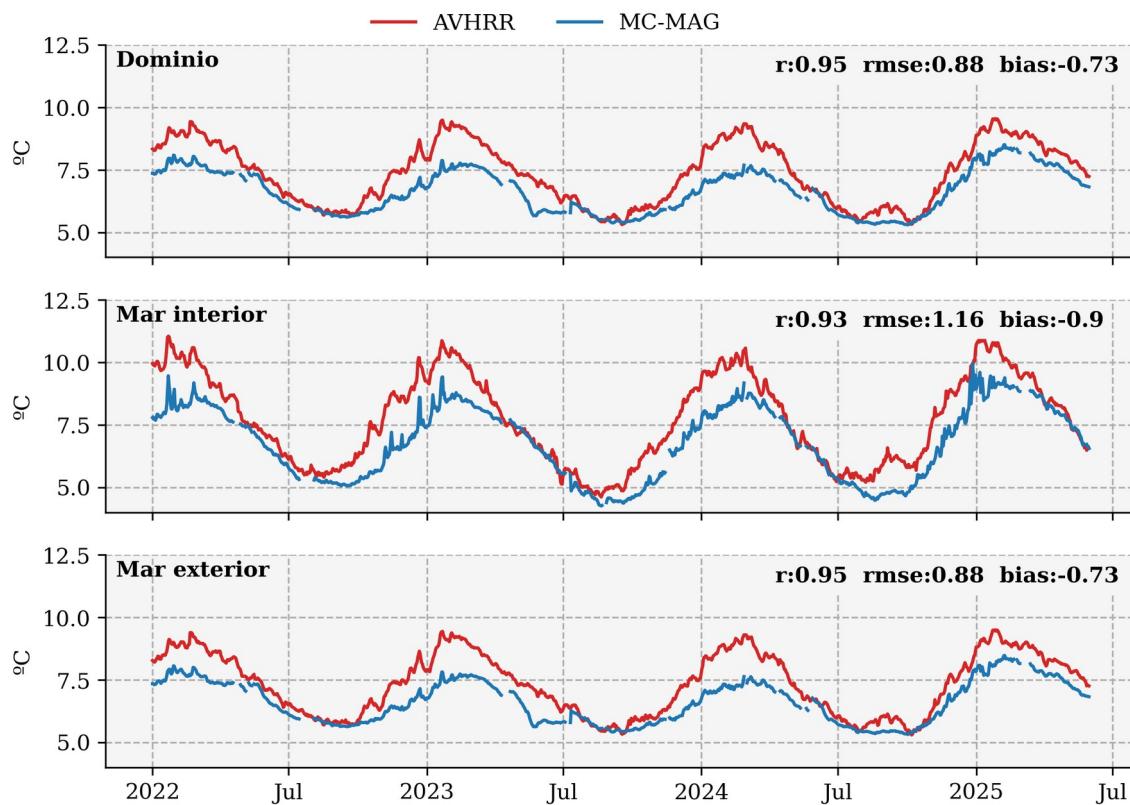


Figura 39: Comparación del promedio diario de la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-Mag y el producto satelital AVHRR entre enero de 2022 y mayo de 2025. Se incluye coeficiente de correlación (r), raíz del error cuadrático medio (rmse) y el sesgo (bias), calculados para tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (ver figura en metodología).

Al analizar el promedio de todo el periodo de la distribución espacial de los estadísticos de TSM en el modelo, podemos observar que la correlación se mantiene sobre los 0.9 en gran parte del dominio incluido las zonas del estrecho de Magallanes. De hecho se destacan que las máximas correlaciones son precisamente en las zonas costeras del dominio. El error cuadrático medio muestra sus máximos hacia el extremo oriental del Océano Atlántico, manteniéndose cercano a 1°C en las zonas costeras e interiores. También se muestra sobre 1°C en los puntos dentro del Estrecho de Magallanes. Finalmente el sesgo se presenta negativo en gran parte del dominio, incluyendo las zonas costeras e interiores, dando cuenta de una subestimación de la TSM, en el modelo, lo cual, indica que el modelo en general es entre 1-2 °C más frio que lo observado. Se espera que este sesgo disminuya considerablemente en la actualidad debido a la implementación de un nuevo modelo atmosférico, que incluye cambios en los flujos de calor en superficie, radiación, nubosidad, además de una grilla que incluye mejoras batimétricas que impactan en como se mezcla verticalmente la columna de agua (ver **Figura 40**).

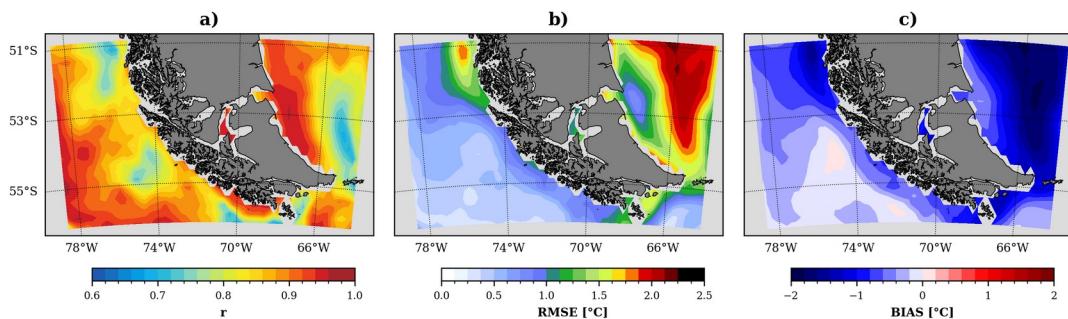


Figura 40: Comparación del promedio diario de la temperatura superficial del mar (TSM) pronosticada por MC-Mag y el producto satelital AVHRR entre enero de 2022 y mayo de 2025. Se incluye coeficiente de correlación (r), raíz del error cuadrático medio (rmse) y el sesgo (bias), calculados para tres áreas: dominio completo, mar interior y mar exterior (ver figura en metodología).

5.2.1.3 Corrientes

La evaluación de la corriente residual del modelo se realizó utilizando un ADCP instalado en Canal Sarmiento, al norte de Canal Unión, que corresponde a la salida occidental del Golfo Almirante Montt, en la Región de Magallanes. En Sarmiento domina la estructura vertical de 2 capas explicado por circulación estuarina. La evaluación indica que la dispersión de la corriente logra ser simulada por el modelo fluctuando norte-sur en Sarmiento, aunque levemente subestimada por el modelo (ver **Figura 41**).

La corriente en canal Sarmiento fluctúa a lo largo del canal (noroeste-sureste), lo cual es simulado por el modelo, por su parte la estructura vertical del Canal Sarmiento logra ser replicada por el modelo a través del modo 1 y 3 de EOF. El modelo en el caso del modo 1 concentra la mayor variabilidad del total de la corriente. El modo 1 mostró una estructura baroclínica, con una amplitud que disminuye con la profundidad; el modo 1 del modelo explicó el 75% de la variabilidad total, mientras que el ADCP alcanzó un 45% de la variabilidad total. El modo 2 presentó una estructura baroclínica, en el caso del modelo, explicó el 11% de la variabilidad total de la corriente y una capa ,mientras que el ADCP explicó 18% de la variabilidad total de la corriente. El modo 3 es una estructura de 3 capas que concentra el 7% y 8% de la variabilidad total en el modelo y ADCP (ver **Figura 42**).

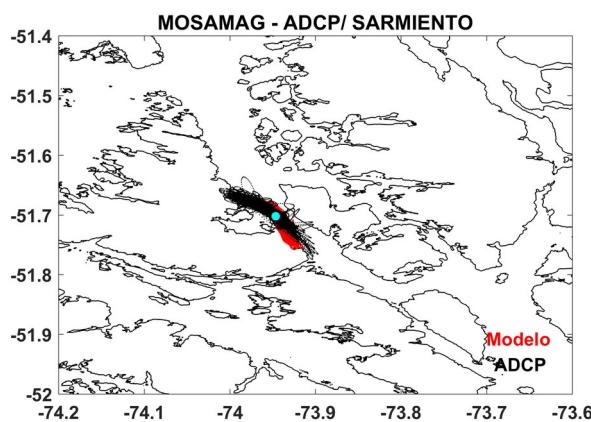


Figura 41: Dispersión de la corriente residual, modelo MC-Mag, en Canal Sarmiento, Región de Magallanes.

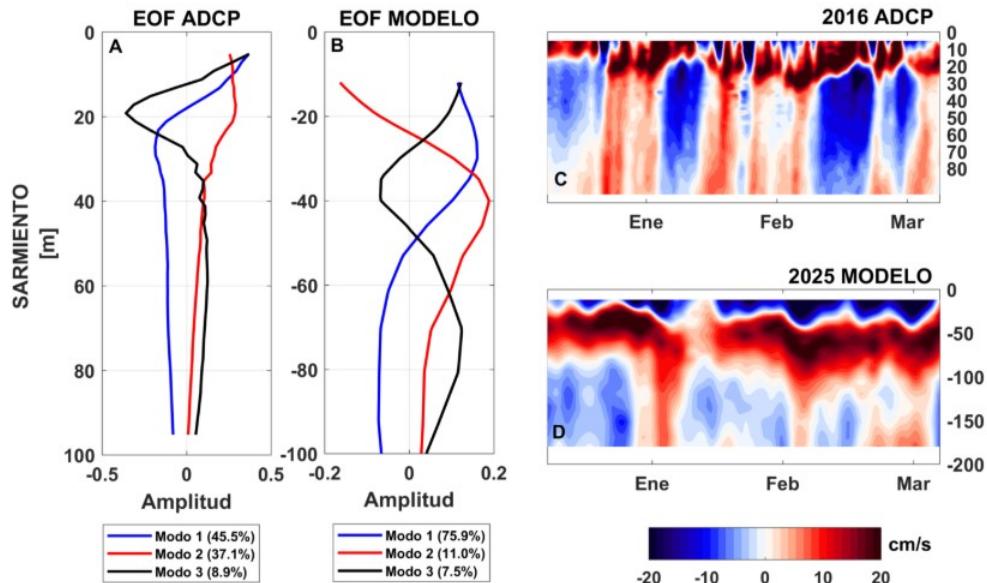


Figura 42: MC-Mag: Validación de la estructura vertical de corriente residual en el canal Sarmiento. a) EOF vertical de la corriente residual ADCP-Sarmiento, b) EOF vertical de la corriente residual Modelo-Sarmiento, c) serie de tiempo corriente residual componente v ADCP-Sarmiento, d) serie de tiempo corriente residual componente v Modelo-Sarmiento.

5.2.1.3 Boyas Programa Centro de Datos para la Acuicultura

Para evaluar la evolución temporal de la temperatura del mar y la salinidad en el modelo, se utilizó datos de Boyas oceanográficas del proyecto Centro de Datos para la Acuicultura (<https://chonos.ifop.cl/acs/start/>). En específico se uso la boyas ACS43A ubicada en el Canal Unión, unos cuantos kilómetros al sur del ADCP utilizado previamente, y la boyas ACS48 ubicado en el Fiordo Poca Esperanza, al interior del Golfo Almirante Montt.

La boyas 43A muestra una correlación de 0.93 en la temperatura superficial (10m), dando cuenta de una señal estacional fuerte pero subestimada, con un error cuadrático medio $< 2^{\circ}\text{C}$. Este error se acentúa en los meses de invierno, donde el modelo no logra alcanzar máximos de temperatura. Por su parte la capa



profunda (60m), que solo posee datos desde septiembre de 2024, presenta una correlación menor (0.85) y un error mayor que llega a 2.5°C. En este caso se observa un desajuste inicial del modelo que mejora a partir de enero de 2025, manteniendo un sesgo de -1.5°C (ver **Figura 43**). Por su parte la salinidad en superficie presenta un desajuste evidente, con un $r = 0.48$, el modelo no muestra una correcta estratificación, ni tampoco señal estacional. El error cuadrático medio es sobre 7 PSU. En la capa profunda el ajuste mejora, aunque los datos del sensor presentan fuertes fluctuaciones, el error se mantiene menor a 1 PSU.

Estas diferencias se deben principalmente a la falta de fuentes de agua dulce que tiene el modelo en esa zona en específico. Validaciones anteriores muestran que el modelo presenta una estratificación razonable en zonas con mayores fuentes de agua dulce. La etapa actual de este proyecto contempla la evaluación de un modelo con mayor cantidad de fuentes, además las fuentes de agua dulce en MC-Mag no tienen variabilidad estacional, lo cual se va a incorporar a partir de esta etapa, donde se espera mejorar sustancialmente la capacidad del modelo de reproducir estructuras bien estratificadas en especial en zonas interiores, como fiordos, bahías y canales.

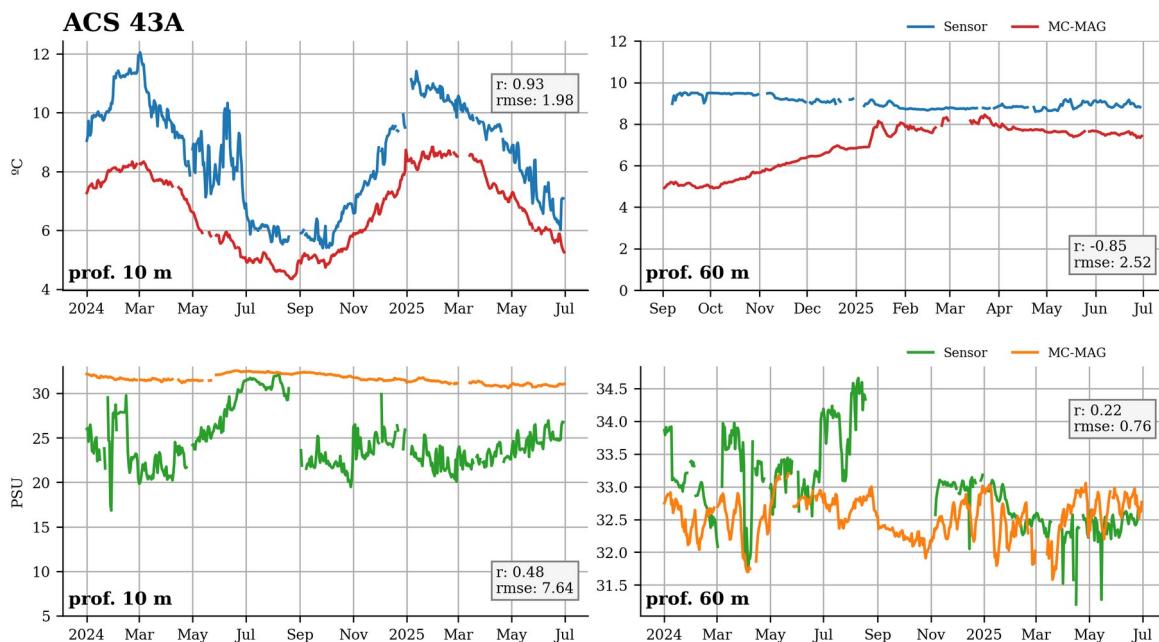


Figura 43: (ACS 43A). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC-MAG entre enero de 2024 y julio de 2025.

La boyas 48 esta ubicada al interior del Golfo Almirante Montt y solo tiene datos desde enero de 2025. La temperatura superficial presenta un 0.96 de correlación con el modelo, el cual si bien se presenta más frio, también muestra una caída estacional en fase con lo observado, aumentando su ajuste en invierno. El error cuadrático medio es de 2.4°C. La capa profunda si bien disminuye la correlación a 0.53, la boyas presenta un salto en los valores a partir de junio. Este cambio abrupto seguramente debido a un cambio de profundidad en los sensores. (ver **Figura 44**)

La salinidad en superficie presenta un ajuste razonable, no obstante en junio el sensor presenta una abrupta caída de casi 7 PSU, esto puede deberse a un cambio de profundidad del sensor .(en general estos cambios abruptos son recurrentes en las boyas instaladas en las ACS. Esta caída también reduce la correlación a solo 0.16 entre el modelo y lo observado. Por su parte la capa profunda mantiene un error superior a 7 PSU en toda la serie. Esto se debe

principalmente a la falta de fuentes de agua dulce del modelo al interior del Golfo Almirante Montt. Se espera reducir esta brecha con el aumento de fuentes y además con la integración de variabilidad estacional de estas fuentes.

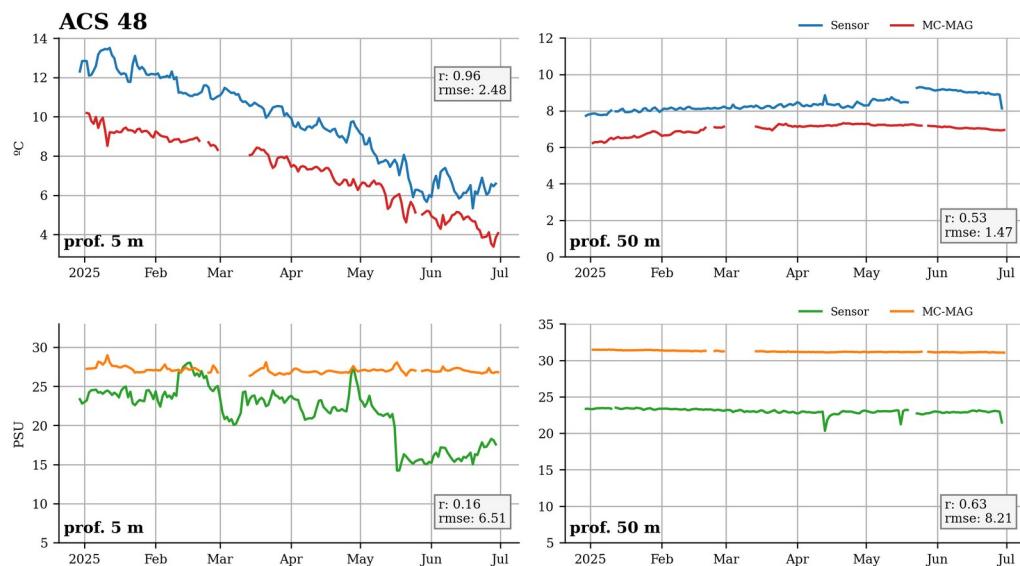


Figura 44: (ACS 1). Comparación de la temperatura del mar (panel superior) y salinidad (panel inferior) medida por los sensores de las estaciones de monitoreo ACS 1 (profundidades de 5 m y 50 m) con la temperatura pronosticada por MC-Mag entre enero y julio de 2025.

5.2.1.4 Mejoras y cambios

Nueva grilla

En esta etapa se introdujo una nueva grilla, con cambios en la batimetría y en la máscara. Estos cambios principalmente están en la zona de Seno Skyring, donde se optó por cerrar la conexión con el canal Gajardo (conexión occidental del Seno Skyring con el océano), debido a que en la realidad esta conexión es mínima, con profundidades menores a 3m, un angostura >400m, los que genera un intercambio de agua casi despreciable en comparación con la conexión oriental, el canal Fitz Roy. Dejar abierta esta conexión implicaba un transporte no

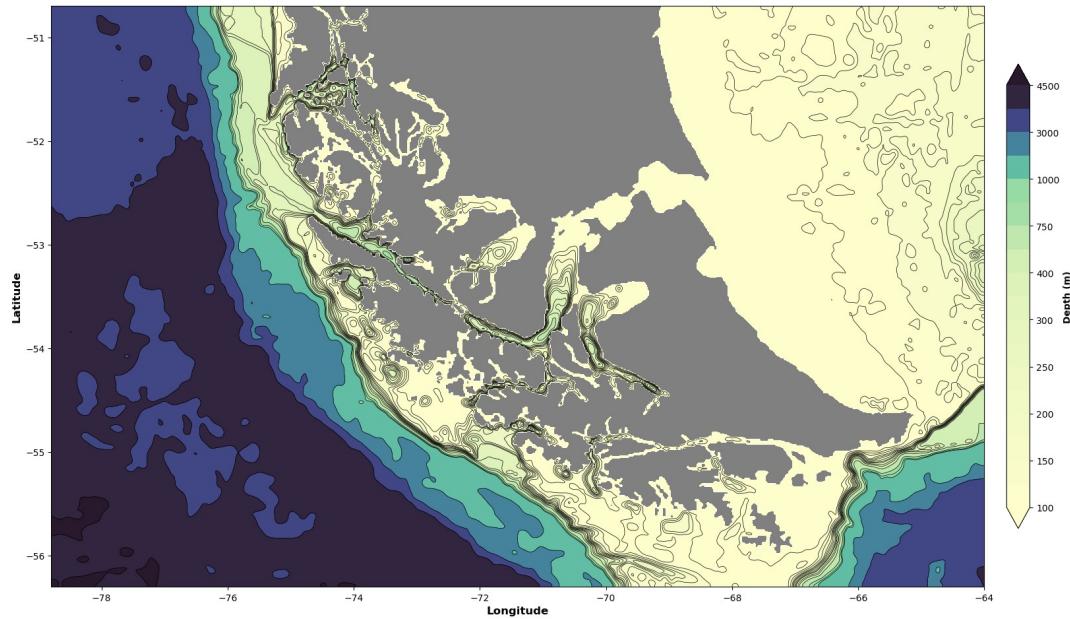


Figura 45: Dominio actual de MC-Mag

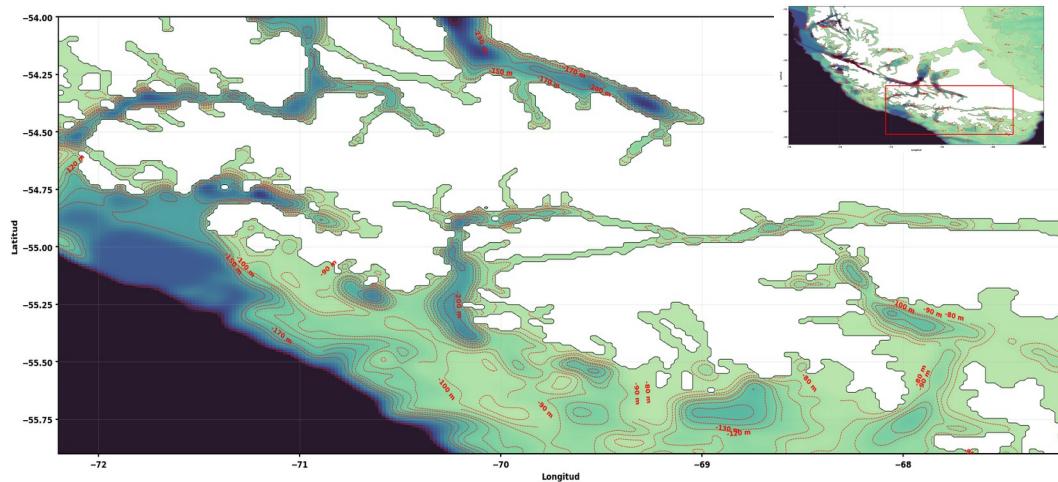


Figura 46: Máscara y batimetría de MC-Mag entre Seno Almirantazgo y Canal Beagle



realista, y que generaba una mezcla subestimada de agua oceánica, causando que el Seno presentara altas salinidades en todo el año, mientras que la observación muestra que las salinidades suelen estar en el rango de los 10-20 PSU en toda la columna. Finalmente se optó en poner un punto de fuente de agua dulce en la zona de canal Gajardo (**Figura 45**).

Otra zona que también presenta cambios es en Canal Beagle, donde se definió con mayor detalle los fiordos Ventisquero, Garibaldi, Pía y zonas cercanas, además de cambios menores en todo el dominio que incluyeron mejor definición de máscara y mejor representación de batimetría, con modificaciones puntuales (**Figura 46**).

Integración MW-Mag/MC-Mag

Tal como se indica en la siguiente sección de Atmósfera, para MC-Mag se diseñó e implementó un modelo atmosférico de alta resolución (5km) basado en el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), denominado MW-Mag, el cual fue exitosamente integrado en MC-Mag. Esto implica que cada día se construye un archivo bulk que contiene los vientos superficiales del modelo, así como flujos de calor, onda corta, onda larga y radiación desde WRF. Estos cambios fueron implementados en el mes de julio de 2025 y se espera en la próxima evaluación observar el impacto en la temperatura y corrientes superficiales sobre el modelo de esta implementación. La operación diaria de MC-Mag se ilustra en la **Figura 47**.

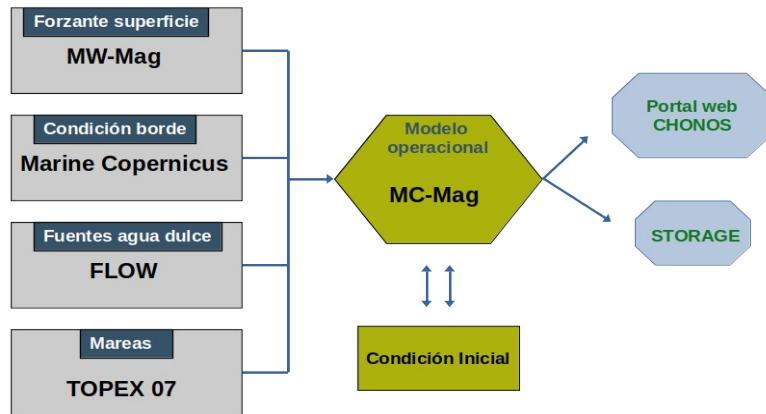


Figura 47: Operación diaria de MC-Mag

En general la evaluación de MC-Mag muestra que el modelo reproduce patrones estacionales principalmente en la temperatura, aunque con un sesgo negativo $\sim 2^{\circ}\text{C}$, mientras que la salinidad aparece subestimada en zonas de mares interiores. La corriente evaluada en el Canal Sarmiento presenta un buen ajuste, destacándose la presencia de estructuras verticales coherentes con las observadas, un primer modo barotrópico, un segundo modo baroclínico que da cuenta de la circulación residual aunque el modelo evidencia una cizalle más débil que lo observado, y un 3 modo de 3 capas que se ajusta bien. A su vez los datos de las boyas muestran que MC-Mag responde bien a las escalas sinópticas, mostrando correlaciones suficientes en algunas zonas.

Por su parte se espera que la integración como forzante atmosférico de MW-Mag, la incorporación de una nueva grilla, además de aumentar las fuentes de agua dulce mejoren notoriamente la calidad de los pronósticos de MC-Mag.

5.2.2 Atmósfera

5.2.2.1 Implementación y evaluación preliminar de MW-Mag

Durante la etapa inicial de MW-Mag se compararon dos configuraciones del modelo para determinar la más apropiada en términos de precisión y eficiencia computacional. En el Escenario 1 se utilizó un dominio único con resolución de 5 km, mientras que en el Escenario 2 se empleó una configuración anidada con un dominio padre de 9 km y un dominio hijo más fino de 3 km. La evaluación se centró en el desempeño de ambos esquemas para las variables magnitud del viento a 10 metros y temperatura del aire a 2 metros, durante el mes de junio de 2024 en la región de Magallanes.

Los resultados obtenidos para la magnitud del viento (**Figura 48, Tabla 10**) indican un mejor desempeño general del escenario de 3 km, particularmente en términos de correlación, donde las tres estaciones evaluadas mostraron un ajuste más estrecho con las observaciones. Asimismo, este escenario presentó valores menores de RMSE en dos de los tres puntos analizados (ACS43A y GAM), lo que sugiere una mejor capacidad para reproducir la variabilidad del viento. Sin embargo, en lo que respecta al sesgo y al error de amplitud, el modelo con resolución de 5 km presentó un ajuste ligeramente superior en algunos casos específicos, lo que indica que ciertos aspectos del patrón del viento podrían estar mejor representados en la configuración menos fina, dependiendo del punto de observación.

Tabla 10: Tabla resumen con estadísticos utilizados para evaluar la temperatura del aire a 2 metros, en los escenarios de 5 km y 3 km. En verde se destaca el mejor valor según el estadístico.

	Coef. De correlación		Amplitud		Sesgo		RMSE	
	5km	3km	5km	3km	5km	3km	5km	3km
ACS43A	0.58	0.62	0.94	0.98	-0.05	0.09	2.98	2.85
ACS50B	0.58	0.59	0.85	1.17	0.32	1.38	2.02	2.68
GAM	0.55	0.63	0.84	0.78	-1.11	-0.69	2.39	2.02

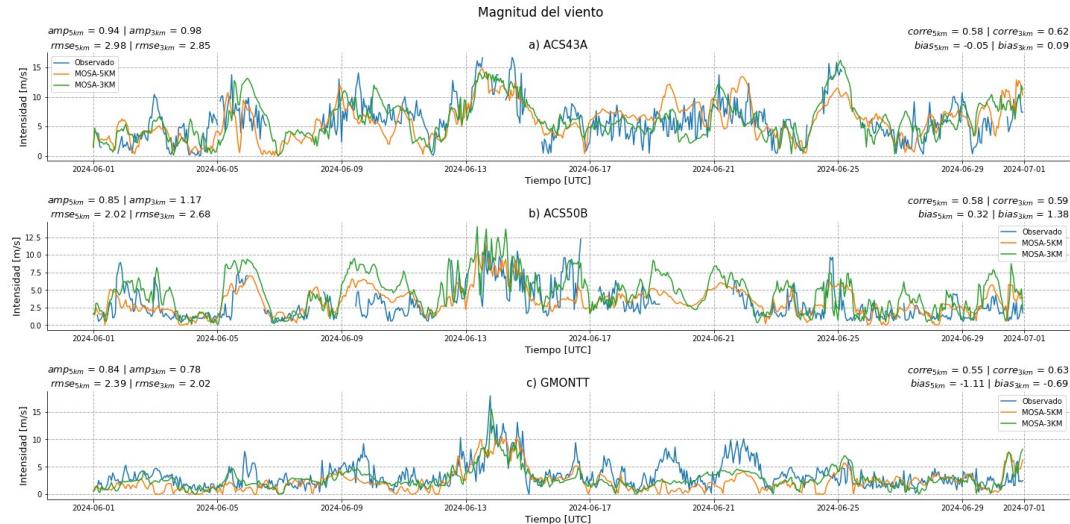


Figura 48: Evaluación de la Magnitud del viento para los escenarios de 5 km y 3 km con datos observados para la ACS43A (a), ACS50B (b) y Golfo Almirante Montt (c).

La comparación de la temperatura del aire a 2 m (**Figura 49, Tabla 11**) favoreció claramente al escenario de 3 km como el más consistente. En términos de amplitud, sesgo y RMSE, al menos dos de las tres estaciones evaluadas mostraron un desempeño superior con esta configuración en comparación con el dominio de 5 km. Aunque la correlación resultó ligeramente mejor para el modelo de 5 km en dos estaciones, la estación ACS50B destacó de manera notable, en este caso, todos los indicadores estadísticos respaldaron al escenario de 3 km como el de mejor ajuste frente a las observaciones.

Tabla 11: Tabla resumen con estadísticos utilizados para evaluar la temperatura del aire a 2 metros, en los escenarios de 5 km y 3 km. En verde se destaca el mejor valor según el estadístico.

	Coef. De correlación		Amplitud		Sesgo		RMSE	
	5km	3km	5km	3km	5km	3km	5km	3km
ACS43A	0.82	0.80	1.02	1.02	-0.92	0.7	1.37	1.29
ACS50B	0.70	0.73	1.17	0.95	-2.06	0.58	2.48	1.29
GAM	0.81	0.78	0.87	0.84	-0.19	-0.04	1.7	1.83

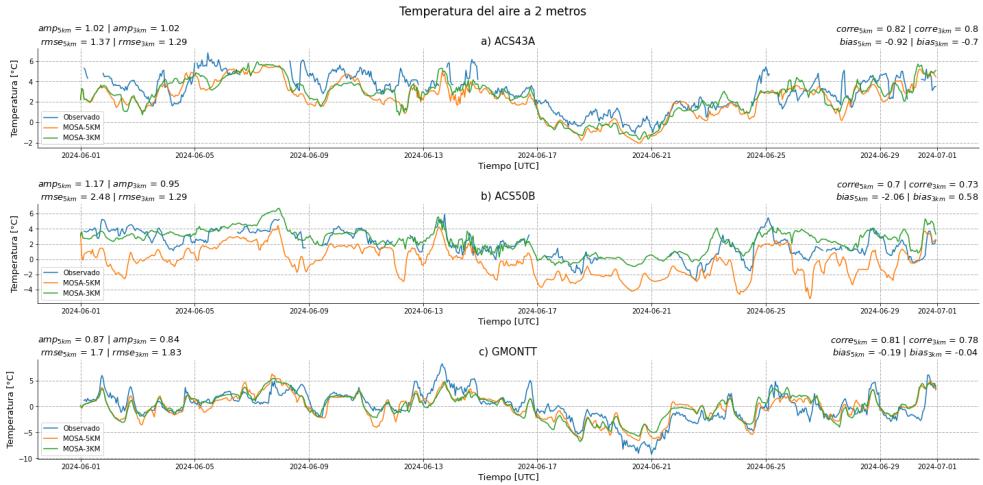


Figura 49: Evaluación de la temperatura del aire a 2 metros para los escenarios de 5 km y 3 km con datos observados para la ACS43A (a), ACS50B (b) y Golfo Almirante Montt (c).

Al concluir la fase inicial de evaluación comparativa, los resultados respaldan una precisión mayor del escenario de 3 km en la representación tanto de la magnitud del viento como de la temperatura del aire. Sin embargo, dicha configuración requirió un tiempo de cómputo significativamente mayor, aproximadamente siete horas por corrida, en comparación con el dominio de 5 km, que solo demandaba cerca de una hora. Dado que el modelo MW-Mag está destinado a operar en régimen diario, la operatividad se impuso un factor decisivo. Por ello, se optó temporalmente por implementar el modelo de 5 km como solución de corto plazo, garantizando pronósticos confiables dentro de los plazos requeridos. No obstante, la clara superioridad del modelo 3 km en términos de ajuste y precisión respalda su adopción futura, una vez que estén disponibles mayores recursos de cómputo, lo cual se espera lograr dentro del horizonte de este proyecto.

5.2.2.2 Evaluación del modelo en operación

Una vez establecido el esquema operativo, MW-Mag se puso en marcha con base en la configuración de 5 km de resolución espacial, con una proyección de 3 días. Este modelo se ejecuta en un computador *Intel(R) Xeon(R) Gold 5118 CPU @ 2.30GHz*, con 48 núcleos de los cuales ocupa 24 núcleos para procesar los cálculos, compartiendo los recursos con otros pronósticos operacionales del sistema, desarrollados en etapas anteriores de este proyecto. El almacenamiento necesario por cada día de pronóstico es de 3.5 GB y el modelo se encuentra operativo desde el 1 de abril de 2025, destacando un 100% de efectividad (**Figura 50**)

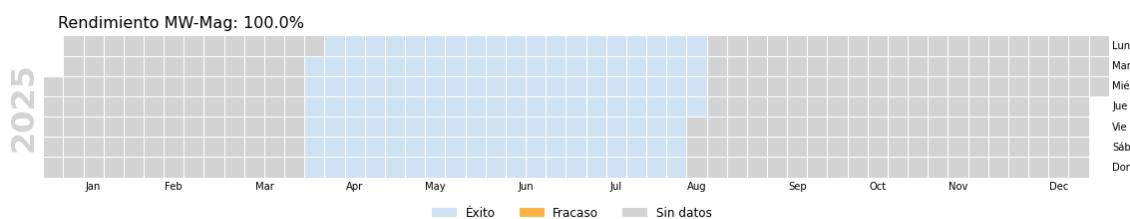


Figura 50: Rendimiento de MW-Mag durante el periodo de operación.

Su desempeño fue monitoreado frente a datos observados en la región. La evaluación operativa se enfocó en tres fuentes de observación clave: la boyas oceanográficas ACS43A junto con las estaciones meteorológicas de Golfo Almirante Montt (GAM) y Skyring (ambas parte de REDMET), evaluando los promedios diarios de la temperatura del aire a 2 metros y el viento a 10 metros.

Boyas oceanográficas/atmosféricas

Para el caso de la boyas perteneciente a la ACS43A (**Figura 51**), la temperatura presentó una buena correlación (0,84), aunque se percibió una tendencia a subestimar el promedio, con un sesgo cercano a -3 °C, lo que se reflejó también en un error significativo. Por su parte, la magnitud del viento mostró una buena correspondencia en cuanto a su variabilidad temporal (correlación de 0,79). No obstante, el modelo sobreestimó ligeramente tanto la amplitud de los vientos como su media (bias positivo), lo que se tradujo en un error moderado en la predicción de su intensidad.

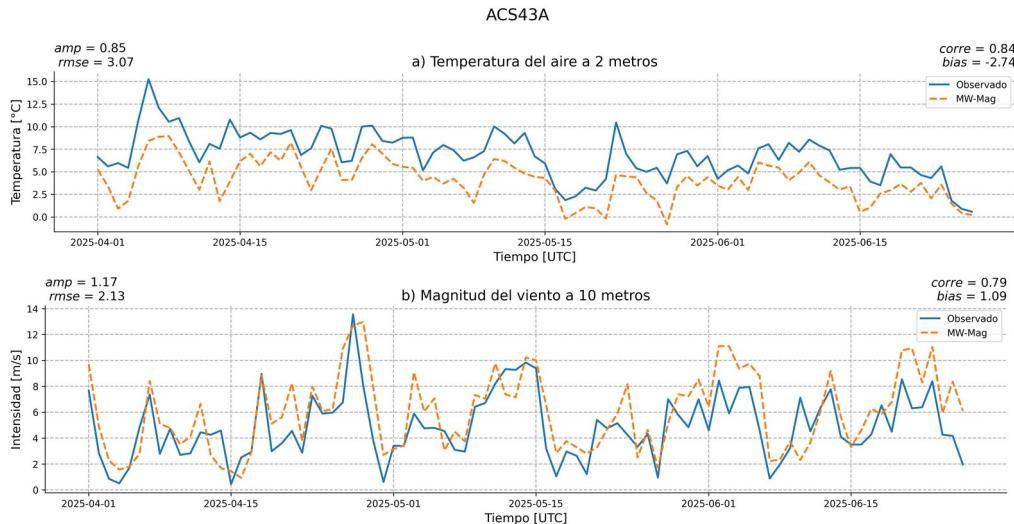


Figura 51: Evaluación de MW-Mag con datos de boyas para la temperatura del aire a 2 metros y la magnitud del viento a 10 metros.

Estaciones meteorológicas REDMET

Durante la operación del modelo MW-Mag, su desempeño en las estaciones meteorológicas GAM y Skyring reveló un comportamiento notablemente consistente para la temperatura del aire (**Figura 52**), con correlaciones elevadas (alrededor de 0.9).

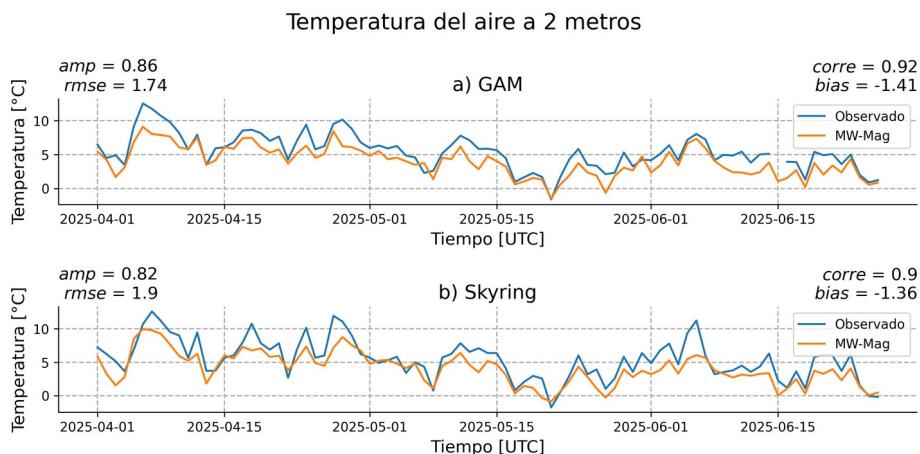


Figura 52: Evaluación de MW-Mag con datos de estaciones meteorológicas para la temperatura del aire a 2 metros.

No obstante, ambos registros indicaron una tendencia a subestimar la intensidad de las variaciones térmicas, y el modelo también fue algo más frío que las observaciones, con un sesgo negativo cercano a -1.4°C . Estos desajustes se reflejaron en un RMSE moderado, del orden de 1.8°C .

Finalmente se compararon las rosas de viento para las estaciones y para el caso de la estación GAM (**Figura 53**), donde el modelo representó con mayor acierto los vientos que provenían desde el oeste, aunque no logró reproducir una componente noreste presente en las observaciones. Además, las magnitudes máximas de viento fueron subestimadas por el modelo. En Skyring, el patrón fue similar, el modelo también resolvió mejor la dirección predominante desde el oeste, pero en esta ocasión sobreestimó la intensidad del viento. En ambas estaciones, se observa una variabilidad más amplia en los datos reales que en las salidas del modelo, lo que sugiere una menor capacidad del modelo para capturar la amplitud completa de las fluctuaciones de viento.

Comparación Rosa de Viento: Observado vs Modelado

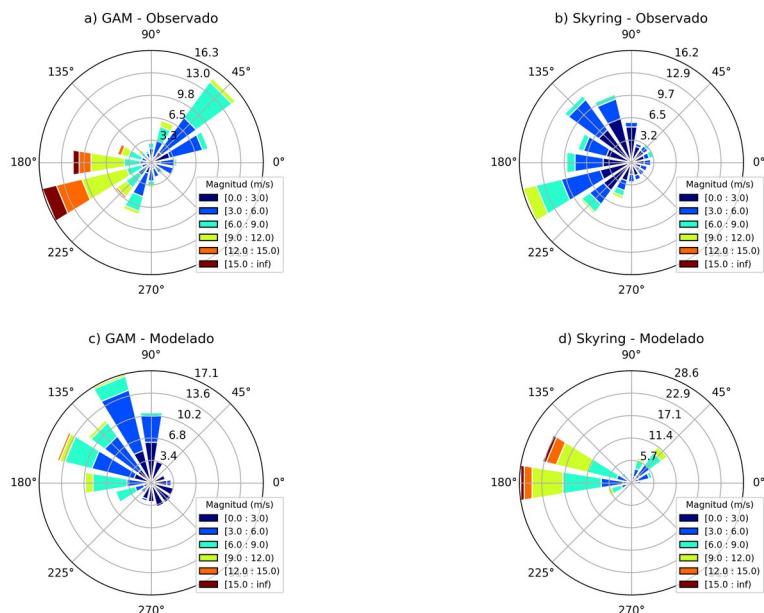


Figura 53: Comparación de rosas de viento entre MW-Mag y estaciones meteorológicas terrestres.

5.3 Resultados objetivo específico 3:

“Evaluar el modelo biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo durante los años 2018-2020”.

5.3.1 Evaluación de los años 2018-2020

5.3.1.1 Masas de agua en la boca del Guafo

En general los datos observados evidenciaron un amplio rango de salinidad (30,0–34,2) y temperatura (8,4–15,7 °C), acompañado de un marcado gradiente de oxígeno disuelto (3,8–11,2 ml l⁻¹) (ver **Figura 54**). Las diferencias interanuales se asociaron principalmente a la presencia relativa de distintas masas de agua y a la estacionalidad de los muestreos. En 2018 las mediciones realizadas en verano, mostraron una menor variabilidad de salinidad (34,2–32,3) y temperatura (8,4–12,6 °C) con bajas concentraciones de oxígeno (\approx 3,9 ml l⁻¹) asociadas a la masa de agua ecuatorial subsuperficial (AE), sin embargo se registró un predominio de la masa subantártica (ASAA, 56 %), seguida de la subantártica modificada (ASAAM, 36 %) y la AE (8 %), siendo las masas subantárticas las que presentaron los valores más altos de oxígeno (> 8 ml l⁻¹). En 2019 el rango de salinidad fue mayor (30,0–33,9), mientras que la temperatura mostró menor variación (9,7–12,6 °C); las concentraciones de oxígeno oscilaron entre 4,8 y 11,2 ml l⁻¹, coincidiendo con una mayor dispersión en el diagrama T–S atribuida al muestreo invernal y a la intensificación de la mezcla vertical. La ASAAM fue dominante (73 %), seguida de la ASAA (24 %), y en menor proporción se detectaron AE (1 %) y AE (2 %), esta última con oxígeno en torno a 4,5 ml l⁻¹. En 2020, se registraron amplios rangos de salinidad (30,1–33,9) y temperatura (9,3–15,7 °C), lo que podría estar asociado a la estratificación de la columna de agua, dado que los muestreos se efectuaron en primavera y verano. Las concentraciones de oxígeno disuelto variaron entre 3,9 y 9,7 ml l⁻¹, con una predominancia de la masa de agua subantártica modificada (ASAAM, 67 %) y de la subantártica (ASAA, 24 %), mientras que la AE y la AE representaron el 7 % y 2 %, respectivamente, siendo esta última asociada a los valores más bajos de oxígeno.

En el modelo, la distribución T–S presentó una menor dispersión que en las observaciones, con rangos de salinidad más estrechos, concentrados



principalmente entre 32,6 y 34,3, y temperaturas entre 8,2 y 14,7 °C. Las concentraciones de oxígeno disuelto se mantuvieron en un intervalo reducido (4,9–6,4 ml l⁻¹), sin reproducir los valores extremos registrados *in situ*. En 2018, el modelo representó la predominancia de la masa de agua subantártica, asociada a concentraciones de oxígeno superiores a 5 ml l⁻¹, no obstante la masa ecuatorial subsuperficial no mostró las bajas concentraciones registradas en las observaciones. En 2019, el modelo logró reproducir de manera acotada la presencia de la masa subantártica modificada y en menor medida la masa de agua AE_{SS}, aunque con una variación de salinidad limitada y sin cambios apreciables en el oxígeno disuelto. En 2020, el modelo representó únicamente la masa subantártica, con muy poca variabilidad en temperatura y salinidad, y concentraciones de oxígeno ligeramente sobreestimadas respecto a las observaciones.

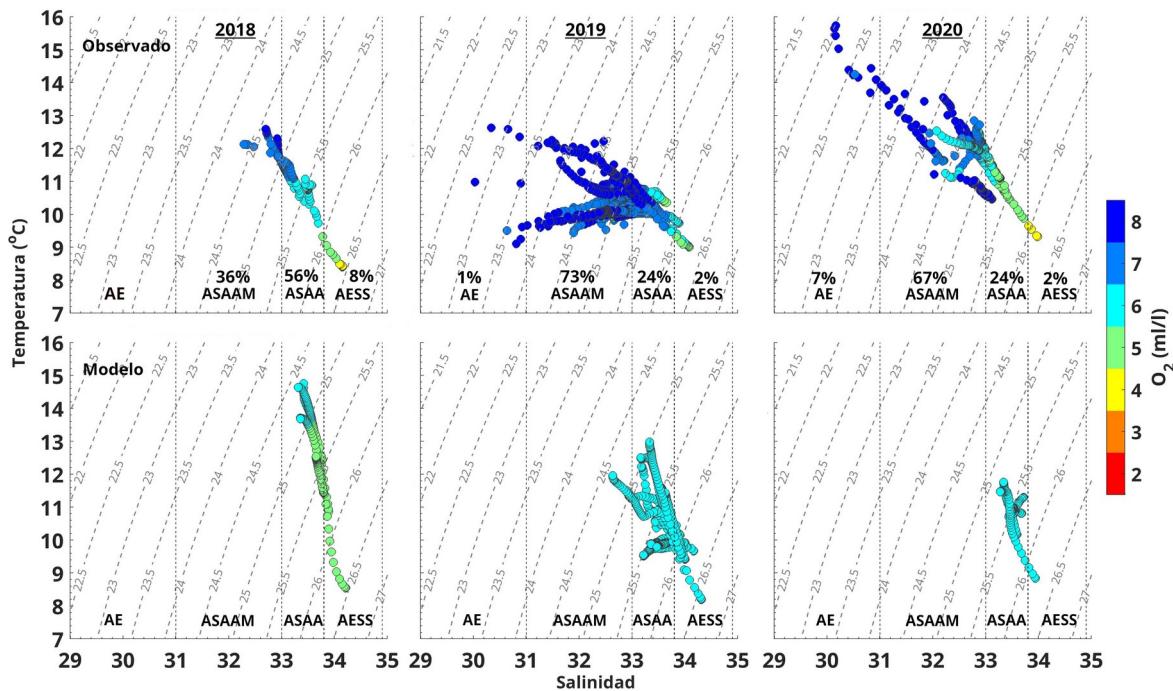


Figura 54: Diagrama de temperatura-salinidad y oxígeno disuelto (ml/l) para los años 2018, 2019 y 2020, a partir de datos observados (fila superior) y simulados por el modelo (fila inferior). Las líneas grises indican isolíneas de densidad (σ_t) y se señalan las principales masas de agua presentes en el área: Agua Estuarina (AE), Agua Subantártica Modificada (ASAAM), Agua Subantártica (ASAA) y Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS).

5.3.1.2 Clorofila superficial

En las observaciones satelitales las concentraciones más altas de clorofila se registraron principalmente en la costa oceánica de la isla de Chiloé, así como en el Golfo de Ancud, el Seno de Reloncaví y el canal Moraleda (**Figura 55**). Se evidenció una marcada variabilidad interanual, el verano de 2018 presentó las menores concentraciones y una cobertura espacial reducida, especialmente en el sector sur de la costa oceánica de Chiloé. En contraste, en 2019 se observaron las concentraciones más elevadas ($>6 \text{ mg m}^{-3}$) y la mayor extensión de áreas con alta clorofila, con focos destacados en el Golfo de Ancud y el canal Moraleda. En



2020, las mayores concentraciones se localizaron principalmente en la zona oceánica de Chiloé y en la boca del Guafo.

Las simulaciones del modelo de los distintos años reprodujeron en general un patrón similar, con las mayores concentraciones localizadas en el Seno de Reloncaví y menores valores en el Golfo de Ancud. Solo en 2018 se registraron concentraciones en el canal Moraleda. En comparación con las observaciones satelitales, el modelo mostró patrones espaciales más homogéneos y continuos, con máximos persistentes en el mar interior de Chiloé, especialmente en el Seno de Reloncaví. No obstante, las concentraciones simuladas fueron sistemáticamente inferiores a las observadas, con valores máximos cercanos a 1 mg m^{-3} , y presentaron una menor amplitud de variación interanual. En conjunto, estos resultados indican que el modelo logra reproducir la ubicación general de las zonas de alta clorofila, aunque tiende a subestimar su magnitud y a suavizar la variabilidad interanual detectada por el sensor MODIS.

5.3.2 Configuración modelo 2018

La distribución vertical y horizontal de la densidad potencial (σ_t) en parte del sector de Reloncaví durante marzo de 2018 (**Figura 56**) varió entre 20 y 26 kg/m^3 . En la zona superficial, próxima a las estaciones costeras (EST.1 y EST.2), se observan valores bajos de densidad ($\approx 22 \text{ kg/m}^3$), lo que indica la influencia de descarga de ríos, a medida que aumenta la profundidad y avanza hacia las estaciones fuera del fiordo (EST.3 y EST.4), la densidad incrementa gradualmente hasta valores cercanos a 25 kg/m^3 , reflejando una mayor homogeneidad en la columna de agua profunda.

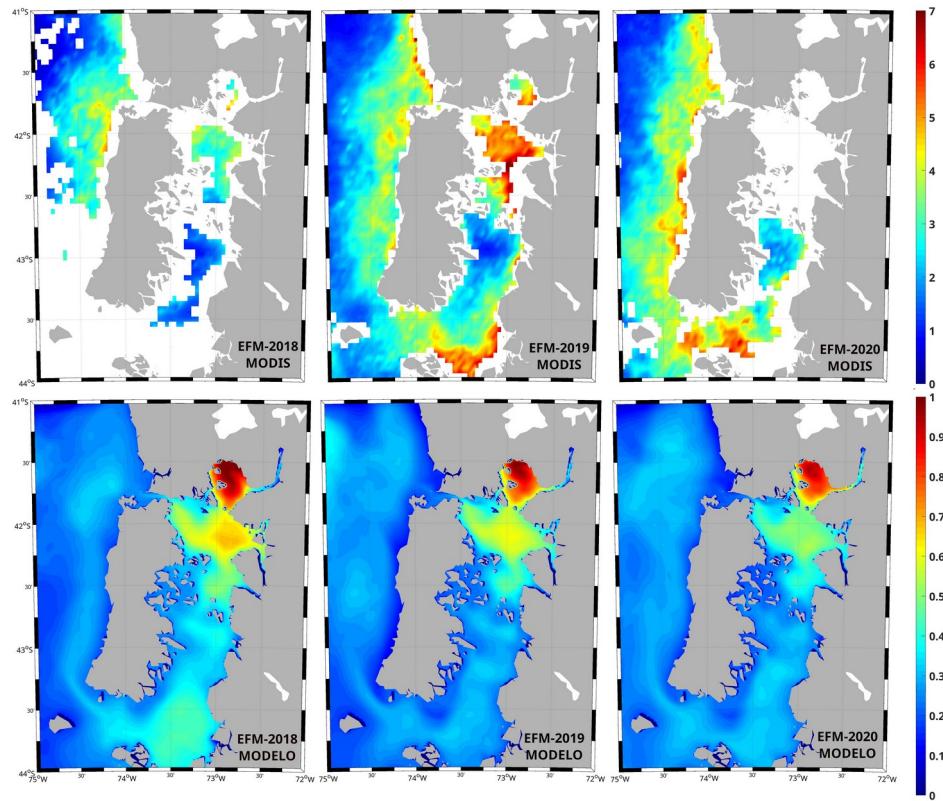


Figura 55: Distribución espacial del promedio de verano (enero-febrero-marzo) de clorofila superficial (mg m^{-3}) para los años 2018, 2019 y 2020, obtenida a partir de observaciones satelitales MODIS (fila superior) y simulaciones del modelo (fila inferior).

Las líneas de referencia indican la profundidad de la capa de mezcla: la observada (línea roja) muestra una profundidad variable entre 5 y 20 m, más somera cerca de la costa y más profunda hacia el centro del canal. La estimación del modelo SIM01 (línea morada) presentó una capa de mezcla más profunda y homogénea, cercana a 30 m en todo el transecto, sobreestimando los valores observados. Por su parte, el modelo SIM02 (línea naranja) reproduce mejor la variabilidad espacial y la tendencia de la capa de mezcla, aunque con ligeras sobreestimaciones en estaciones intermedias.

En conjunto, los resultados indican que ambos modelos capturan la estructura vertical general de la densidad, pero presentan diferencias en la estimación de la capa de mezcla, siendo SIM02 el que muestra un mayor ajuste respecto a las observaciones.

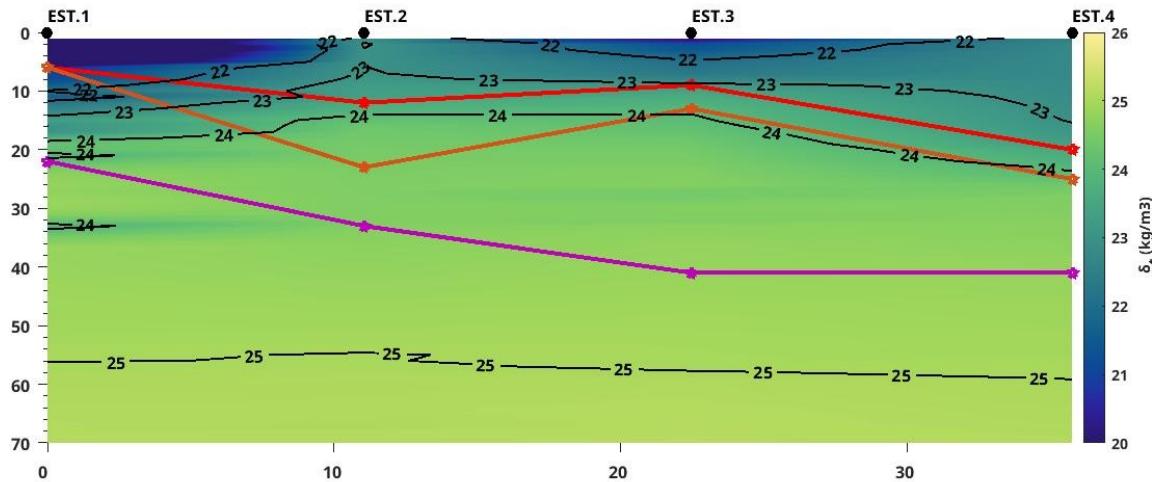


Figura 56: Distribución de la anomalía de densidad (σ -t) en el sector de Reloncaví durante marzo del 2018. Se indican las profundidades de la capa de mezcla: observada (línea roja), estimada por el modelo SIM01 (línea morada) y por el modelo SIM02 (línea naranja).

El diagrama T-S observado mostró temperaturas entre 4,1 y 13,0 °C, salinidades entre 31,1 y 34,4, y concentraciones de oxígeno disuelto que variaron de 1,4 a 9,7 ml l^{-1} . Se identificaron tres masas de agua: ASAAM, que representó el 24 % de los datos y presentó una concentración promedio de oxígeno de 5,8 ml l^{-1} ; ASAA que abarcó el 51 % de los registros con un promedio de oxígeno disuelto de 5,6 ml l^{-1} ; y AEES que alcanzó el 24 % y exhibió la mayor variabilidad térmica con un promedio de 3,5 ml l^{-1} de oxígeno disuelto (ver Figura 57).

En la simulación **SIM01**, las temperaturas oscilaron entre 2,7 y 12,5 °C, las salinidades entre 32,3 y 34,5, y el oxígeno disuelto entre 5,2 y 6,4 ml l^{-1} . Se reprodujeron las tres masas de agua, aunque con distinta representación: ASAAM (10 % de los datos) y ASAA (60 %) presentaron promedios de oxígeno de 6,3 y 6,2 ml l^{-1} , mientras que AEES (31 %) registró un promedio de 6,1 ml l^{-1} .

En **SIM02**, la temperatura vario de 2,8 a 13,1 °C, las salinidades de 31,2 a 34,5 y el oxígeno disuelto de 0,8 a 6,3 ml l^{-1} . Se mantuvieron los mismos porcentajes de representación que en SIM01, pero con concentraciones promedio



de oxígeno de $6,2 \text{ ml l}^{-1}$ en ASAAM, $6,1 \text{ ml l}^{-1}$ en ASAA y $4,3 \text{ ml l}^{-1}$ en AECC.

En términos comparativos, las simulaciones reprodujeron adecuadamente la presencia de las tres masas de agua, aunque presentaron diferencias en su representación relativa y en los rangos de temperatura y oxígeno disuelto. Tanto SIM01 como SIM02 concentraron las salinidades en un rango más estrecho que el observado; no obstante, SIM02 mostró una ligera ventaja al representar valores con salinidades más bajas. En cuanto a la variabilidad térmica, ambos modelos tendieron a subestimarla, aunque lograron reproducir el patrón general observado. La masa **ASAAM** estuvo bien representada en ambas simulaciones, tanto en el rango de salinidad como en la concentración de oxígeno disuelto. La **ASAA** apareció en una proporción mayor en los modelos respecto a las observaciones, siendo SIM02 el que replicó de forma más precisa el oxígeno asociado a esta masa. En cambio, la **AECC** presentó en los modelos menor variabilidad térmica y concentraciones de oxígeno más elevadas que las observadas, particularmente en SIM01; SIM02 reprodujo de mejor manera la amplitud térmica, aunque tendió a subestimar el oxígeno en esta masa de agua.

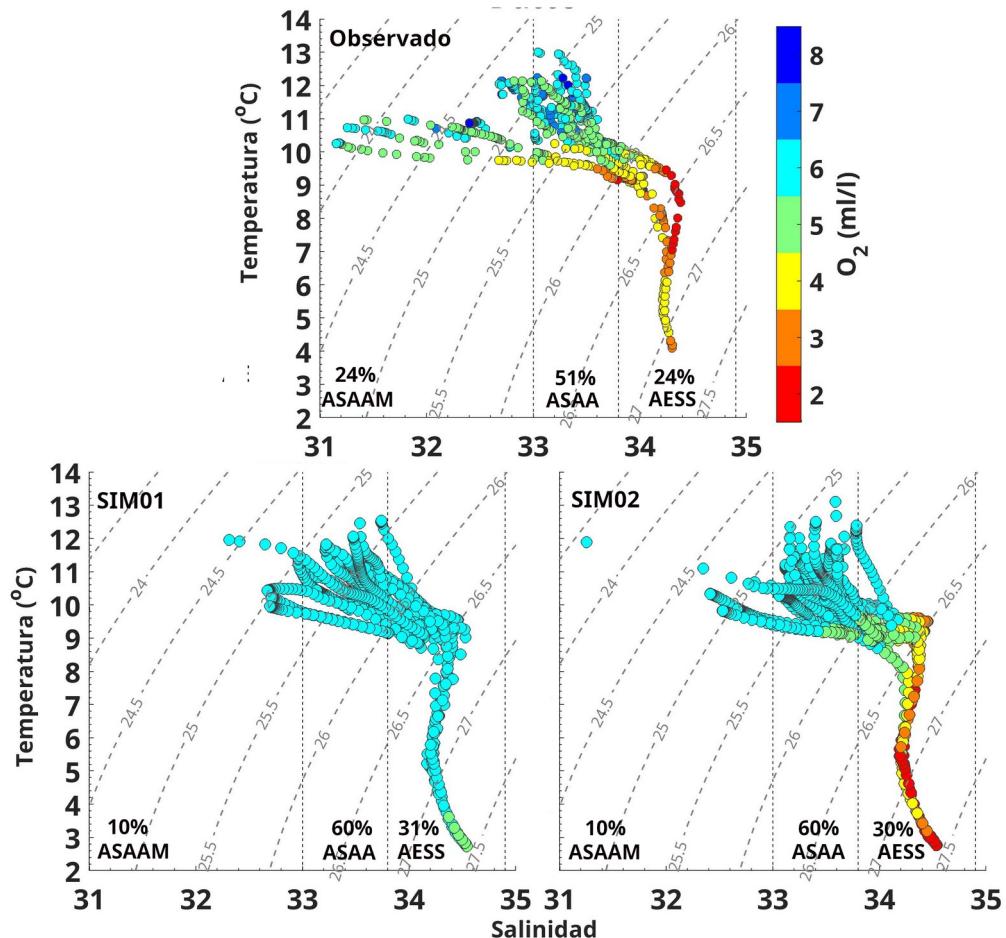


Figura 57: Masas de agua y concentraciones de oxígeno disuelto observadas en las estaciones del crucero TAITAO (noviembre de 2018), comparadas con los resultados simulados por los modelos SIM01 y SIM02, además la proporción de las distintas masas de aguas.

5.4 Resultados objetivo específico 4: Implementar Parti-MOSAv2.0 en el portal web CHONOS.

5.4.1 Desarrollo e implementación

Se implementó un modelo IBM con respuesta al medio ambiente . Para esto se escogió el código de deriva lagrangiana OpenDrift donde ha sido implementado como un modelo de deriva simple en el componente PartiMOSA de CHONOS, y con adaptaciones para representar parte del ciclo de vida algunas larvas, tales como *Caligus* y *Concholepas*. Las adaptaciones existentes permiten definir un periodo inicial de deriva libre, una fase bentónica, y una fase con migración vertical.

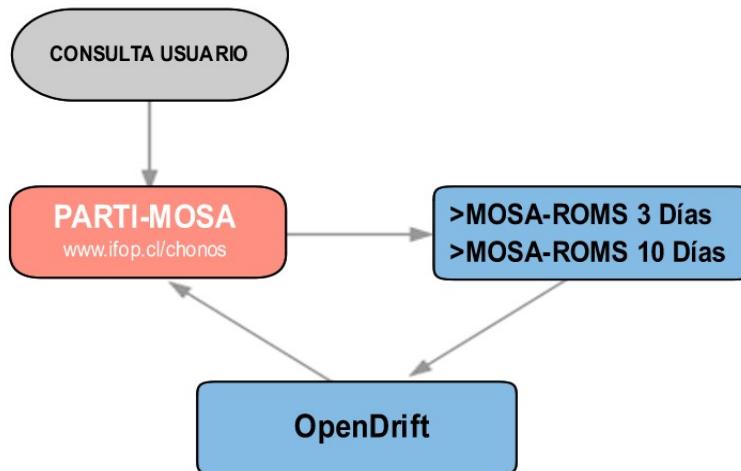


Figura 58: Diagrama de flujo de la consulta de usuario en Partimosa.



Los cambios realizados en las propiedades de las partículas y su respuesta al medioambiente existentes en el código pueden resumirse en las siguientes características :

1. Mortalidad dependiente de temperatura.

La larva presenta mortandad a temperaturas menores a 4 °C por lo que se considerá que si encuentra aguas de esa temperatura, fallece. A futuro se puede incorporar una función que simule el comportamiento de la larva, mediante el cual esta evite, dentro de las posibilidades de su movilidad, áreas con esa temperatura.

2. Mortalidad dependiente de salinidad.

La larva presenta mortandad a salinidades menores a 20 por lo que se considerá que si encuentra aguas con esa salinidad, fallece. A futuro se puede incorporar una función que simule el comportamiento de la larva, mediante el cual esta evite, dentro de las posibilidades de su movilidad, áreas con esa salinidad.

3. Respuesta a la luz solar

La larva está configurada para preferir zonas donde haya un mínimo de nivel de luz para alimentarse. Esto considerando que necesita de un nivel mínimo para alimentarse y que no es razonable configurar para que busque la zona de máxima luminosidad, puesto que esto implicaría que la larva se queda pegada en la superficie, además de que un alto nivel de luminosidad también significa una alta exposición a la depredación.

4. Velocidad de natación

Se prescribe una velocidad de natación de 0.5 mm/s. Este valor debiera ser dependiente del tamaño, y ser transformado a futuro a una velocidad en función del crecimiento.



5. Crecimiento en función de la temperatura

Siguiendo la línea de otros estudios de deriva larval (Aspin et al., 2014; Myksovoll et al., 2018) se transformó el crecimiento a unidades de grados-día (degree days), reemplazando el tiempo como medida de crecimiento. De esta forma el crecimiento de las larvas estaría en función de la temperatura de las aguas en las cuales se encuentra. Se siguió en análisis presentado en Gonzales & Carvajal (2003).

Las dos primeras características fueron pensadas en función del parásito del salmón conocido como *Caligus* (*Caligus rogercesseyi*). Para el caso del parásito *Caligus*, se definió que este muere si encuentra temperaturas menores a 4.2 °C o si encuentra valores de salinidad menores a 20 PSU (Gonzalez & Carvajal, 2003; Bravo, 2010).

Como parte de la implementación del código fue necesario modificar la estructura de los archivos NetCDF generados por el pronóstico de MOSA para que sean compatibles con las actualizaciones del código OpenDrift. Esto se debe a que la descripción de las variables que son grabadas por el código CROCO no son 100% compatibles con el standard CF (Climate and Forecast metadata) para archivos NetCDF.

En particular, las modificaciones necesarias fueron:

1. Renombrar la variable `scrum_time` a `ocean_time`
2. Modificar el atributo de la variable `ocean_time`, el cual es por defecto `seconds` a `seconds since 2000-01-01 00:00:00` 1.
3. Agregar la variable `Vstretching`. Esta fue obtenida de un archivo de condición de borde oceanográfica tipo CLM. 1.
4. También fue necesario agregar variables como latitud, longitud, y otras variables que describen la estructura de la grilla vertical como `s_rho`, `s_w`, `Cs_r`, `Cs_w`, `h`, `Vtransform`, `theta_s`, `theta_b`, `Tcline`, `hc`. Sin embargo estas variables ya estaban siendo incorporadas como parte del uso de PartiMOSA.

La necesidad de incorporar nuevas variables se debe fundamentalmente a las actualizaciones en el código de OpenDrift, que a la fecha se encuentra en la



versión 1.4.2. Estas modificaciones se hacen como parte del post-procesamiento de las salidas de MOSA y una vez realizadas, los archivos son transferidos a la interfaz.

El código fue también mejorado en los siguientes aspectos:

Se actualizó el código para ser compatible con la versión mas reciente de OpenDrift, la 1.4.2, que representó una modificación importante en la estructura de OpenDrift.

- a) Se agregaron más opciones para limpieza del código (debugging).
- b) Se cambió la librería pysolar por la librería pvlib, lo que implica que se necesitan las librerías python: pvlib, phtz, y pandas.
- c) El cálculo de la luz se hace usando la hora local de Chile como zona de referencia.
- d) Se agregaron variables a los archivos de salida, tales como temperatura, luz en superficie, luz a la profundidad de la larva, profundidad de la celda, profundidad de la larva. Otras variables pueden ser agregadas con facilidad ahora.
- e) Se agregaron varias funciones para facilitar la generación de gráficos de trayectorias y para hacer animaciones (**Figura 59**).

5.4.2 Nueva interfaz de aplicación Partimosa, portal CHONOS.

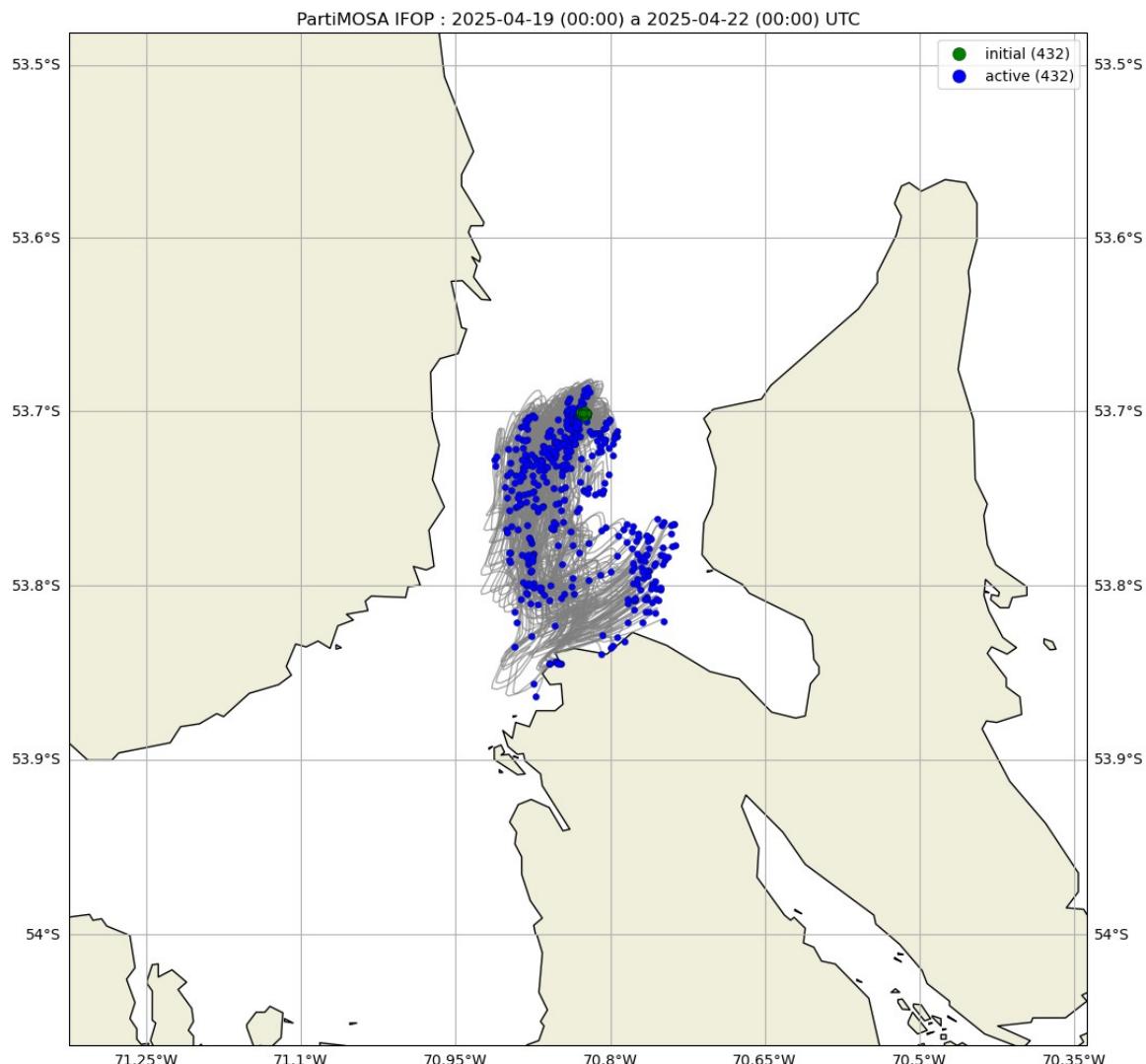


Figura 59: Nueva figura generada a través de la nueva interfaz bajo la opción "imagen png".

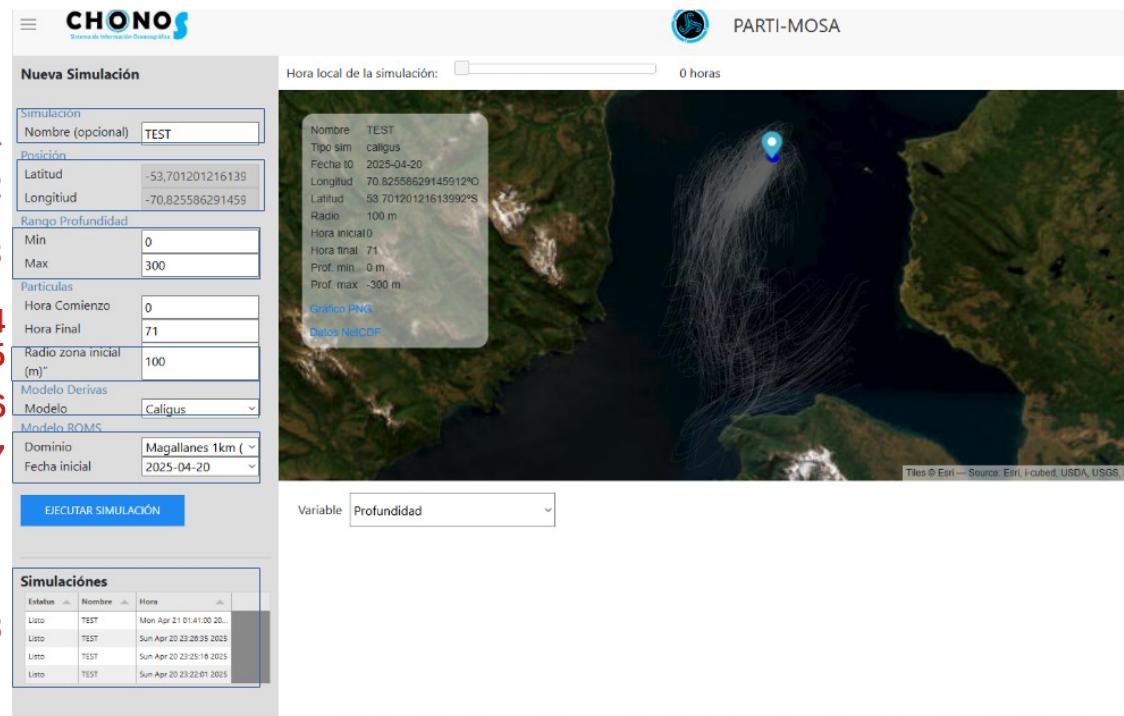


Figura 60: Nueva interfaz de PartiMOSA

La nueva interfaz de PartiMOSA (**Figura 60**) contiene las siguientes opciones

1. Opción para poner un nombre a la simulación. Útil para llamar simulaciones pasadas, las cuales se guardan de acuerdo a la IP del usuario que realiza la consulta.
2. El cursor sobre el mapa entrega la latitud y longitud exacta del punto.
3. Definir el rango de profundidades en el cual se desea iniciar la dispersión. Partimosa lanzara partículas aleatoriamente dentro de estas profundidades.
4. Las dispersiones tendrán un máximo de 72 horas (3 días) o 720 horas (10 días) dependiendo el modelo seleccionado. Las horas parten desde las 00:00 del día seleccionado.



5. Las partículas son lanzadas dentro de un radio sobre la fuente de dispersión. Se lanzarán partículas aleatoriamente dentro de este radio.
6. Se puede seleccionar el tipo de partícula, inerte o Caligus (disponible por ahora). Se espera incorporar más tipos de partículas.
7. Modelo a elegir, actualmente hay 3 modelos, Chiloé a 3 días (1km de resolución), Magallanes a 3 días (1.5 km de resolución) y Chiloé 10 días (3km de resolución).
8. Registro de las simulaciones en curso y las históricas ejecutadas con el usuario.

También se ha avanzado en la implementación de deriva de carburos. Un aspecto importante en su implementación consiste en las características del objeto que es derivado. Para ambos casos, plástico y petróleo, se trabajará con una liberación en superficie ($z = 0$) aunque eventualmente se pueden definir otras profundidades, si se simulara la ruptura de una tubería de petróleo. En el caso del petróleo al definirse que embarcaciones marinas en Chile es el Diesel, se debe definir el uso de este producto al llamar el modelo para estudiar la evolución del derrame mediante la opción

Las opciones para la implementación de deriva de plástico y petróleo existen actualmente en OpenDrift como modelos de dispersión que pueden ser cargados al llamar el modelo, por ejemplo para el caso de plástico.

```
from opendrift.models.plastdrift import PlastDrift
```

y para el caso del petróleo:

```
from opendrift.models.openoil import OpenOil
```

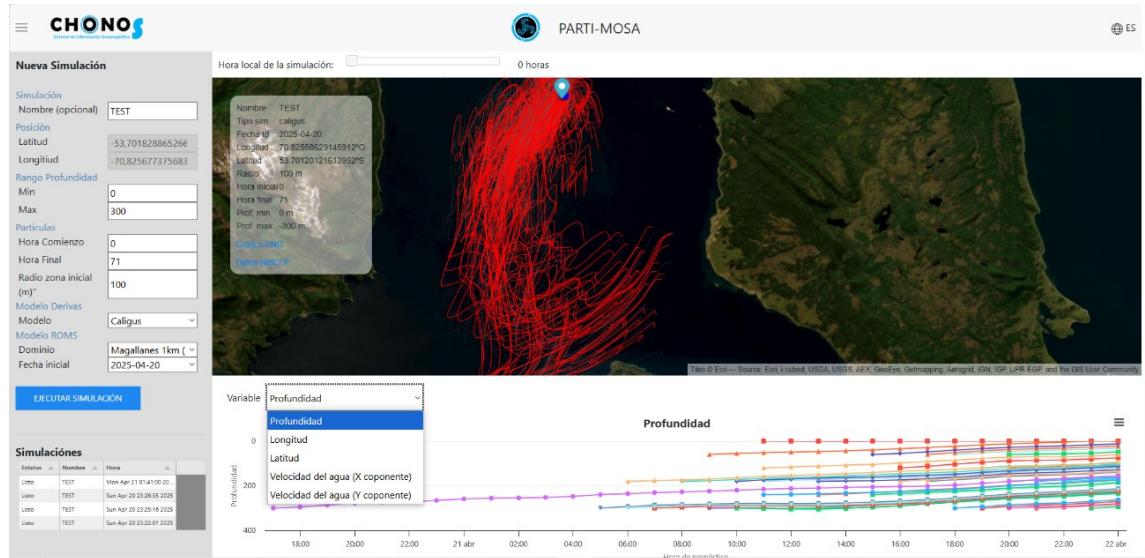


Figura 61: Despliegue de resultados en la interfaz de PartiMOSA. Notar que se pueden seleccionar trayectorias singulares y conocer su profundidad, velocidad y posición.

además se incorporo un visualizador que permite conocer los parámetros de cada trayectorias, velocidad, profundidad, y localización de cada punto. (Figura 61).

Los resultados de esta implementación nos permite proyectar diversas aplicaciones nuevas para Partimosa, tasi como también extender el catálogo de partículas disponibles, además de incorporar nuevas propiedades. Es un desarrollo que sigue en curso.



5.5 Resultados objetivo específico 5:

Diseñar modelos anidados de alta resolución espacial entre la región de Los Lagos y Magallanes y la Antártica Chilena.

En esta sección se presenta el desarrollo de los modelos anidados para MC-Patanor (dos dominios hijos: MC-Comau y MC-Quitra) y para MC-Mag (un dominio hijo: MC-GAM). El proceso metodológico incluyó varias etapas: (i) diseño y construcción de grillas con resoluciones entre 300 y 500 m, (ii) edición manual de máscara tierra–mar y batimetría, (iii) ejecución de simulaciones de prueba con duración de tres meses para verificar estabilidad, y (iv) validación del nivel del mar frente a mareógrafos locales, usando análisis armónico de constituyentes y análisis espectral de Welch.

En las **figura 62, 63 y 64** se muestran las extensiones geográficas de los dominios anidados, junto con la batimetría y máscara final utilizada en cada caso. Esta etapa fue crítica para asegurar que los fiordos y canales, caracterizados por fuertes gradientes batimétricos, pudiesen resolverse sin generar inestabilidades numéricas.

5.5.1 Configuración numérica y física

Los tres dominios anidados se implementaron con 42 niveles sigma (NEW_S_COORD), parámetros de estiramiento vertical $\theta_s = 7$, $\theta_b = 2$, $H_c = 200$ m, y un esquema de mezcla turbulenta GLS $k-\epsilon$ (GLS_KEPSILON + CANUTO_A). La integración temporal se realizó con un paso baroclínico de 30s en los padres y 10 s en los hijos, acompañado de NDTFAST = 75, lo que equivale a pasos barotrópicos efectivos de ~ 0.4 s y ~ 0.13 s respectivamente.

El forzamiento atmosférico se introdujo mediante BULK_FLUX con opciones de BULK_GUSTINESS y BULK_LW, además de correcciones superficiales (ANA_BSFLUX, ANA_BTFLUX). En cuanto a las condiciones de frontera, se emplearon esquemas abiertos para los bordes, con combinaciones de condiciones características para M2 y esquemas de Orlanski para los campos tridimensionales y trazadores. Las mareas astronómicas se incorporaron a través de SSH_TIDES, UV_TIDES y POT_TIDES, con un esquema de *ramp-up* (TIDERAMP) que evita forzamientos abruptos. Además, se activaron opciones de filtrado barotrópico

(M2FILTER_POWER) y limitación del esfuerzo de fondo (LIMIT_BSTRESS) para mejorar la estabilidad en regiones de alta pendiente.

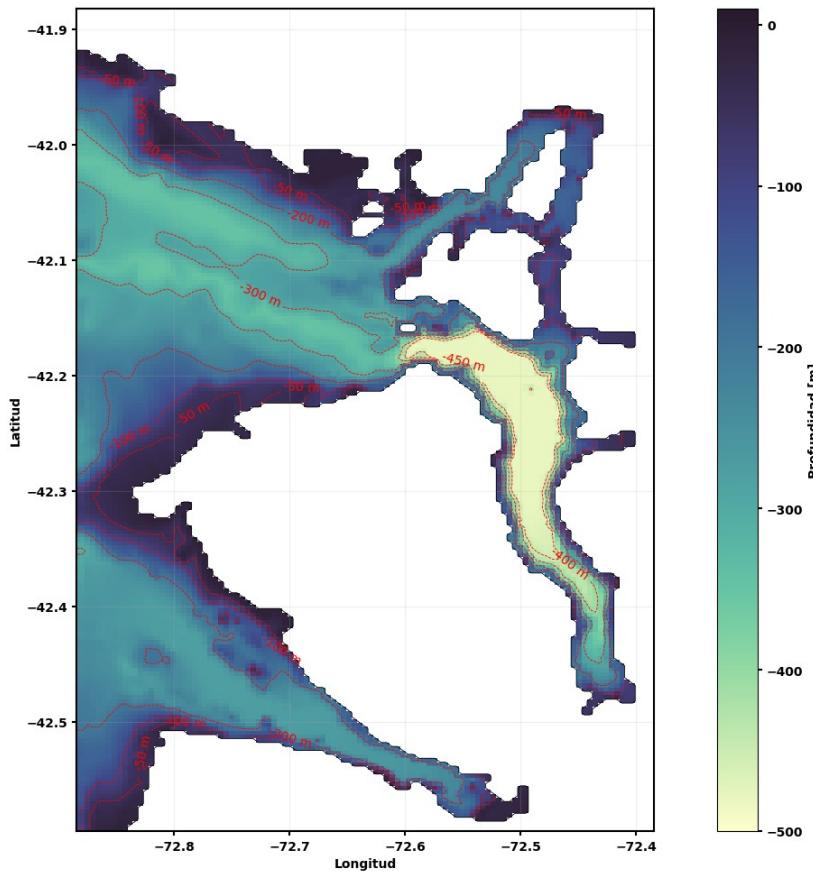


Figura 62: Máscara y batimetría del dominio del modelo anidado MC-Comau, dispuesto para los fiordos Comau y Reñihue, región de Los Lagos.

En el plano de parametrizaciones adicionales, se usaron coeficientes de fricción de fondo relativamente altos ($RDRG2 = 5.0e-3$), lo cual es coherente con fiordos angostos y topografías abruptas, y un sponge lateral con espesor de 3000m y viscosidad de 200 m^2/s , destinado a suavizar reflexiones en las fronteras abiertas. Estas decisiones fueron fundamentales para estabilizar las corridas de prueba de 3 meses y garantizar la ausencia de *blow-ups*.

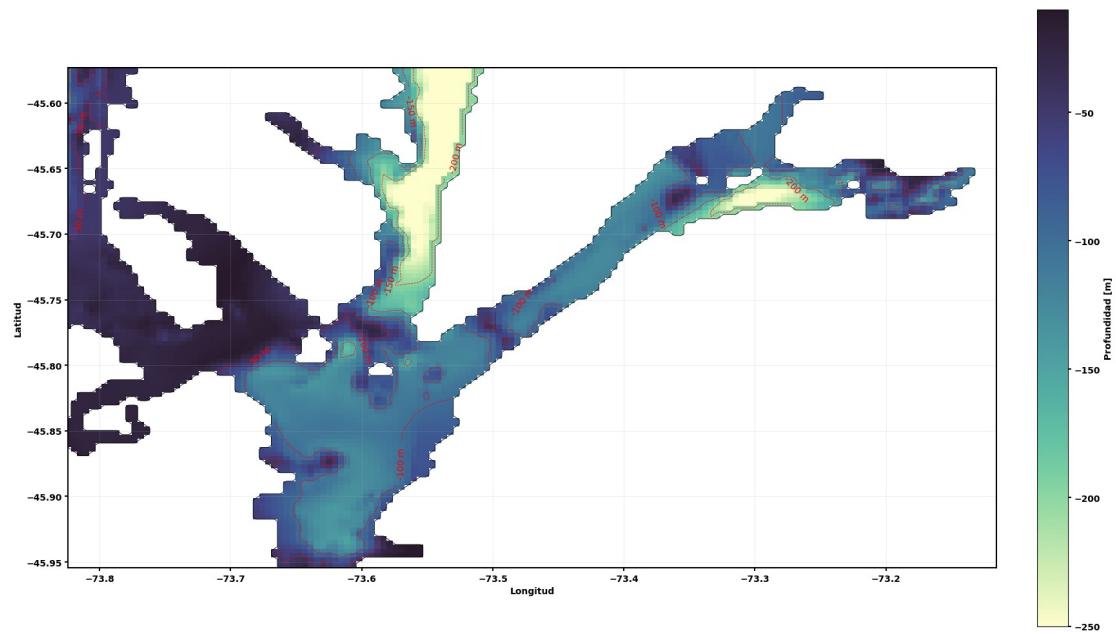


Figura 63: Máscara y batimetría del dominio del modelo anidado MC-Quitra, dispuesto para el fiordo Quintralco, región de Aysén.

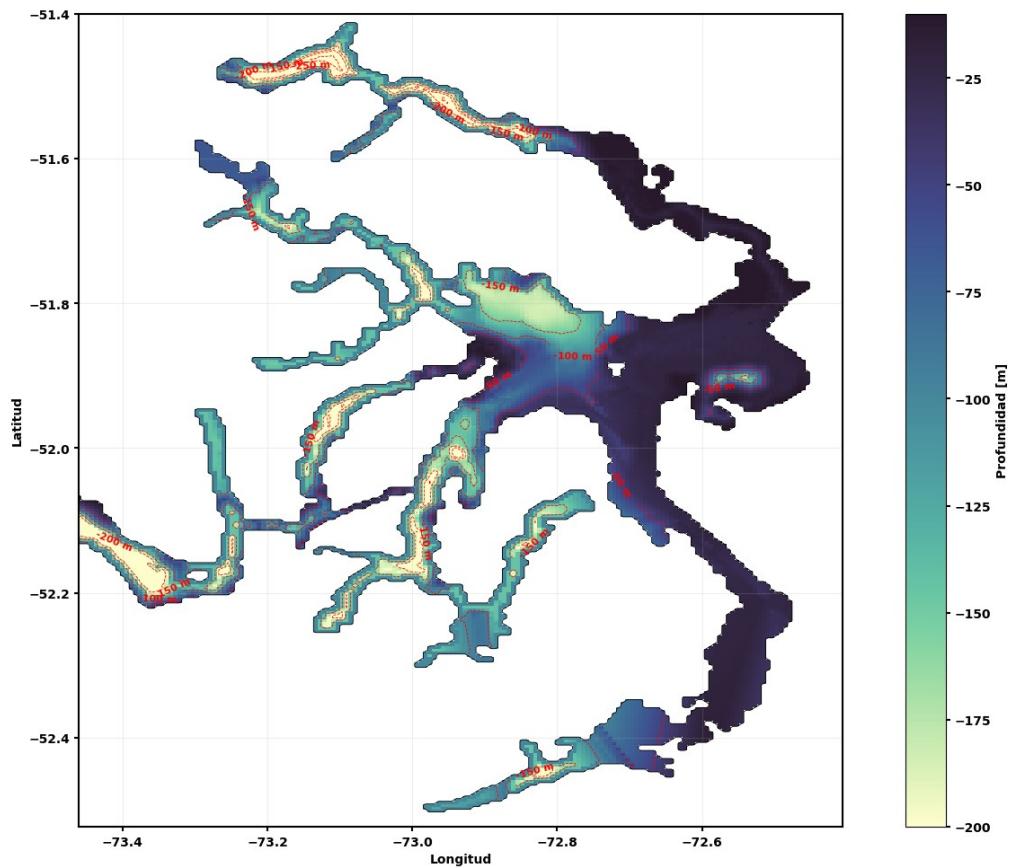


Figura 64: Máscara y batimetría del dominio del modelo anidado MC-GAM, dispuesto para Golfo Almirante Montt, región de Magallanes.



5.5.2 Evaluación nivel del mar

La evaluación de las grillas se realizó comparando el nivel del mar simulado contra observaciones de mareógrafos locales a través del análisis armónico de constituyentes, donde se descompusieron las series temporales en los constituyentes principales M2, S2, K1 y O1, evaluando amplitudes y fases en modelo y observación. Además para analizar la distribución de la varianza en las series (equivalente a la energía), se complementó con espectro de Welch. Esto se hizo calculando el espectro de potencia para cada serie temporal (modelo vs observación), mostrando que los máximos de energía se concentran en las frecuencias mareas esperadas.

5.2.2.1 Fiordo Comau, modelo MC-Comau

El análisis espectral de Welch aplicado al nivel del mar en Comau mostró una buena concordancia entre las observaciones de mareógrafo y los resultados del modelo anidado (ver **Figura 65**). En bajas frecuencias, correspondientes a escalas superiores a los diez días, el espectro del mareógrafo presentó mayor energía asociada a oscilaciones de origen meteorológico y a variabilidad submareal que no fue capturada por el modelo. Esto refleja que el anidado reproduce de manera adecuada la señal forzada principalmente por la marea, pero subestima la variabilidad de mayor periodo que depende de procesos de forzamiento atmosférico o modos internos de oscilación no resueltos, los cuales podría ser esperable producto de que estas simulaciones fueron forzadas con productos de baja resolución.

En el rango diurno, cercano a 1 ciclo por día, se observaron máximos bien definidos tanto en el mareógrafo como en el modelo, asociados principalmente a los constituyentes K1 y O1. La amplitud simulada resultó algo menor que la observada, aunque la estructura espectral general fue reproducida de manera satisfactoria. En la banda semidiurna, cercana a 2 ciclos por día, los resultados fueron aún más consistentes: tanto el mareógrafo como el modelo mostraron máximos de energía claros asociados a los constituyentes M2 y S2, con buena correspondencia en la ubicación de los picos y solo ligeras diferencias en la magnitud de la energía.

A frecuencias mayores a 3–4 ciclos por día, el espectro observado mantuvo



cierta energía residual que no aparece representada en el modelo. Esta diferencia se puede atribuir a procesos de alta frecuencia, como ondas de corta escala, seiches locales o incluso ruido instrumental, los cuales no son reproducidos en CROCO.

Por su parte el análisis armónico de las series de nivel del mar en el fiordo Comau (**Figura 65**), permitió identificar que los constituyentes semidiurnos dominan la señal mareal, siendo M2 el de mayor amplitud. Las observaciones de mareógrafo mostraron una amplitud cercana a 1.8 m para M2, mientras que el modelo CROCO reprodujo esta componente con gran fidelidad, aunque con una leve subestimación. Para los constituyentes S2 y N2 las diferencias entre modelo y observación fueron también reducidas, manteniendo una correspondencia razonable en los valores simulados. En el caso del constituyente diurno K1, tanto el mareógrafo como el modelo mostraron amplitudes menores, en torno a 0.2 m, con una coincidencia prácticamente exacta.

La distribución de la energía potencial asociada a cada constituyente refuerza este resultado. Más del 75 % de la energía mareal se concentra en el constituyente M2, seguido por S2 y N2 con aportes secundarios, mientras que K1 contribuye con un porcentaje marginal. El modelo reprodujo adecuadamente esta jerarquía, manteniendo la proporción relativa de energía en cada constituyente, aunque con ligeras diferencias en S2 y N2 respecto de las observaciones.

En general el anidado MC-Comau reproduce de manera consistente la señal mareal observada, tanto en la amplitud y distribución de energía de los constituyentes principales como en la localización espectral de los máximos diurnos y semidiurnos. Aunque subestima parte de la variabilidad submareal, su desempeño en la representación de la marea es adecuado para fines operativos.

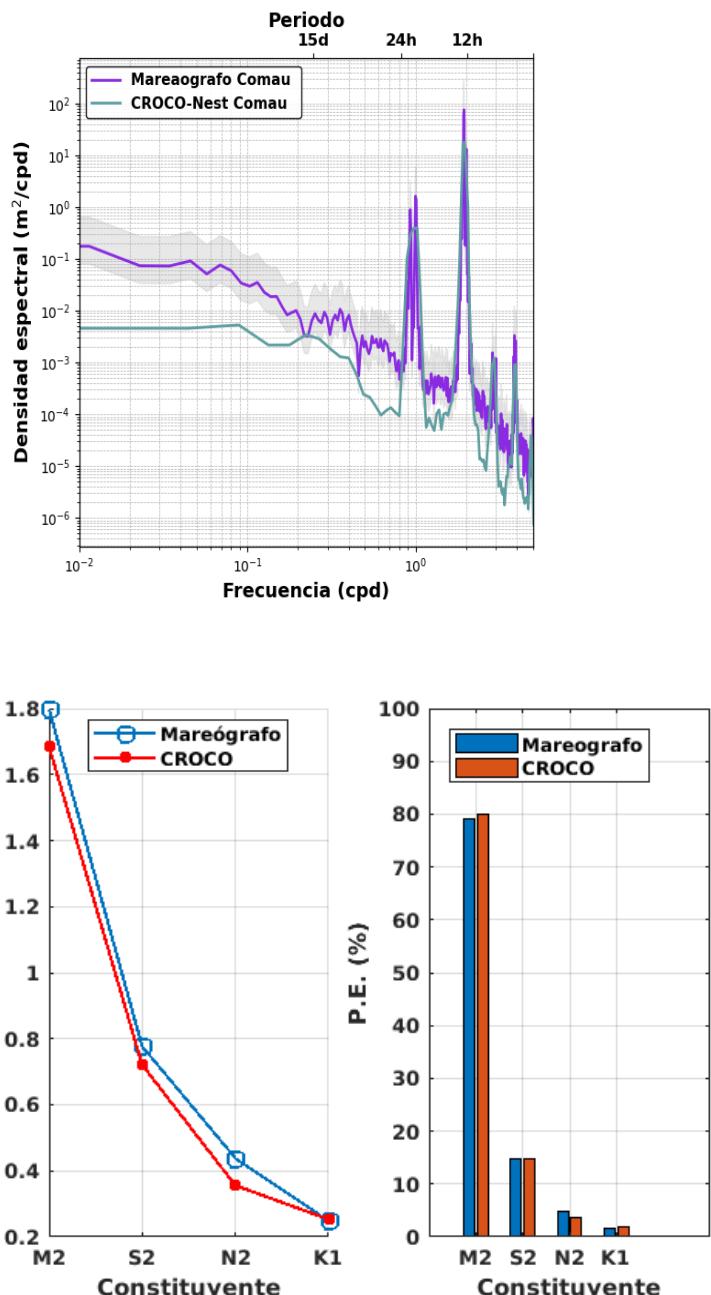


Figura 65: Arriba: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en fiordo Comau y del modelo MC-Comau. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2, N2 y K1.



5.2.2.2 Fiordo Quitraco, modelo MC-Quitra

El espectro de Welch calculado a partir de las series en el fiordo Quitraco confirma que la mayor parte de la energía se concentra en las bandas mareas diurna y semidiurna (**Figura 66**). El modelo reprodujo los máximos principales en torno a 1 y 2 ciclos por día, en correspondencia con los constituyentes K1/O1 y M2/S2. Al igual que en Comau, se observó una subestimación de la variabilidad a bajas frecuencias (< 0.1 cpd), asociadas a forzamientos meteorológicos y oscilaciones submareales que no están representadas en el modelo. En las altas frecuencias (> 3 cpd), el mareógrafo mostró energía residual no reproducida por el modelo, probablemente relacionada con procesos de corta escala o ruido instrumental.

El análisis armónico realizado en Quitraco mostró que el constituyente M2 domina la señal mareal, con amplitudes cercanas a 1.0 m en el mareógrafo y algo mayores en el modelo, lo que refleja una leve sobreestimación. Para los constituyentes S2 y N2 el modelo también reprodujo las amplitudes observadas, aunque con diferencias algo más marcadas que en Comau. En el constituyente diurno K1, tanto las observaciones como el modelo mostraron amplitudes menores, del orden de 0.2 m, con buena correspondencia.

En términos de energía potencial, más del 75 % de la energía total se concentra en M2, seguido por S2 y N2 en proporciones secundarias. El modelo representó correctamente esta jerarquía, aunque con una ligera sobreestimación de M2 y una redistribución marginal de energía hacia los constituyentes menores (**Figura 66**).

En conjunto, el modelo anidado MC-Quitra reprodujo adecuadamente la señal mareal dominante, capturando las amplitudes de los principales constituyentes y la estructura espectral en los rangos diurno y semidiurno. Aunque presenta una tendencia a sobreestimar el constituyente M2 y subestima la variabilidad de baja frecuencia, su desempeño general es satisfactorio para representar la dinámica de la marea en el fiordo Quitraco.

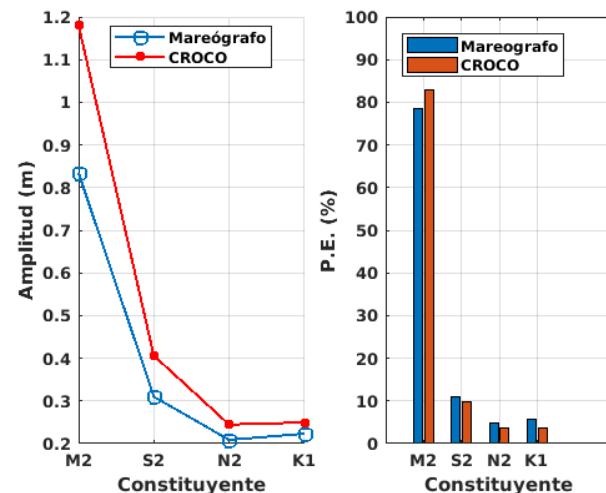
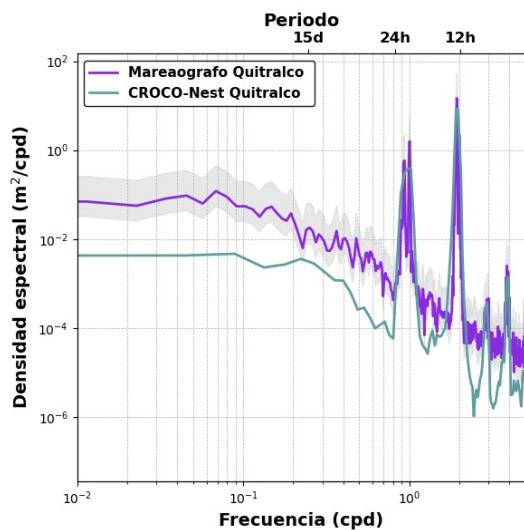


Figura 66: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en el fiordo Quitrailco y del modelo MC-Quitra. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2, N2 y K1.



5.2.2.3 Golfo Almirante Montt (MC-Gam)

Los espectros muestran que el modelo capta la señal de marea en las frecuencias principales (diurna y semidiurna), con buen ajuste en torno a los picos dominantes (M2 y K1). Sin embargo, en Puerto Natales (ubicado en el interior del Golfo), el modelo tiende a subestimar la energía en bajas frecuencias (variabilidad subinercial), mientras que en Morla Vicuña (más expuesto al océano abierto), la representación espectral es más consistente, con un mejor seguimiento de la energía observada a lo largo del rango de frecuencias. Esto refleja la mayor complejidad de reproducir condiciones forzadas dentro de un sistema semi-cerrado respecto a una zona más oceánica (ver **Figura 67**).

En ambos mareógrafos, el modelo reproduce razonablemente la importancia de M2 como constituyente dominante, aunque tiende a sobreestimar las amplitudes de los componentes secundarios (S2, N2 y K1). En P. Natales, la discrepancia es mayor, con un exceso de energía relativa en constituyentes menores, mientras que en Morla Vicuña el ajuste resulta más equilibrado, si bien aún persiste cierta sobreestimación. El reparto de energía potencial confirma esta tendencia: el modelo concentra más energía en componentes secundarios que la observada, lo que indica una transferencia interna algo sobre dimensionada.

No obstante el ajuste general del modelo es satisfactorio en la captura de los modos dominantes, pero su desempeño es más robusto en la estación exterior (Morla Vicuña) que en la interior (P. Natales). Esto resalta la necesidad de considerar procesos locales y efectos de resonancia interna para mejorar la representación en sectores más confinados.

Las tres evaluaciones muestran que los anidados son capaces de reproducir de manera consistente la señal mareal dominante (M2) y capturar los principales rasgos espirituales en las estaciones analizadas. No obstante, se observa una tendencia a sobreestimar las amplitudes de los constituyentes secundarios y a subrepresentar la energía en bajas frecuencias, especialmente en estaciones interiores como P. Natales y Fiordo Quirralco, donde la dinámica está podría estar modulada por procesos locales y resonancias internas. En contraste, en la estación más oceánica de Morla Vicuña el ajuste es más equilibrado, reflejando la mayor capacidad del modelo para reproducir condiciones de borde abiertas.

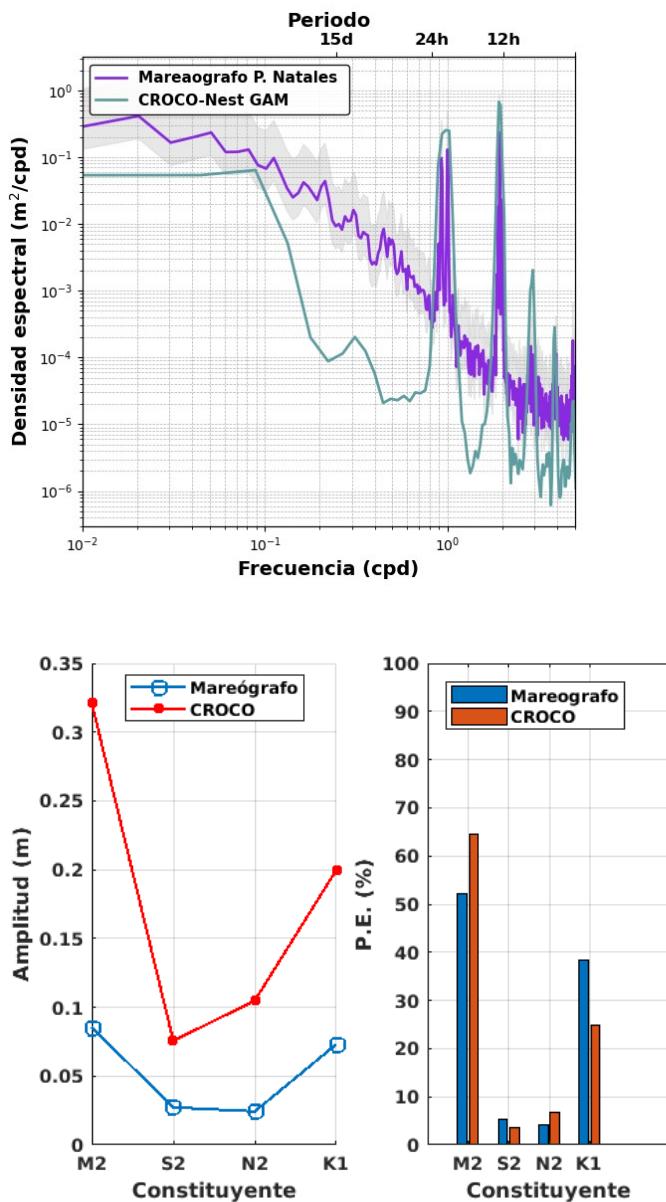


Figura 67: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en Puerto Natales y del modelo MC-Gam. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2, N2 y K1.

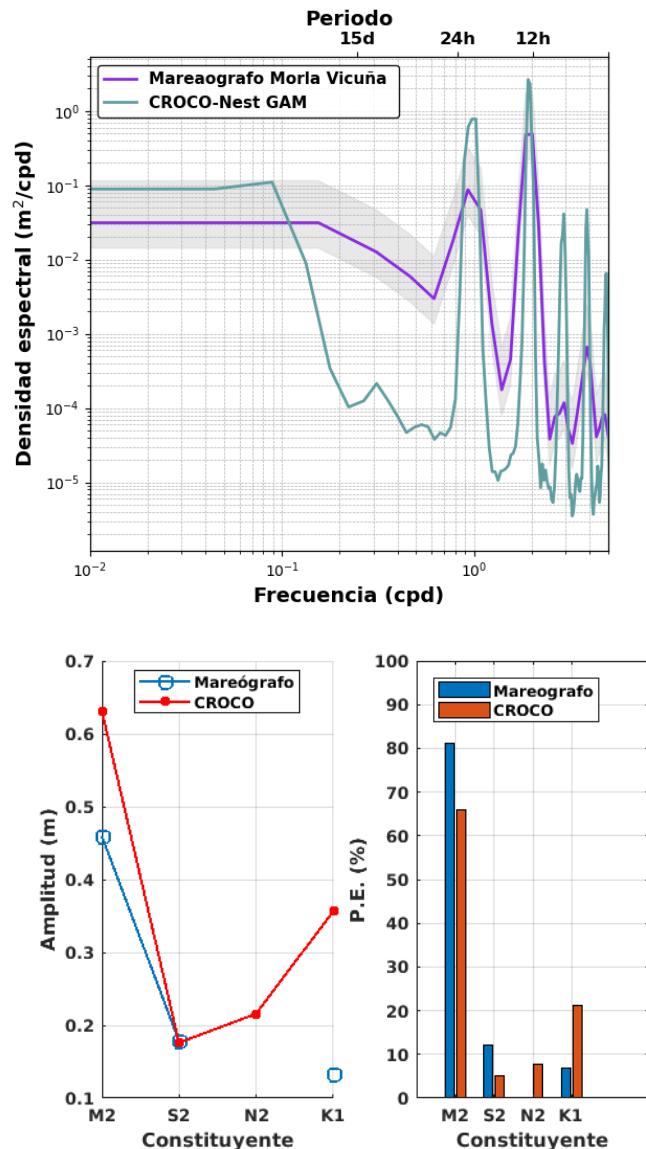


Figura 68: Espectro de Welch del mareógrafo ubicado en el paso Morla Vicuña y del modelo MC-Gam. Abajo: Amplitud y % de Energía Potencial de los 4 principales constituyentes de marea, M2, S2, N2 y K1.



6. Discusiones

6.1 Modelos operacionales en la Patagonia Norte

Este proyecto nace para cubrir la necesidad de tener información oceanográfica oportuna y operacional, que permita conocer los estados presentes y futuros del mar en Patagonia Norte. Con el tiempo el sistema se ha expandido hasta convertirse en un conjunto de modelos atmosféricos y oceanográficos, además de iniciar el camino para modelos de oleaje y modelos biogeoquímicos. Este desarrollo ha permitido no solo tener un sistema de pronósticos, si no también generar herramientas derivadas de la modelación que permiten gestionar contingencias sanitarias y/o ambientales, tales como dispersión de partículas y patógenos. En esta etapa nos hemos enfocado principalmente en los modelos oceanográficos y atmosféricos, dejando el desarrollo del modelo de oleaje para la etapa siguiente a esta, donde se espera retomar su desarrollo (presentado en la etapa anterior).

6.1.1 Modelo Oceanográfico Mc-Patanor.

Se cuenta con un modelo oceanográfico basado en CROCO denominado MC-Patanor, el cual corre diariamente de forma operacional, otorgando pronósticos para un horizonte de 3 días de diversas variables (temperatura del mar, salinidad, corrientes, nivel del mar), enfocado en Patagonia norte, especialmente en la zona de mares interiores entre las regiones de Los Lagos y de Aysén. Este sistema ha funcionado desde 2017, y desde un principio su espíritu ha sido tratar de conocer a la condición del océano más cercana a la actual y su proyección a escala sinóptica, a modo de poder otorgar información útil y oportuna a los tomadores de decisión frente a contingencias medioambientales y/o sanitarias.

La evaluación del modelo MC-Patanor revela un desempeño sobresaliente en la simulación de la TSM en la Patagonia norte, alcanzando correlaciones diarias de hasta 0.97 y errores menores a 0.5 °C. Este nivel de ajuste denota una capacidad robusta del modelo para capturar los procesos estacionales y sinópticos dominantes de la región. La disagregación entre mar interior y exterior muestra un leve deterioro en el ajuste dentro de fiordos y canales, además de sobreestimaciones puntuales en el mar interior de Chiloé (0.5–1 °C). No obstante, la



escasa disponibilidad de pixeles satelitales, la nubosidad persistente y los procesos locales de advección y mezcla limitan la calidad de las observaciones en ambientes estuarinos, lo que afecta la validación. Así, la mayor incertidumbre en fiordos refleja no solo un desafío de modelación, sino también de observación, destacando la necesidad de fortalecer redes in situ.

Las evaluación de corriente presentó un modelo coherente con la literatura para esa zona, exhibiendo una dominancia de estructuras barotrópicas y baroclínicas, así como la presencia de estructuras de 3 capas, que son características de sistemas estuarinos donde el viento es un forzante relevante (Soto-Riquelme et al, 2023). Aunque también se observó una sobreestimación de la corriente residual en el fiordo Reloncaví, lo que indica la necesidad de ajustar el esquema de mezcla vertical del modelo. Aun así, las elipses de dispersión reflejan que la corriente del modelo responde de manera satisfactoria respecto a lo observado, mostrando un fuerte alineamiento con la corriente observada.

El uso de boyas oceanográficas (ACS1 en Reloncaví y ACS10A en Chiloé) aporta un contraste valioso. En temperatura, el ajuste se mantiene alto, aunque con un leve sesgo frío superficial en Reloncaví que podría estar vinculado a procesos de estratificación intensa y flujos de agua dulce no completamente resueltos por el modelo. Sin embargo en la región es la salinidad la que domina la estratificación, la cual en líneas generales está bien representada en el modelo, exhibiendo la condición estacional esperada, con fiordos fuertemente estratificados en primavera y verano, y una condición donde predomina la mezcla vertical y un hundimiento de la picnoclina en meses de otoño e invierno. De igual modo la salinidad también muestra discrepancias notables, con correlaciones superficiales y profundas de solo 0.54–0.63 y diferencias >3 PSU en ciertos períodos. Aun así, los patrones del modelo son concordantes con la literatura que resalta la fuerte influencia de los aportes fluviales, lluvias extremas y descargas glaciares sobre la dinámica estuarina (Narvaez et al., 2019; León-Muñoz et al., 2024). Este aspecto es clave, dado que la estratificación vertical condiciona fenómenos de hipoxia y floraciones de microalgas nocivas, temas críticos en Patagonia. Mientras que el modelo logra reproducir la estacionalidad general, falla en capturar las fluctuaciones de alta frecuencia, lo que evidencia la necesidad de mejorar la representación de procesos locales de mezcla.



Modelos Anidados

El desarrollo de anidamientos de alta resolución en fiordos como Comau y Quitralco representa un avance clave para mejorar la representación de la dinámica mareal en el sur de Chile, donde la compleja topografía y la presencia de procesos locales no lineales imponen desafíos adicionales. Los resultados obtenidos muestran que el modelo reproduce con fidelidad los constituyentes dominantes (M2, S2, K1), en concordancia con estudios previos que documentan el rol preponderante de M2 en la energía mareal de la región (Narváez et al., 2019). La ligera subestimación de la variabilidad submareal y de baja frecuencia, probablemente ligada a forzamientos atmosféricos no resueltos, coincide con otros trabajos que destacan la dificultad de capturar oscilaciones meteorológicas y modos internos con forzamientos de baja resolución. En este sentido, la implementación de esquemas anidados abre la puerta a futuras simulaciones capaces de capturar procesos de meso y submesoscala, incluyendo ondas internas y resonancias locales, aspectos identificados como prioritarios para mejorar la predictibilidad en fiordos (Röhrs et al., 2023). Así, los anidamientos no solo fortalecen la capacidad operativa del sistema, sino que también proyectan su integración futura con productos de mayor resolución atmosférica y forzamientos de frontera mejorados, permitiendo representar con mayor realismo la interacción entre mareas, topografía y forzamientos externos.

Un aspecto relevante es que el sistema aún no incorpora asimilación de datos en tiempo real. Esto limita la capacidad del modelo para corregir desajustes puntuales, en particular en variables como la salinidad. No obstante, el creciente desarrollo del sistema de Centro de Datos para la acuicultura ofrece una proyección alentadora: a medida que este sistema de monitoreo alcance una madurez adecuada y una cobertura suficiente, se abrirá la posibilidad de implementar esquemas de asimilación de datos que fortalezcan la precisión de los pronósticos a través de la contención de los errores en las condiciones iniciales, lo que nos permitiría seguir el camino de experiencias exitosas en otros sistemas de altas latitudes como el Mar de Barents (Röhrs et al., 2023), el Mar Negro (Ciliberti et al., 2021) o el Norkist-800 de Noruega (Kristensen, N. M., & Gusdal, Y. (2021). Estos sistemas enfrentan retos similares a los nuestros, baja cobertura observacional y procesos locales intensos.



Los resultados sugieren que el modelo puede ser usado con confianza en monitoreo y gestión costera, aunque aun presenta cierta debilidad en salinidad, su interpretación a escalas estacionales es aceptable.

6.1.2 Modelo operacional Atmosférico, MW.Patanor.

El elevado desempeño operativo de MW-Patanor, con una disponibilidad superior al 99 % entre enero de 2024 y agosto de 2025, brinda una base sólida para analizar su comportamiento frente a observaciones y reanálisis, y confirma su valor estratégico como insumo para el modelo hidrodinámico MC-Patanor y otros productos del sistema.

En el análisis temporal con boyas, el modelo exhibe una excelente sincronía con la variabilidad térmica, reflejada en correlaciones superiores a 0.9. No obstante, tiende sistemáticamente a subestimar la amplitud de las oscilaciones térmicas. El sesgo negativo más marcado se registra en ACS34, ubicada en zona cordillerana, la cual el modelo identifica erróneamente como tierra a 75 m de altitud. Esa representación de la elevación del terreno distorsiona la simulación, eleva el sesgo térmico negativo, pero también mejora el ajuste de amplitud, probablemente por atenuar las oscilaciones reales. Por su parte, ACS1, aunque está sobre el agua, es modelada a 101 m, lo que explica aún mayores errores en amplitud y promedio. En cambio, ACS10A, ubicada en mar interior con topografía modelada plana (~18 m), muestra la menor disonancia entre amplitud y sesgo, lo que refuerza el rol de la correcta caracterización superficial para mejorar precisión. En cuanto al viento, ACS10A nuevamente sobresale con mejor correlación, menor error y amplitud más cercana a la realidad. Las otras boyas manifiestan mayor dispersión, al estar asociadas a abstracciones topográficas que alteran el flujo verdadero. Estos hallazgos coinciden con estudios que apuntan a cómo la resolución orográfica influye directamente en la representación del viento en terreno complejo (Singh et al. 2021)

Las estaciones terrestres confirman esta tendencia; Comau y Marimeli, aunque modeladas como tierra a elevaciones mayores de lo real, presentan amplitudes térmicas mejor capturadas, lo que sugiere que pequeños elevamientos pueden intensificar gradientes térmicos que el modelo reproduce con ventaja. Para la Isla Tranqui, modelada sobre agua a 4 m, el ajuste también fue aceptable, quizás debido a su entorno térmico real que facilita similar proceso. Por su parte, Melinka, ubicada correctamente en tierra a unos 52 m, y Apiao, protegida en el mar interior de Chiloé, también bien representadas altitudinalmente, mostraron



amplitudes y sesgos negativos, indicadores que se pueden atribuir a la influencia que ejerce el entorno marítimo y la exposición costera sobre el flujo térmico modelado.

En materia de viento, el modelo acertó notablemente en la dirección predominante para estaciones cordilleranas como Marimeli y Comau, aunque con menor precisión en esta última, lo que evidencia su capacidad para captar patrones direccionales generales, aunque sigue limitado para variaciones más finas, especialmente en presencia de complejas irregularidades topográficas.

La comparación espacial con el producto global ERA5 no buscó demostrar que MW-Patanor sea inferior; al contrario, muestra cómo las diferencias en resolución horizontal conducen a variaciones en el comportamiento del modelo. MW-Patanor presenta mejores correlaciones y menores sesgos en zonas de mar abierto o relieve suave, escenarios donde una mayor resolución es menos crítica, mientras que en áreas cordilleranas las correlaciones disminuyen y los sesgos se vuelven más positivos en invierno, posiblemente por inversiones térmicas que los modelos globales suavizan, y a veces negativos en verano si la radiación cálida no se absorbe correctamente (Elvidge et al. 2019). Estos contrastes reflejan cómo los ciclos térmicos de calor sensible y latente, modulados por la estación y la topografía, condicionan la representación de los procesos atmosféricos en el modelo

Finalmente, la comparación de vectores de viento en zonas cordilleranas mostró cómo MW-Patanor capta flujos canalizados por valles y canales, reproduciendo la dirección local del viento, a diferencia del reanálisis, que solo generaliza sobre la topografía suavizada. Este resultado confirma que elevar la resolución horizontal del modelo, y mejorar la reproducción del uso de suelo y topografía, permitirá capturar mejor estos procesos locales, mejorando la representación tanto de magnitud como de dirección del viento. En estudios similares en valles del Himalaya, una resolución de alrededor de 1 km fue determinante para reproducir correctamente los vientos diurnos de valle, basados en mecanismos térmicos locales (Mikkola et al. 2023, Horváth et al. 2012)

Esto refuerza la necesidad de una mayor resolución horizontal en MW-Patanor. La **Figura 69** ilustra el mapa de boyas y estaciones con su altura y máscara de tierra, comparando la malla actual de 3 km con una propuesta futura a 1 km, donde la topografía y el uso de suelo se representan con mayor fidelidad,

por lo tanto, avanzar hacia esta resolución más fina permitiría una mejor representación de temperatura, viento y procesos locales, ofreciendo mejoras sustantivas en la precisión del modelo siempre que los recursos computacionales del proyecto lo permitan.

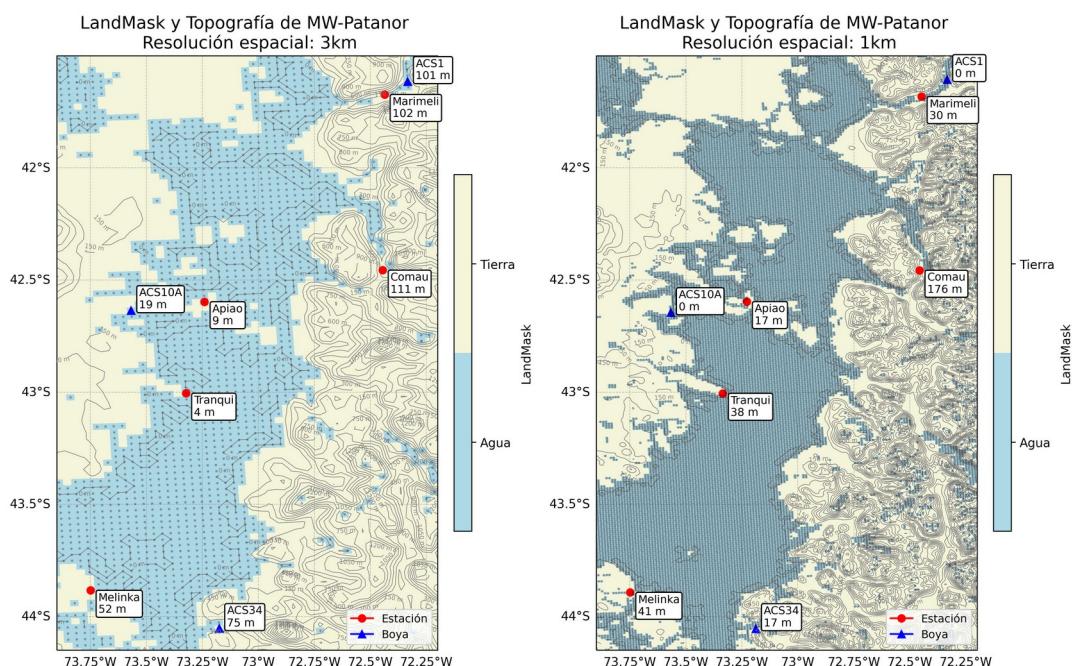


Figura 69: Mapa de la región evaluada de MW-Patanor, con mascara de tierra y topografía junto a boyas y estaciones usadas para este informe. A la izquierda se muestra la resolución actual (3km); a la derecha, la resolución propuesta más fina (1 km).

En síntesis, la implementación operacional del modelo representa un paso estratégico para Chile, dotando a la Patagonia de un sistema de pronóstico confiable y comparable con experiencias internacionales. Sin embargo, la discusión evidencia que aún persisten brechas en la representación de procesos de pequeña escala y en la disponibilidad de datos observacionales continuos, lo que resalta la necesidad de mantener un esfuerzo permanente de mejora y validación.



6.2 Modelos operacionales en Magallanes

6.2.1 Modelo Oceanográfico MC-Mag

La implementación del sistema operacional MC-Mag, forzado por el modelo atmosférico de alta resolución MW-Mag, representa un avance significativo para la predicción oceanográfica en la región austral de Chile. Magallanes es una zona caracterizada por condiciones extremas, alta variabilidad meteorológica y oceanográfica, y una fuerte influencia de glaciares, nieve e incluso hielo marino, lo que impone grandes desafíos a la modelación. En este contexto, disponer de un sistema operacional atmósfera-océano no solo mejora la capacidad de pronóstico, sino que también constituye una herramienta estratégica para enfrentar problemáticas de planificación territorial, seguridad marítima y monitoreo de ecosistemas sometidos a presiones crecientes como el cambio climático y la acuicultura.

Las evaluaciones realizadas muestran un buen desempeño general del modelo frente a observaciones satelitales y boyas oceanográficas. En términos de TSM, el dominio completo presentó una correlación de 0.95 con respecto a AVHRR, con un error <1 °C y un sesgo de -0.73 °C, indicando que el modelo tiende a ser más frío que lo observado, especialmente en verano. Al separar mares interiores y exteriores, las correlaciones se mantuvieron sobre 0.9, aunque los errores fueron mayores en el interior, revelando que los procesos locales están subestimados. En las boyas, la temperatura superficial en el Canal Unión mostró una correlación de 0.93 y un error <2 °C, mientras que en capas profundas la correlación fue menor y los errores alcanzaron 2.5 °C. Para salinidad, en superficie se observó un desempeño deficiente ($r = 0.48$, $rmse \approx 7$ PSU), aunque mejoró en profundidad ($rmse < 1$ PSU). Estos resultados confirman la necesidad de mejorar la representación de fuentes de agua dulce y su estacionalidad en MC-Mag, aspecto crítico en zonas de fiordos glaciares.

La validación de corrientes mediante ADCP en el Canal Sarmiento reveló que el modelo reproduce adecuadamente la estructura vertical estuarina, con un modo baroclínico principal que explicó el 75 % de la variabilidad frente a un 45 % observado. Este resultado, aunque positivo, indica que el modelo tiende a concentrar la variabilidad en menos modos que la realidad, lo que puede asociarse



a deficiencias en la mezcla vertical o en la representación batimétrica. Justamente, el rediseño de la grilla introdujo mejoras al cerrar la conexión occidental del Seno Skyring, lo que permitió evitar transportes espurios y mejorar la representación de la salinidad superficial. Estas correcciones son clave, dado que las características geomorfológicas controlan fuertemente la circulación en esta región (Palma et al., 2012; Brun et al., 2020).

La implementación del nuevo forzamiento atmosférico MW-Mag, basado en WRF con una resolución 5 km, se espera reduzca los sesgos de TSM y mejore la simulación de flujos de calor y radiación. La incorporación de esta forzante marca un cambio importante en la representación del balance de energía en superficie, donde se han identificado limitaciones en la simulación de nubosidad y radiación en modelos previos (Vivian Lutz et al., 2016; Linford et al., 2023).

Sin embargo, persisten limitaciones estructurales, particularmente la ausencia de asimilación de datos en tiempo real. Esto restringe la capacidad del modelo para corregir sesgos puntuales y capturar eventos extremos. Pese a ello, la expansión progresiva del Centro de monitoreo para la Acuicultura abre perspectivas alentadoras: en la medida que aumente la densidad de observaciones *in situ*, será posible implementar esquemas de asimilación que fortalezcan la precisión de los pronósticos, tal como se ha demostrado en sistemas de alta latitud como el Mar de Barents (Röhrs et al., 2023).

El anidado MC-GAM, el cual tiene una resolución horizontal de 500m y vertical de 42 niveles tipo sigma, demuestra ser una base sólida para resolver fiordos y canales de Magallanes, donde la batimetría abrupta y los pasos someros controlan la circulación y el *tidal pumping* de sal (Valle-Levinson et al., 2005). Las pruebas de 3 meses sin *blow-ups* y la validación frente a mareógrafos indican que el modelo capta bien la jerarquía mareal (M2 dominante) y localiza los máximos diurno/semidiurno en los espectros de Welch; no obstante, en Puerto Natales subestima la energía subinercial y sobreestima secundarios (S2, N2, K1), mientras en Morla Vicuña el ajuste es más equilibrado: un patrón consistente con cuencas semi-cerradas donde resonancias internas, sills y cuellos estrechos transfieren energía entre constituyentes y filtran baja frecuencia. El sesgo frío estival y la debilidad en salinidad observada en el dominio mayor (errores de hasta ~ 1 °C y > 3 PSU, respectivamente) señalan la necesidad de mejorar flujos de calor/superficie y la representación estacional de aportes de agua dulce; aquí la



nueva forzante MW-Mag (WRF 5 km) y las correcciones de máscara/batimetría (p. ej., cierre occidental de Skyring y ajuste en Beagle) deberían reducir sesgos y fortalecer la estratificación realista. En un territorio aislado y con escasez de datos *in situ*, la estrategia de *nesting* no solo eleva la habilidad para circulación local y mareas, sino que permite proyectar esquemas de asimilación que contengan errores en tiempo real y acerquen el sistema a estándares operacionales de altas latitudes (Röhrs et al., 2023).

En conjunto, MC-Mag/MW-Mag constituye un esfuerzo pionero en Chile austral. Sus resultados muestran que, aunque persisten sesgos en salinidad y subestimaciones en TSM, el modelo reproduce adecuadamente la señal estacional y la estructura de corrientes, incluso en dominios interiores complejos como el Estrecho de Magallanes. La combinación de mejoras batimétricas, fuentes de agua dulce con variabilidad estacional y forzamiento atmosférico avanzado permite proyectar una evolución positiva del sistema. Más aún, en un escenario de cambio climático que impacta fuertemente la criósfera y la circulación estuarina.

6.2.2 Modelo Atmosférico MW-Mag

La comparación entre las dos configuraciones iniciales de MW-Mag, un dominio único de 5 km frente a un anidado de 9/3 km, evidenció cómo la resolución espacial puede impactar sensiblemente la calidad del ajuste. El escenario de 3 km produjo correlaciones más elevadas y menor RMSE para la magnitud del viento en estaciones clave como ACS43A y GAM, y mostró un desempeño claramente superior en temperatura, especialmente en amplitud, sesgo y error. A pesar de ello, el dominio de 5 km resultó más eficiente computacionalmente, permitiendo corridas diarias en tan solo una hora, frente a las aproximadamente siete necesarias con la resolución fina.

Este escenario refleja una dinámica similar a la observada en MW-Patanor, donde áreas topográficas complejas mostraron buenos ajustes en fase, pero sufrían limitaciones en amplitud y sesgo, producto de detalles como altitud mal representada o simplificaciones del relieve. La literatura respalda esto: estudios en regiones montañosas, como el Himalaya, demuestran que aumentar la resolución permite capturar mejor variables como temperatura, presión, humedad y viento, reduciendo sesgos notablemente en zonas elevadas (Singh et al. 2021).

En operación, aunque MW-Mag con 5 km de resolución no alcanzó la máxima precisión técnica de la configuración de 3 km, demostró ser



funcionalmente robusto, en la boyas ACS43A replicó adecuadamente las variaciones térmicas y del viento (correlaciones alrededor de 0,84 y 0,79 respectivamente), aunque con un sesgo frío notable y una ligera sobreestimación en los vientos. En tierra, las observaciones en GAM y Skyring evidenciaron una buena correlación térmica (~0,9) y un sesgo moderadamente frío, junto con rosas de viento que, aunque captaron las direcciones dominantes, expresaron una variabilidad real más dispersa que la simulada. Frente a MW-Patanor, este desempeño confirma que la resolución de 5 km es adecuada para operar de manera diaria con resultados razonablemente acertados. El balance entre precisión y eficiencia se repite. En ambos modelos, la resolución mejorada (3 km) tiene méritos técnicos demostrables, pero imponerla en un sistema operativo diario aún depende de contar con capacidad computacional ampliada, el cual es un objetivo proyectado.

En resumen, MW-Mag con dominio de 5 km cumple sus objetivos operativos de forma eficiente y con precisión aceptable, mientras que el dominio de 3 km constituye una meta futura justificable, particularmente al considerar su potencial para mejorar la representación en zonas complejas, como ya se evidenció en MW-Patanor, si se logra ampliar la capacidad operacional.

El desarrollo de modelos operacionales en zonas costeras complejas, como los fiordos del sur de Chile, resulta fundamental para la gestión sostenible de actividades económicas y la protección ambiental. Experiencias internacionales muestran que contar con pronósticos de alta resolución permite enfrentar riesgos como marejadas, variabilidad hidrográfica y eventos extremos, además de apoyar la acuicultura y la pesca. Por ejemplo, el sistema HBM aplicado en el Limfjord de Dinamarca demostró su capacidad para entregar pronósticos de nivel del mar, salinidad y temperatura con suficiente calidad para la gestión ecosistémica y la acuicultura local (Murawski et al., 2021). De manera similar, la validación del modelo NorKyst800 en Noruega, contrastado con datos de barcos y fondeos ADCP, evidenció la utilidad de los modelos operacionales para representar corrientes costeras y, a la vez, la importancia de integrar nuevas fuentes de observación para mejorar su desempeño (Kristensen & Gusdal, 2021). En este contexto, los fiordos chilenos —caracterizados por su intrincada batimetría, alta variabilidad ambiental y fuerte interacción entre aguas dulces y marinas— requieren de capacidades equivalentes. Además, la implementación de técnicas de asimilación de datos será clave para aumentar la precisión de estos modelos.

De esta manera, un sistema de modelación operacional robusto no solo



proveerá mejores pronósticos, sino que se convertirá en una herramienta estratégica para la gestión integrada de los fiordos chilenos.

6.3 Modelación Biogeoquímica en la Patagonia.

Uno de los objetivos principales de este trabajo fue evaluar la capacidad del modelo biogeoquímico para representar la distribución espacial del oxígeno disuelto en relación con las masas de agua presentes en la Boca del Guafo. La advección de aguas oceánicas hacia el interior de fiordos y canales constituye un proceso clave para el transporte de oxígeno y nutrientes y la Boca del Guafo desempeña un papel fundamental como zona de intercambio de masas de origen oceánico. En este contexto, Sievers & Silva (2008) propusieron por primera vez un esquema de la advección y distribución de las masas de agua en los canales y fiordos de la Patagonia, identificando tres masas principales. Entre ellas, el Agua Subantártica (ASAA) con distribución desde los 50 a 200m en toda la Patagonia, se caracteriza por presentar salinidades entre 33,3 y 33,8, con concentraciones de oxígeno ($\approx 5,7 \text{ ml l}^{-1}$) y nutrientes con valores de nitrato entre 20 y 30 μM y fosfato entre 2 y 3 μM . En el interior de fiordos y canales, la ASAA se mezcla con agua estuarina, dando origen al Agua Subantártica Modificada (ASAAM).

Por su parte, el Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) se desplaza entre los hacia el sur por el canal Moraleda, ingresando al canal Jacaf y al fiordo Puyuhuapi (Pérez-Santos et al., 2014; Sievers & Silva, 2008) y se caracteriza por presentar alta salinidad ($\approx 34,9$), elevadas concentraciones de nutrientes (nitrato: 20–32 μM ; fosfato: 2,2–2,8 μM) y bajo contenido de oxígeno disuelto (2–3 ml l^{-1}). Debido a sus características de oxígeno disuelto, la AECC ha sido objeto de diversos estudios recientes. Linford et al. (2023), utilizando el modelo Mercator, identificó que estas aguas son transportadas hacia el sur por la Corriente Subsuperficial Perú–Chile (PCUC) durante todo el año en la zona costera de Chile. Además, determinaron que la PCUC alcanza la latitud de la Boca del Guafo en todas las estaciones, lo que sugiere que las aguas ricas en nutrientes y pobres en oxígeno de la ESSW pueden penetrar al mar interior cuando el flujo de intercambio en la Boca del Guafo es favorable. De forma complementaria, Mundaca et al. (2024) mediante modelación de dispersión de partículas, enfatizó que la entrada de esta masa de agua se produciría principalmente por el sector sur de la Boca del Guafo. Por su parte, Ross et al. (2025) a partir de registros de



un fondeo en la zona, documentó que la intrusión de la AESS hacia el mar interior ocurre cuando el gradiente de presión baroclínico y las condiciones de marea favorecen un flujo submareal de entrada cercano al fondo. Este flujo se intensifica durante el otoño–invierno austral (abril a septiembre) en episodios de fuerte transporte hacia el polo por la PCUC (> -3 Sv), coincidiendo con la llegada de aguas hipóxicas ($O_2 < 2$ ml l $^{-1}$). En conjunto, estos hallazgos destacan la relevancia de los procesos de advección de las masas de aguas para modular las condiciones de oxígeno en los sistemas de fiordos.

En este contexto, el modelo SIM01, evaluado para distintos años, reprodujo en términos generales las masas de agua descritas en la Boca del Guafo. El ajuste fue relativamente más consistente en 2018 que en 2019 y 2020. No obstante, se observó una mayor representación de la ASAA, lo que redujo la proporción simulada de la ASAAM, masa de agua que, según las observaciones, fue predominante en la zona. Este comportamiento podría estar relacionado con la ausencia de aporte de agua dulce en la configuración utilizada, una limitación ya identificada en la etapa previa del proyecto. Con el fin de mejorar la representación de las masas de agua, en esta etapa se incorporó la simulación SIM02, que incluyó ajustes en el esquema de mezcla y será descrita más adelante.

En lo referente a la variabilidad vertical y a las concentraciones de oxígeno disuelto, el modelo tendió a mostrar patrones más homogéneos que los observados, con valores generalmente altos y poca variación vertical. Solo en 2018 se apreció una leve variabilidad, a diferencia de 2019 y 2020, en los que la columna de agua simulada se mantuvo prácticamente uniforme, si bien este punto ya se había observado en la etapa anterior, en esa ocasión se planteó la hipótesis de que incluso después de dos años, las condiciones iniciales podían seguir influyendo limitando la propagación de las condiciones de borde. Por esta razón, si bien se consideró realizar simulaciones con un periodo de estabilización prolongado (~5 años), esta alternativa no fue factible debido a las limitaciones de recursos computacionales y tiempo de análisis. En su lugar, se optó por determinar la mejor condición inicial posible, con el objetivo de acortar el tiempo de estabilización. Bajo esta estrategia se desarrolló la simulación SIM02, con un periodo de estabilización de 1,5 años, la cual mostró una representación más realista de la variabilidad vertical del oxígeno y su relación con las masas de agua en comparación con SIM01, aunque tendió a subestimar las concentraciones de oxígeno disuelto. El análisis de esta simulación permitió, además identificar ciertos aspectos de la configuración previa que podrían haber favorecido una tendencia



de oxigenación progresiva, particularmente evidente entre 2018 y 2019 y que en SIM02 fueron ajustados, logrando una representación más acorde a las observaciones.

Otro aspecto clave fue la representación de la estratificación de la columna de agua, una característica de vital importancia en estos ecosistemas, que se distinguen por estar altamente estratificados debido a la variabilidad hidrográfica en salinidad y temperatura. La estabilidad de la columna de agua influye directamente en la composición y productividad de las comunidades fitoplanctónicas en ambientes costeros y estuarinos, afectando así los flujos biogeoquímicos (Chisholm, 1992). En este contexto, la descarga de ríos y la disponibilidad de silicato constituyen factores limitantes para el desarrollo de grandes células autótrofas, regulando la estructura y dinámica del fitoplancton en sistemas de fiordos y canales. Por ello, el estudio de la estratificación resulta esencial para comprender la productividad y el funcionamiento ecológico de estos ecosistemas. Diversos trabajos han demostrado que una fuerte estratificación — caracterizada por altas frecuencias de Brunt-Väisälä — favorece la dominancia de células autótrofas pequeñas, principalmente picofitoplancton, influenciadas por la estabilidad de la columna de agua y, en algunos casos, por concentraciones elevadas de silicato (Goebel et al., 2005; Alves-de-Souza et al., 2008). En fiordos patagónicos, el alto aporte de agua dulce y los intensos procesos de estratificación promueven la formación de capas delgadas con elevadas concentraciones de clorofila-a y un incremento relativo de nanoflagelados frente a dinoflagelados (González et al., 2010). Por el contrario, cuando la estratificación se debilita, aumenta la contribución del microfitoplancton, dominado por diatomeas formadoras de cadenas.

La estratificación también desempeña un papel central en los procesos de oxigenación, ya que favorece la separación entre aguas de fondo pobres en oxígeno y aguas superficiales bien oxigenadas. Una mayor estabilidad de la columna de agua limita la mezcla vertical y por ende, restringe la ventilación de las capas profundas. Este fenómeno, cuya intensificación se proyecta bajo escenarios de cambio climático, tiene implicancias directas en la persistencia y expansión de zonas hipóxicas.

En base a lo anterior, en esta etapa se evaluó la estratificación y se implementaron ajustes destinados a corregir la subrepresentación de aguas dulces. Las evaluaciones de los diagramas T-S de los años 2018–2020 evidenciaron una subrepresentación de las masas de agua ASAAM y estuarina



(AE), mientras que la ASAA se encontraba sobrerepresentada. Por ello, se evaluó la simulación SIM02, la cual mostró una mejora en la estratificación y en la representación de aguas dulces en comparación con SIM01; sin embargo, aún persiste cierta deficiencia en la presencia de agua dulce. En este contexto, un aspecto pendiente por explorar es la mejora en la resolución del viento. Actualmente se utiliza un producto global de baja resolución y un aumento en la resolución podría mejorar la representación de la estratificación, dado que el viento influye directamente en su intensificación o debilitamiento.

Otra evaluación realizada en esta etapa fue la estimación de clorofila superficial a partir de imágenes satelitales MODIS-AQUA con resolución de 4 km. Esta evaluación se llevó a cabo únicamente durante el verano, la estación con mayor disponibilidad de datos, lo que permitió que los promedios fueran representativos. Sin embargo, el uso de imágenes satelitales de clorofila presenta limitaciones, principalmente debido a la cobertura nubosa y a la influencia de descargas fluviales, lo que podría conducir a una sobreestimación de la señal de clorofila. Además, muchos de los algoritmos utilizados fueron desarrollados para zonas oceánicas, no costeras, donde la variabilidad de clorofila es mayor. A pesar de estas limitaciones, las imágenes satelitales siguen siendo una de las fuentes más utilizadas para evaluar la clorofila superficial, debido a su amplia cobertura espacial.

En cuanto a la evaluación del modelo, este subestimó considerablemente las concentraciones de clorofila, alcanzando como máximo $1,2 \text{ mg m}^{-3}$. No obstante, fue capaz de reproducir de manera general los patrones observados en las imágenes satelitales, con concentraciones relativamente altas en Reloncaví, el golfo de Ancud y el canal Moraleda. Sin embargo, el modelo no logró reproducir con precisión las concentraciones observadas en la costa oceánica de Chiloé. La subestimación de valores podría corregirse mediante ajustes en las parametrizaciones del modelo, específicamente en la tasa de crecimiento del fitoplancton. Cabe señalar que el modelo distingue dos grupos de fitoplancton: micro- y nanoplancton, cuyas diferencias se relacionan principalmente con la disponibilidad de silicato y utilización de amonio, de modo que el grupo de micro está mayormente representado por diatomeas. Si bien existe información limitada sobre la composición fitoplanctónica en la zona de estudio debido a su extensión, en las próximas etapas se buscará optimizar estos parámetros con el objetivo de mejorar la simulación de la clorofila y lograr que los años simulados representen de manera más los datos observados.



6.4 Mejoras portal Chonos

Uno de los productos que han dejado los programas de estudios oceanográficos ha sido la puesta en marcha del portal de información oceanográfica CHONOS (chonos.ifop.cl), el cual desde su inicio en 2018, ha presentado un desarrollo continuo en cada etapa, incorporando nuevas herramientas derivadas de la modelación, además de la disponibilidad de datos en tiempo real e históricos. Una de las aplicaciones que tuvo lugar a desarrollo en esta etapa fue PARTIMOSA, (chonos.ifop.cl/Partimosa), la cual es una herramienta que permite simular las trayectorias de partículas liberadas en un punto dado. Estas trayectorias son calculadas sobre la base de los pronósticos disponibles, lo que permite adelantarse a escenarios críticos en emergencias medioambientales y/o sanitarias, constituyéndose en una valiosa herramienta para la gestión de contingencias. En esta etapa se han incorporado aspectos de mejora de su interfaz visual, además de expandir las opciones del usuario, permitiendo elegir el tipo de partícula entre inerte y *Caliguss*, además se espera próximamente habilitar más módulos que permitan aumentar el catálogo de partículas disponibles, tales como hidrocarburos, larvas de *concholepas*, *plástico* y basuras, los cuales han sido desarrollados en esta etapa.

El portal Chonos también ha pasado a formar parte de la iniciativa de UNESCO, OceanDecade (<https://oceandecade.org/>), la cual busca promover y articular las acciones futuras sobre monitoreo y gestión de los océanos, a través de una red internacional de colaboración y desarrollo que engloba a grandes centros de investigación oceanográfica y atmosférica del mundo. Este reconocimiento nos permite seguir creciendo y proyectando nuevas herramientas por desarrollar, las cuales permitan mejorar la gestión del territorio marítimo, apoyar las contingencias y generar información que permita describir y mejorar nuestra comprensión de los procesos oceanográficos y atmosféricos de la Patagonia chilena.



7. Conclusiones

A la fecha se cuenta con 2 modelos regionales de pronósticos oceanográficos, uno para Patagonia norte (MC-Patanor) y otro para Magallanes (MC-Mag), cada modelo además cuenta con un modelo atmosférico de alta resolución utilizado para forzar la superficie del océano, pero también para generar pronósticos atmosféricos (MW-Patanor y MW-Mag).

Las evaluaciones de MC-Patanor muestra gran solidez en la simulación de TSM (correlaciones >0.95 y errores <0.5 °C), capturando con realismo la señal estacional y sinóptica regional. En fiordos y canales, el ajuste es algo menor, condicionado por limitaciones observacionales y procesos locales de mezcla. Los datos de boyas confirman buen desempeño reproduciendo correctamente la evolución de procesos sinópticos, aunque persisten sesgos fríos y discrepancias en salinidad ligadas a aportes fluviales y glaciares.

El modelo MC-Mag muestra ajustes suficientes en TSM y corrientes, aunque con sesgos fríos estacionales y debilidades en salinidad superficial, evidenciando la necesidad de mejorar la representación de aportes de agua dulce y procesos locales. Se presenta la incorporación de un nuevo modelo atmosférico MW-Mag, que se utiliza para forzar la superficie de MC-Mag.

La evaluación de MW-Patanor muestra que es altamente estable ($> 99\%$) y captura bien la variabilidad regional, aunque con limitaciones ligadas a errores de altitud en boyas y topografía compleja. MW-Mag, con malla de 5 km, logra buen desempeño en viento y temperatura, además de presentar una distribución del viento más realista que el modelo de reanálisis ERA5.

Se está desarrollando un modelo biogeoquímico que aún se encuentra en etapas de calibración. Las simulaciones de prueba (SIM01 y SIM02) muestran habilidad para reproducir las principales masas de agua, aunque resalta la necesidad de mejorar la representación del aporte de agua dulce. SIM02, con mayor spin-up y ajustes en la mezcla, logró una mejor estratificación vertical pero continuó subestimando el oxígeno. La comparación con MODIS-AQUA evidenció que el modelo reproduce los patrones generales de clorofila, aunque subestima los valores máximos en la costa oceánica de Chiloé, lo que sugiere ajustar las tasas de crecimiento del fitoplancton.



Se construyeron modelos anidados para los fiordos Comau, Quitralco en Patagonia norte y Golfo Almirante Montt en Magallanes que se espera queden operacionales dentro de los próximos meses. Las grillas presentaron estabilidad y la reproducción del nivel del mar fue satisfactoria.

Se presentó el desarrollo de una nueva versión de la aplicación Partimosa la cual incluye mejoras en el código, expansión del catálogo de partículas y una nueva y más completa interfaz gráfica.



8. Gestión del proyecto

8.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA

Estas reuniones entre el ejecutor del proyecto (División Investigación en Acuicultura, IFOP) y la contraparte 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.

Reunión de Coordinación 1

Fecha: 10 Junio, 2024.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Cristian Ruiz (IFOP)
3. Valentina Besoain (IFOP)

Reunión de Coordinación 2

Fecha: 26 Agosto, 2024.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Cristian Ruiz (IFOP)
3. Gabriel Soto (IFOP)
4. Pablo Reche (IFOP)
5. Jurleys Vellojin (IFOP)

Reunión de Coordinación 3

Fecha: 4 agosto, 2025

Lugar: Teams

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Cristian Ruiz (IFOP)
3. Gabriel Soto (IFOP)



4. J.Andrea Corredor (IFOP)
5. Jurleys Vellojin (IFOP)
6. Alejandra Oyanedel (IFOP)
7. Elias Pinilla (IFOP)

8.2 Reuniones técnico-académicas

El proyecto contempla asesorías científicas, talleres cerrados y visitas entre IFOP y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción. Estas reuniones son de carácter académico y están enfocadas a resolver problemas técnicos de la modelación y la operación del sistema.

Reunión 1

Reunión con el asesor Dr. Andres Sepulveda, para conocer el estado de la asesoría y conocer los resultados y desafíos presentes en el desarrollo de MOSA-WW3 y mejoras en el código de PartiMosa.

Fecha: 18 Marzo, 2024.

Lugar: Google-Meet

1. Cristian Ruiz (IFOP)
2. Andres Sepulveda (Universidad de Concepción)
3. Sergio Bahamondez (Universidad de Concepción)

Reunión 2

Reunión con el asesor de desarrollo del portal CHONOS, Meteodata, para analizar la implementación de los nuevos desarrollos en el portal.

Fecha: 20 Marzo, 2024.

Lugar: Google-Meet

1. Mark Falvey (Meteodata)



2. Andres Arriagada (Metedodata)
3. Pablo Reche (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

Reunión 3

Reunión con el asesor de desarrollo del portal CHONOS, Metedata, para analizar la implementación de los nuevos desarrollos en el portal.

Fecha: 23 Septiembre, 2024.

Lugar: Teams

1. Dr. Andres Sepulveda (UdeC)
2. Cristian Ruiz (IFOP)

8.3 Carta Gantt del proyecto

El proyecto tiene una duración total de 20 meses, comenzando en enero del 2024 y finalizando en agosto del 2025.

Actividades	E24	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E25	F	M	A	M	J	J	A
1. Evaluación MC-Patanor v/s observaciones	x	x	x	x				x	x				x	x	x	x	x	x	x	x
2. Calibrar y validar MC-Mag v/s observaciones	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x							
3. Evaluación modelo biogeoquímico								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4. Implementación PartiMOSA v2.0									x					x						
5. Dominio modelos anidados								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
6. Corridas de pruebas									x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
7. Taller difusión																			x	
8. Documento de avance 1							x													
9. Documento de avance 2														x						
10. Informe final																			x	



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO / DIVISIÓN INVESTIGACIÓN ACUICULTURA

8.4 Adquisición de nuevos servidores

Actualmente se encuentra en proceso de licitación la compra de 2 servidores, uno de cómputo para reforzar modelaciones climatológicas y otro para renovar el servidor web que alberga el portal CHONOS.



9. Referencias bibliográficas

- Alves-de-Souza, C., González, M. T., & Iriarte, J. L. (2008).** Functional groups in marine phytoplankton assemblages dominated by diatoms in fjords of southern Chile. *Journal of Plankton Research*, 30, 1233–1243. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbn079>.
- Antonov, J. I., Seidov, D., Boyer, T. P., Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Garcia, H. E., & Johnson, D. R. (2010).** World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity, NOAA Atlas NESDIS 69. S. Levitus (Ed.), 184.
- Arakawa, A., & Lamb, V. R. (1981).** A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations. *Monthly Weather Review*, 109(1), 18-36.
- Asplin, L., Boxaspen, K., & Sandvik, A. D. (2004).** Modelled distribution of salmon lice in a Norwegian fjord. ICES.
- Aumont O., & Bopp L. (2006).** Globalizing results from ocean *in situ* iron fertilization studies. *Global Biogeochem. Cycles* 20, GB2017. doi:10.1029/2005GB002591.
- Aumont, O., Ethe, C., Tagliabue, A., Bopp, L., & Gehlen, M. (2015).** Pisces-v2: An ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development*, 8, 2465-2513. doi:10.5194/gmd-8-2465-2015.
- Avila, 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.
- Baldrich, Á. M., Díaz, P. A., Rosales, S. A., Rodríguez-Villegas, C., Álvarez, G., Pérez-Santos, I., & Reguera, B. (2024).** An unprecedented bloom of oceanic dinoflagellates (*Karenia* spp.) inside a fjord within a highly dynamic multifrontal ecosystem in Chilean Patagonia. *Toxins*, 16(2), 77.
- Bravo, S. (2010).** The reproductive output of sea lice *Caligus rogercresseyi* under controlled conditions. *Experimental parasitology*, 125(1), 51-54.
- 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*, 237, 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.



Buchanan, P. J., & Tagliabue, A. (2021). The regional importance of oxygen demand and supply for historical ocean oxygen trends. *Geophysical Research Letters*, 48. doi:10.1029/2021GL094797.

Chisholm, S. W. (1992). Phytoplankton size. In *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea* (pp. 213–237). Plenum Press.

Ciavatta, S., Kay, S., Saux-Picart, S., Butenschön, M. and Allen, J.I., (2016). Decadal reanalysis of biogeochemical indicators and fluxes in the North West European shelf-sea ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(3), pp.1824-1845. Devlin, M. J., Prins, T. C., Enserink, L., Leujak,

Ciliberti, S. A., Grégoire, M., Staneva, J., Palazov, A., Coppini, G., Lecci, R., ... & Agostini, P. (2021). Monitoring and forecasting the ocean state and biogeochemical processes in the black Sea: Recent developments in the Copernicus marine service. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1146.

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.

Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., and Ådlandsvik, B.: OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling, (2018). Geosci. Model Dev., 11, 1405-1420, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>, 2018.

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.

Dréville, 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.

Elvidge, A. D., Vosper, S. B., Yates, D., Kent, J., Smith, R. N. B., & Marshall, D. (2019). Uncertainty in the representation of orography in weather and climate models and implications for parameterized drag. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11, 4572–4598.



GEBCO Compilation Group, (2020). GEBCO 2020 Grid (doi:10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9).

Goebel, N. L., Wing, S. R., & Boyd, P. W. (2005). A mechanism for onset of diatom blooms in a fjord with persistent salinity stratification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 64, 546–560. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.03.015>

Gómez-Fontalba, C.; Flores-Aqueveque, V.; Alfaro, S.C. (2022). Variability of the Southwestern Patagonia (51°S) Winds in the Recent (1980–2020) Period: Implications for Past Wind Reconstructions. *Atmosphere*, 13, 206.

González, H. E., Calderón, M. J., Castro, L., Clement, A., Cuevas, L. A., Daneri, G., Iriarte, J. L., Lizrraga, L., Martínez, R., Menschel, E., Silva, N., Carrasco, C., Valenzuela, C., Vargas, C. A., & Molinet, C. (2010). Primary production and plankton dynamics in the Reloncaví Fjord and the Interior Sea of Chiloé, Northern Patagonia, Chile. *Marine Ecology Progress Series*, 402, 13–30. <https://doi.org/10.3354/meps08360>

González, L., & Carvajal, J. (2003). Life cycle of *Caligus rogercresseyi*, (Copepoda: Caligidae) parasite of Chilean reared salmonids. *Aquaculture*, 220(1-4), 101-117.

Hersbach, H., de Rosnay, P., Bell, B., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., & Zuo, H. (2018). Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP.

Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.

Horváth, K., Koracin, D., Vellore, R., Jiang, J., & Belu, R. (2012). Sub-kilometer dynamical downscaling of near-surface winds in complex terrain using WRF and MM5 mesoscale models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D11). <https://doi.org/10.1029/2012JD017432>.

Iriarte, J. L., Pantoja, S., & Daneri, G. (2014). Oceanographic processes in Chilean fjords of Patagonia: from small to large-scale studies. *Progress in Oceanography*, 129, 1-7.

Kristensen, N. M., & Gusdal, Y. (2021). NorKyst800 model currents validation. *MET Report*, (2/2021), Norwegian Meteorological Institute, 44.

Large, W. G., & Gent, P. R. (1999). Validation of vertical mixing in an equatorial ocean model using large eddy simulations and observations. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 449–464.

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.

León-Muñoz, J., Aguayo, R., Corredor-Acosta, A., Tapia, F. J., Iriarte, J. L., Reid, B., & Soto, D. (2024). Hydrographic shifts in coastal waters reflect climate-driven changes in hydrological regimes across Northwestern Patagonia. *Scientific Reports*, 14(1), 20632.

Levitus, S., Locarnini, R. A., Boyer, T. P., Mishonov, A. V., Antonov, J. I., Garcia, H. E., & Seidov, D. (2010). World ocean atlas 2009.

Linfold, P., Pérez-Santos, I., Montes, I., Dewitte, B., Buchan, S., Narváez, D., (2023). Recent deoxygenation of Patagonian fjord subsurface waters connected to the Peru–Chile undercurrent and equatorial subsurface water variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2022GB007688. <https://doi.org/10.1029/2022GB007688>

Lutz, V., Frouin, R., Negri, R., Silva, R., Pompeu, M., Rudorff, N., & Martinez, G. (2016). Bio-optical characteristics along the Straits of Magallanes. *Continental Shelf Research*, 119, 56-67.

Marín, V. H., & Campuzano, F. J. (2008). Un modelo hidrodinámico barotrópico para los fiordos australes de Chile entre los 41 °S y los 46 °S. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 31(2), 125-136.

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.

Mikkola, J., Sinclair, V. A., Bister, M., & Bianchi, F. (2023). Daytime along-valley winds in the Himalayas as simulated by the Weather Research and Forecasting (WRF) model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 821–842. <https://doi.org/10.5194/acp-23-821-2023>

Mundaca, V., Echevin, V., Vergara, O. A., Artal, O., & Sepúlveda, H. H. (2025). Dynamics of the subtidal transport through the Guafó Mouth connecting the open ocean and the Chilean Inland Sea in southern Chile. *Continental Shelf Research*, 288, 105428. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2025.105428>.

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.

Myklevoll, M. S., Sandvik, A. D., Albretsen, J., Asplin, L., Johnsen, I. A., Karlsen, Ø., ... & Ådlandsvik, B. (2018). Evaluation of a national operational salmon lice monitoring system—From physics to fish. *PLoS One*, 13(7), e0201338.

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 spread between salmon farms in Southern Chile based on numerical simulations of currents. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 158, 31-39.

Palma, E. D., & Matano, R. P. (2012). A numerical study of the Magellan Plume. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C5).

Pérez-Santos, I., Garcés-Vargas, J., Schneider, W., Ross, L., Parra, S., & Valle-Levinson, A. (2014). Double-diffusive layering and mixing in Patagonian fjords. *Progress in Oceanography*, 129, 35–49. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.03.012>

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.

Pettinger, L. R. (1971). Field data collection: An essential element in remote sensing applications.

Pielke, R. A., & Pielke, R. A. (1984). *Mesoscale meteorological modelling*. Academic press.

Ridgway, K. R., Dunn, J. R., & Wilkin, J. L. (2002). Ocean interpolation by four-dimensional weighted least squares—Application to the waters around Australasia. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 19(9), 1357-1375.

Röhrs, J., Gusdal, Y., Rikardsen, E., Durán Moro, M., Brændshøi, J., Kristensen, N. M., ... & Christensen, K. H. (2023). Barents-2.5 km v2. 0: an operational data-assimilative coupled ocean and sea ice ensemble prediction model for the Barents Sea and Svalbard. *Geoscientific Model Development Discussions*, 2023, 1-31.

Ross, A. C., Stock, C. A., Adcroft, A., Curchitser, E., Hallberg, R., Harrison, M. J., Hedstrom, K., Zadeh, N., Alexander, M., Chen, W., Drenkard, E. J., du Pontavice, H., Dussin, R., Gomez, F., John, J. G., Kang, D., Lavoie, D., Resplandy, L., Roobaert, A., Saba, V., Shin, S.-I., Siedlecki, S., and Simkins, J. (2023). A high-resolution physical–



biogeochemical model for marine resource applications in the northwest Atlantic (MOM6-COBALT-NWA12 v1.0), *Geosci. Model Dev.*, 16, 6943–6985, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6943-2023>.

Ross, L., Pérez-Santos, I., Linford, P., & Díaz, P. A. (2025). Circulation in the Guafo Mouth: The gateway to northern Patagonia. *Science of The Total Environment*, 979, 179512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179512>.

Ruiz, C., Artal, O., Pinilla, E., & Sepúlveda, H. H. (2021). Stratification and mixing in the Chilean Inland Sea using an operational model. *Ocean Modelling*, 158, 101750.

Saldías, G. S., Hernández, W., Lara, C., Muñoz, R., Rojas, C., Vásquez, S., ... & Soto-Mardones, L. (2021). Seasonal variability of SST fronts in the Inner Sea of Chiloé and its adjacent coastal ocean, northern Patagonia. *Remote Sensing*, 13(2), 181.

Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2003). A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C3).

Sievers, H. A., & Silva, N. (2006). Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 53-58.

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-FIORDOS 2). *Cienc. Tecnol. Mar*, 25(1), 23-88.

Silva, N., Rojas, N., and 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 Res. Pt. II*, 56, 1004–1020, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.013>.

Singh, J., Singh, N., Ojha, N., Sharma, A., Pozzer, A., Kumar, N. K., Rajeev, K., Gunthe, S. S., & Kotamarthi, V. R. (2021). Effects of spatial resolution on WRF v3.8.1 simulated meteorology over the central Himalaya. *Geoscientific Model Development*, 14, 1427–1446. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-1427-2021>

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-Riquelme, C., Pinilla, E., & Ross, L. (2023). Wind influence on residual circulation in Patagonian channels and fjords. *Continental Shelf Research*, 254, 104905.

The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG), (2019). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Technical Note 333. College Park, MD, USA: NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Thomson, R. E., & Emery, W. J. (2024). *Data analysis methods in physical oceanography*. Elsevier.

Umlauf, L., & Burchard, H. (2003). A generic length-scale equation for geophysical turbulence. *Journal of Marine Research*, 61, 235–265.

Van Leeuwen, S. M., H.-J. Lenhart, T. C. Prins, A. Blauw, X. Desmit, L. Fernand, R. Friedland, O. Kerimoglu, G. Lacroix, A. van der Linden, A. Lefebvre, J. van der Molen, M. Plus, I. Ruvalcaba Baroni, T. Silva, C. Stegert, T. A. andTroost and L. Vilmin . (2023). Deriving pre-eutrophic conditions from an ensemble model approach for the North-West European seas. *Front. Mar. Sci.* 10: 1129951, doi: 10.3389/fmars.2023.1129951

Valle-Levinson, A., Blanco, J. L., & Frangópulos, M. (2006). Hydrography and frontogenesis in a glacial fjord off the Strait of Magellan. *Ocean Dynamics*, 56(3), 217-227.

Vásquez Anacona, H.; Mattar, C.; Alonso-de-Linaje, N.G.; Sepúlveda, H.H.; Crisóstomo, J.(2023). Wind Simulations over Western Patagonia Using the Weather Research and Forecasting Model and Reanalysis. *Atmospher* , 14, 1062.

Warner, J. C., Geyer, W. R., & Lerczak, J. A. (2005). Numerical modeling of an estuary: A comprehensive skill assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(C5).

Weidemann, S. S., Arigony-Neto, J., Jaña, R., Netto, G., Gonzalez, I., Casassa, G., & Schneider, C. (2020). Recent climatic mass balance of the Schiaparelli Glacier at the Monte Sarmiento Massif and reconstruction of Little Ice Age climate by simulating steady-state glacier conditions. *Geosciences*, 10(7), 272.

Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73.



10. ANEXOS

Anexo A: Ecuaciones modelo hidrodinámico CROCO y WRF

El movimiento de una partícula en el océano 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 el 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.**

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

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

6. **Ecuaciones conservativas de trazadores temperatura y salinidad**

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

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



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO / DIVISIÓN INVESTIGACIÓN ACUICULTURA

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:

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

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

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

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



Modelo operacional basado en 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-hidrostáticos, 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 (Figura70). 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:

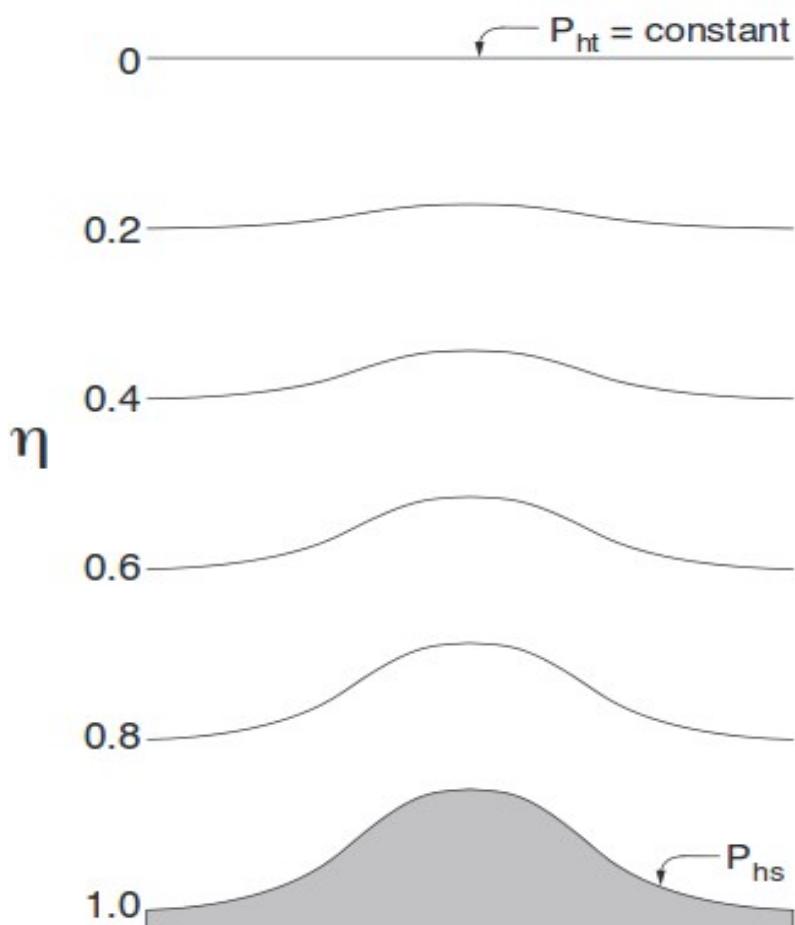


Figura 70: Distribución de niveles verticales tipo sigma.



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

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 $\varphi = gz$ (el geopotencial), p (presión) y $\alpha = 1 / \rho$ (la densidad inversa). Usando las variables definidas anteriormente, las ecuaciones de Euler se pueden escribir como:

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

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

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

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

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

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

Junto con la relación de diagnóstico para la densidad inversa:

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

y la ecuación de estado

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

Entre (11) - (18), los subíndices x, y y η denotan diferenciación,

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

y

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

donde a representa una variable genérica. $\gamma = cp/cv = 1.4$ es la relación de las capacidades caloríficas para el aire seco, R_d es la constante de gas para aire seco, y p_0 es una presión de referencia (típicamente 105 Pascales). Los términos del lado derecho F_u , F_v , F_w y F_Ω representan términos forzados que surgen de la física del modelo, la mezcla turbulenta, las proyecciones esféricas y la rotación de la Tierra.

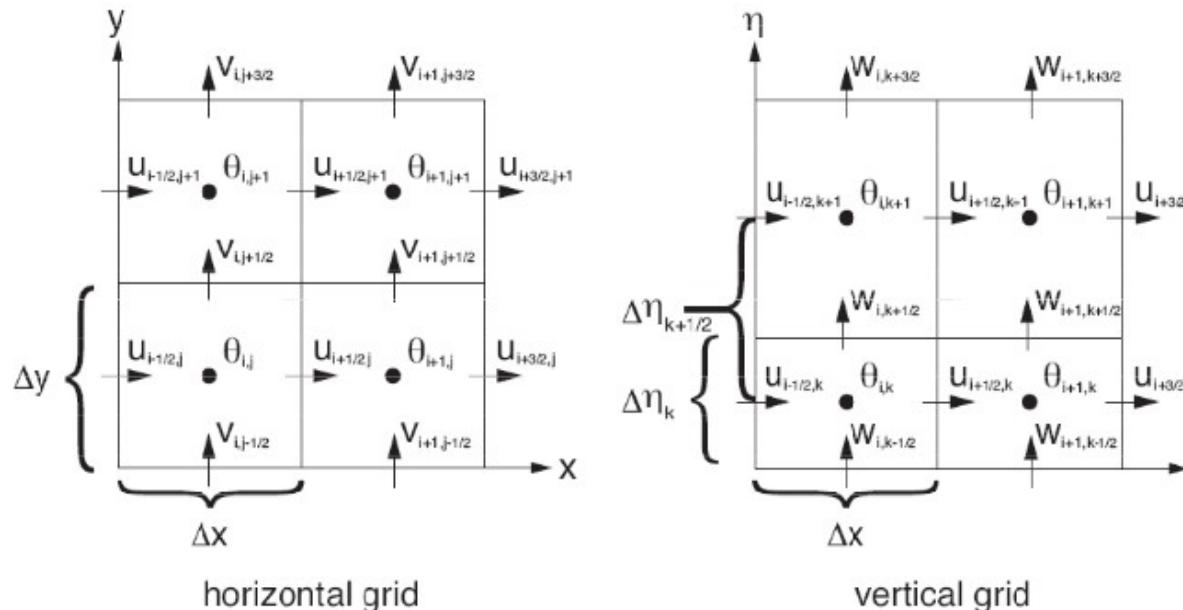


Figura 71: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005)

Por otro lado, la discretización espacial en el núcleo ARW esta dada por la grilla Arakawa-C (Figura 71), en donde 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.



Además, el correcto funcionamiento de MW-Patanor comienza con la descarga del forzante atmosférico, al rededor de las 3:00 am, mientras MC-Patanor 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://ftpprd.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 (ungib.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).

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 MC-Patanor/Mag. 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.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO / DIVISIÓN INVESTIGACIÓN ACUICULTURA

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 B: Ficha técnica de estaciones meteorológicas REDMET

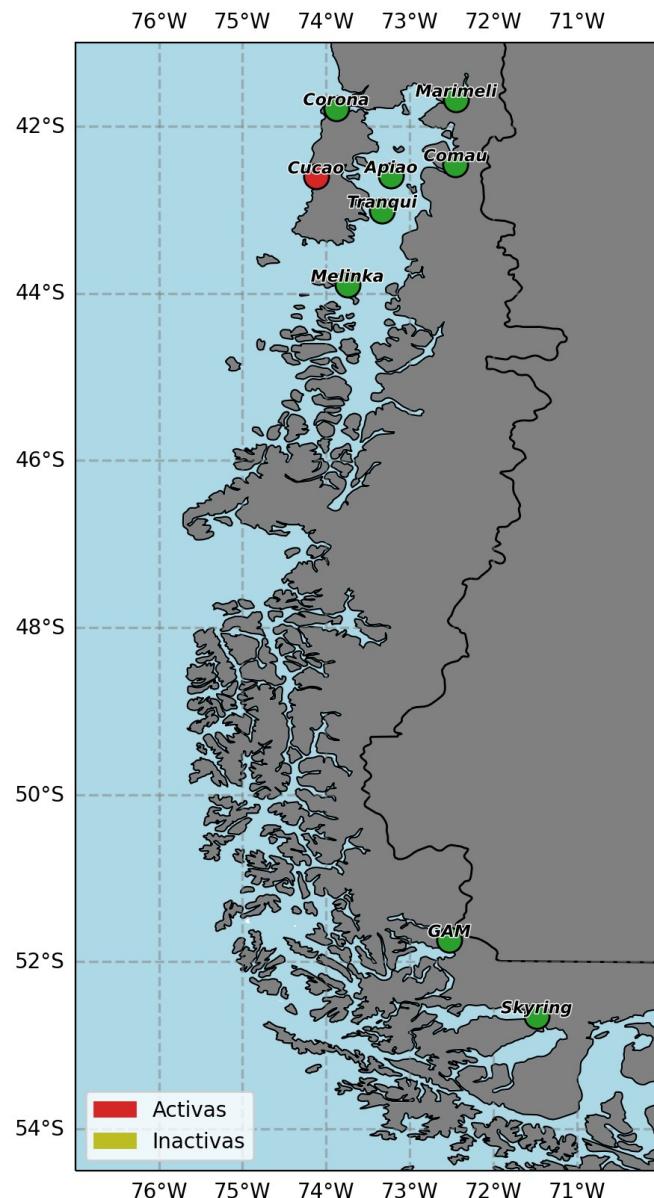


Figura 72: Ubicación de las estaciones meteorológicas que comprenden REDMET para la Patagonia chilena

Estación meteorológica Faro Punta Corona, Ancud.

<p>Nº Serie: 10851064 Señal: GPRS Automática System</p> <p>Tipo: Proveedor: Thots</p>	<p>Fecha de instalación: 30/08/2023 Estado: : Activa</p>
<p>Área de emplazamiento:</p> <p>La estación meteorológica Faro Corona, Ancud se encuentra emplazada en un terreno público dependencias de la armada de Chile y corresponde a un sitio parcialmente cubierto de edificaciones. El tipo de sustrato es blando, ideal para la instalación de estaciones y estructura de 3 caras.</p>	<p>Fotografía última actualización:</p> 
<p>Variables midiendo y altura aprox:</p> <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 2 metros Temperatura del aire: 2 metros Humedad relativa: 2 metros Temperatura punto de rocío: 2 metros Precipitación: 3 metros Radiación solar: 3 metros Luz par: 3 metros Velocidad del viento: 4 metros Velocidad de ráfaga: 4 metros 	
<p>Ubicación:-41.783862,-73.880132 localidad Faro Punta Corona, Ancud</p> 	<p>Logística:</p> <p>Para llegar a la estación meteorológica desde Ancud se debe seguir la ruta W-20 dirección norte y hasta la intersección con la ruta W-236 donde se deberá continuar hasta el final del camino.</p> <p>El contacto para el ingreso a las dependencias del recinto corresponde al Sr. Cristian Díaz Triviño responsable de la base naval. Su contacto corresponde al fono +5698745070</p>

Estación meteorológica Isla Apiao, Archipiélago de Chiloé.

Nº Serie: 10851061 Señal: GPRS Tipo: Automática Proveedor: Unisource	Fecha de instalación: 01/09/2017 Estado : Activa
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Isla Apiao se encuentra emplazada en un terreno privado parcialmente despejado. El tipo de sustrato es blando, ideal para la instalación de estaaciones y estructura de 3 caras.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 2 metros Temperatura del aire: 2 metros Humedad relativa: 2 metros Temperatura punto de rocío : 2 metros Precipitación: 3 metros Radiación solar: 3 metros Luz par: 3 metros Velocidad del viento: 5 metros Velocidad de ráfaga: 5 metros 	
Ubicación: -42.59546, -73.22271 localidad Isla Apiao sector Capilla. 	Logística: Para llegar a la estación meteorológica desde Achao, Chiloé se debe cruzar a Isla Apiao en 2 lanchas de recorrido subvencionadas. Actualmente existen recorridos de lunes a domingo saliendo desde las 15:00 de Achao, retornando a las 8 am desde Apiao. Las lanchas que realizan este recorrido corresponden a la L/M Marbella y L/M Isidora Beatriz. El contacto del Capitán de la embarcación es +56 9 8863 7143, Contacto del sitio donde se encuentra la estación es Sebastián Huaiquimilla, + 56994011703

Estación meteorológica Isla Tranqui, Archipiélago de Chiloé.

Nº Serie: 10851062 Señal: GPRS Tipo: Automática Proveedor: Thots System	Fecha de instalación: 27/07/2021 Estado : Activa
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Isla Tranqui se encuentra emplazada en un terreno privado mayoritariamente despejado. El tipo de sustrato es blando, ideal para la instalación de estaaciones y estructura de 3 caras.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 2 metros Temperatura del aire: 2 metros Humedad relativa: 2 metros Temperatura punto de rocío : 2 metros Precipitación: 2 metros Radiación solar: 2 metros Luz par: 2 metros Velocidad del viento: 5 metros Velocidad de ráfaga: 5 metros 	
Ubicación: -43.010675,-73.330543 localidad Isla Tranqui sector Centinela. 	Logística: Para llegar a la estación meteorológica desde Queilen, Chiloé se debe cruzar a Isla Tranqui en barcaza subvencionada. Actualmente existen recorridos de lunes a sábado a excepción de los días miércoles que no hay recorrido. El titular de la barcaza corresponde al Sr. Pedro Diaz y es quién maneja el horario de los recorridos de la barcaza. El contacto corresponde al fono +56 9 9672 8858 Contacto del sitio donde se encuentra la estación es Felipe Torres, fono + 56 65 2865738

Estación meteorológica Cucao, Chonchi.

Nº Serie: 20084598 Señal: GPRS Tipo: Automática Unisource	Proveedor: Fecha de instalación: 03/08/2017 Estado : Inactiva
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Cucao se encuentra emplazada sobre una estructura de estanque de agua en un terreno privado completamente despejado. El tipo de sustrato es blando, ideal para la instalación de estaques y estructura de 3 caras.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 5 metros Temperatura del aire: 5 metros Humedad relativa: 5 metros Temperatura punto de rocío : 5 metros Precipitación: 7 metros Radiación solar: 7 metros Luz par: 7 metros Velocidad del viento: 7 metros Velocidad de ráfaga: 7 metros 	
Ubicación: -42.60072,-74.12284, localidad Cucao. 	Logística: Para llegar a la estación meteorológica Cucao, se debe llegar a dicha localidad hasta el puente de bote donde se encuentra la entrada del terreno de emplazamiento. Contactar a Sr. Victor Luna para solicitar permiso de ingreso +56 9 95977021

Estación meteorológica Isla Marimeli, Reloncaví.

Nº Serie: 21740298 Señal: GPRS Tipo: Automática Unisource	Proveedor: Fecha de instalación: 31/01/2023 Estado : Activa
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Marimeli se encuentra emplazada en un terreno privado parcialmente despejado. El tipo de sustrato es mixto, complejo para la instalación de estaciones y estructura de 3 caras.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 2 metros Temperatura del aire: 3 metros Humedad relativa: 3 metros Temperatura punto de rocío : 3 metros Precipitación: 2 metros Radiación solar: 5 metros Luz par: 5 metros Velocidad del viento: 5 metros Velocidad de ráfaga: 5 metros 	
Ubicación: -41.68282,-72.44595 localidad Isla Marimeli, Reloncaví. 	Logística. Para llegar a la estación meteorológica Marimeli, se debe cruzar en embarcación particular desde el puente soldado Gómez en la ruta V-69 entre Llahuepe y Puelo. El encargado del lugar donde se encuentra la estación corresponde al Sr. Omar Gómez fono de contacto +56953148377

Estación meteorológica Fiordo Comau, Hualaihue.

Nº Serie: 20686170 Señal: GPRS Tipo: Automática Unisource	Proveedor: Fecha de instalación: 04/11/2020 Estado : Activa
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Fiordo Comau se encuentra emplazada en elevación en un terreno privado parcialmente despejado. La estructura de montaje de la estación, perteneciente a los residentes del lugar, fue mejorada por una nueva, propiedad de IFOP.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 4 metros Temperatura del aire: 4 metros Humedad relativa: 4 metros Temperatura punto de rocío : 4 metros Precipitación: 4 metros Radiación solar: 5 metros Luz par: 5 metros Velocidad del viento: 7 metros Velocidad de ráfaga: 7 metros 	
Ubicación: -42.454566,-72.453037 localidad termas de porcelana, Fiordo Comau. 	Logística: Para llegar a la estación meteorológica Fiordo Comau se debe tomar la embarcación L/M Serenade que zarpa desde el puerto de Hornopirén. Esta sale de "La Rampa". Generalmente viaja de Hornopirén a Leptepu los martes y los viernes a las 14:00 hrs. El regreso son los días miércoles a las 8:00 hrs y los sábados o Domingos a las 14:00 hrs El contacto del lugar es Ángel fono +56 9 6709747

Estación meteorológica Melinka, Archipiélago de las Guaitecas.

Nº Serie: 20084597 Señal: GPRS Tipo: Automática Unisource	Proveedor: Fecha de instalación: 11/12/2017 Estado : Activa
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Melinka se encuentra emplazada en un terreno público perteneciente al servicio de salud de Melinka. El área se encuentra rodeada por edificaciones, sin embargo la estación está montada en altura en una estructura de antena perteneciente al CESFAM.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 3 metros Temperatura del aire: 3 metros Humedad relativa: 3 metros Temperatura punto de rocío : 3 metros Precipitación: 2 metros Radiación solar: 3 metros Luz par: 3 metros Velocidad del viento: 8 metros Velocidad de ráfaga: 8 metros 	
Ubicación: -43.89667,-73.74612 localidad Cesfam de Melinka 	Logística: Para llegar a la estación meteorológica Melinka desde Quellón, se debe cruzar en barcaza de la empresa Naviera Austral (revisar horarios y frecuencia en internet) y llegar al CESFAM de Melinka. El encargado es Roxana su contacto es +56 9 73983650

Estación meteorológica Seno Skyring, Isla Riesco.

Nº Serie: 20681621 Señal: GPRS Tipo: Automática Unisource	Proveedor: Fecha de instalación: 14/02/2021 Estado : Activa
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Seno Skyring se encuentra emplazada en un terreno privado completamente despejado. El tipo de sustrato es blando, ideal para la instalación de estaaciones y estructura de 3 caras.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 2 metros Temperatura del aire: 2 metros Humedad relativa: 2 metros Temperatura punto de rocío : 2 metros Precipitación: 2 metros Radiación solar: 2 metros Luz par: 2 metros Velocidad del viento: 3 metros Velocidad de ráfaga: 3 metros 	
Ubicación: -52.65208,-71.49075 localidad Isla Riesco. 	Logística: Para llegar a la estación meteorológica desde Punta Arenas, se debe trasladar hacia la comuna de Río Verde donde se deberá cruzar a Isla Riesco mediante barcaza. Los horarios para el cruce de barcaza se encuentran en: http://www.tabsa.cl/portal/index.php/es/horarios/34-horarios-rio-verde-isla-riesco En Isla Riesco seguir el camino hacia el norte durante 5 km hasta el acceso a la estancia Skyring. Contacto Sergio Vilisic, fono +56 9 94318422

Estación meteorológica Golfo Almirante Montt, Pto. Natales.

Nº Serie: 21488522 Señal: GPRS Tipo: Automática Thots System	Proveedor: Fecha de instalación: 16/11/2022 Estado : Activa
Área de emplazamiento: La estación meteorológica Golfo Almirante Montt se encuentra emplazada en un terreno privado parcialmente despejado. El tipo de sustrato es blando, ideal para la instalación de estaciones y estructura de 3 caras.	Fotografía última actualización: 
Variables midiendo y altura aprox: <ul style="list-style-type: none"> Presión atmosférica: 2 metros Temperatura del aire: 2 metros Humedad relativa: 2 metros Temperatura punto de rocío: 2 metros Precipitación: 2 metros Radiación solar: 3 metros Luz par: 3 metros Velocidad del viento: 4 metros Velocidad de ráfaga: 4 metros 	
Ubicación: -51.736024,-72.526995 localidad Península Antonio Varas. 	Logística: Para llegar a la estación meteorológica desde Puerto Natales, se debe cruzar el Canal Almirante Señoret hacia la Península Antonio Varas mediante barcaza. Actualmente no existe un servicio subvencionado de barcaza. Sin embargo existe una agencia de turismo que otorga el servicio de traslado desde Puerto Bories hacia la península. La agencia corresponde a: https://www.turismo21demayo.com/ El contacto para la barcaza es el Sr. Juan Carlos Álvarez, fono +56981599799. Contacto del sitio donde se encuentra la estación es Pedro Vargas, +56 9 9378 3790



Anexo C: Sensibilidad y calibración modelo biogeoquímico

Cobertura de datos de clorofila superficial de MODIS-AQUA

En general, las coberturas porcentuales más altas se registraron durante la temporada de verano (EFM), aunque con variaciones interanuales. El año 2018 presentó la menor cobertura, mientras que 2019 alcanzó los valores más altos, superando el 45 %, seguido de 2020. Espacialmente, las mayores coberturas se localizaron en el mar interior de Chiloé y en la costa oceánica, especialmente en las inmediaciones del canal de Chacao. La primavera (OND) también mostró áreas con coberturas en torno al 15 %, aunque con una marcada variabilidad entre años. Estas diferencias pueden estar asociadas a la variabilidad en la nubosidad y las condiciones atmosféricas, que afectan la detección de clorofila-a por sensores satelitales (Figura 73).

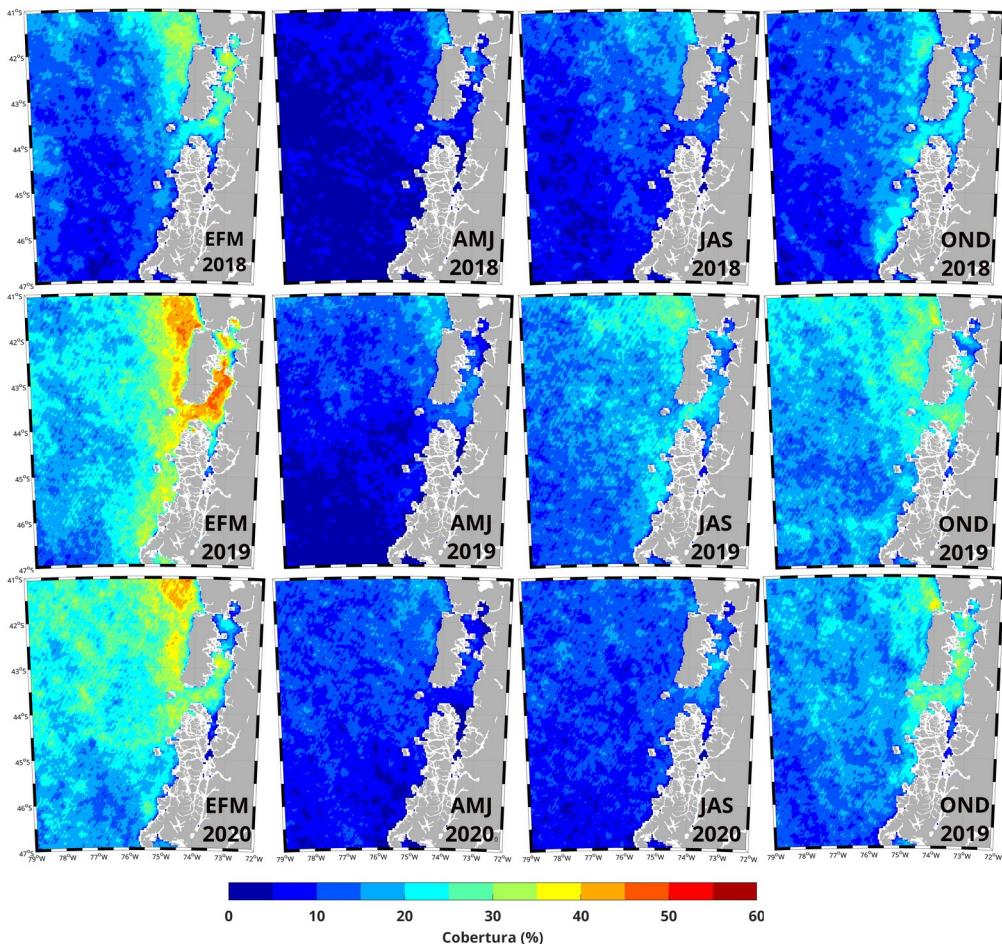


Figura 73: Cobertura porcentual (%) de datos de clorofila satelital de MODIS-AQUA de 4km.

Experimento esquema de mezcla

El experimento evaluó dos esquemas de mezcla vertical: el esquema Large–McWilliams–Doney (LMD) (Large y Gent, 1999), utilizado como configuración de control, y el esquema Generic Length Scale (GLS) desarrollado por Umlauf et al. (2003). Este último mostró un desempeño superior al replicar con mayor precisión la influencia de las fuentes de agua en el sistema. Con base en estos resultados, se optó por implementar el esquema GLS en la simulación SIM02, ya que su capacidad para representar de manera más realista los procesos de

mezcla vertical lo convirtió en la alternativa más adecuada para mejorar la precisión del modelo.

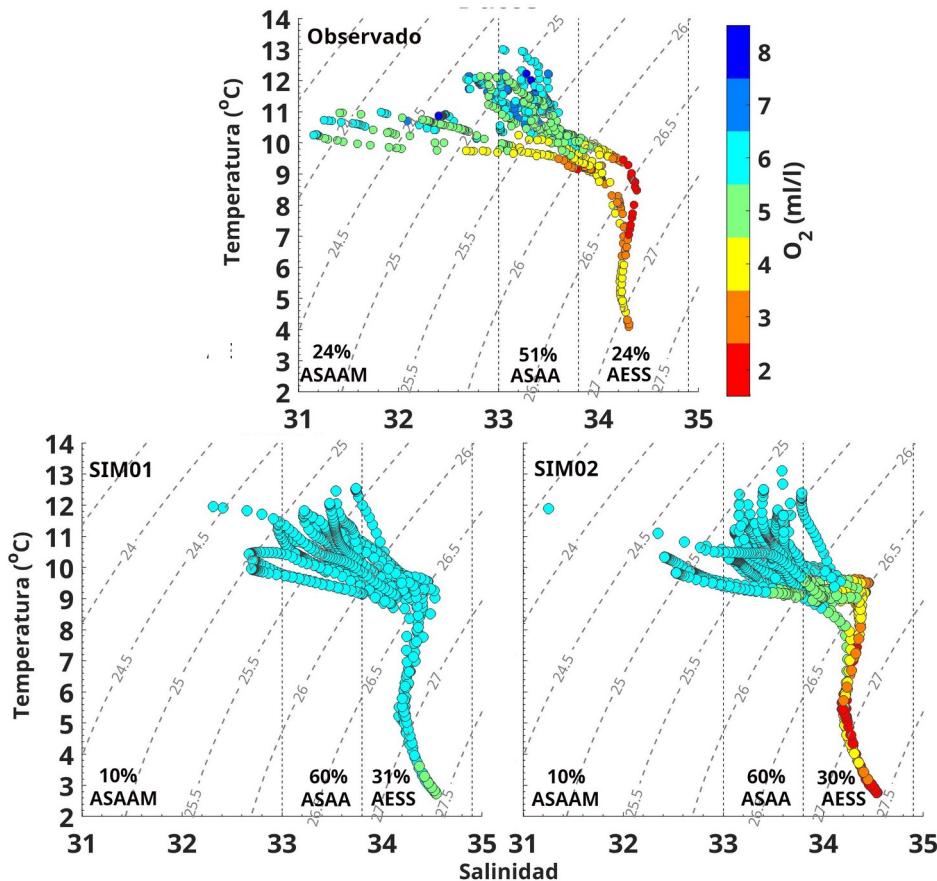


Figura 74: Distribución de salinidad a lo largo del Canal Moraleda de los datos observados datos de IFOP, control y GLS a lo largo de la transecta de Moraleda.

Evaluación condición inicial

Se compararon cuatro condiciones iniciales distintas proveniente de los datos climatológicos del Atlas de los Mares Regionales de CSIRO (CARS09) (Ridgway *et al.*, 2002). La segunda fuente se deriva del producto biogeoquímico global del océano de Mercator. La tercera fuente corresponde a la climatología del

Atlas Mundial de los Océanos (WOA09) (Locarnini *et al.*, 2010; Antonov *et al.*, 2010). Finalmente, la cuarta fuente se basa en la climatología del modelo global NEMO-PISCES (WOAPISCES) (Aumont *et al.*, 2006). Todos estos datos fueron preprocesados usando el toolbox ROMSTOOL (Penven *et al.*, 2008). Entre las cuales WOA09 fue evaluada como la menos adecuada. Las otras tres opciones presentaron tanto fortalezas como debilidades, pero CARS09 destacó como la que mejor reprodujo los perfiles de oxígeno disuelto, la variabilidad y las tendencias en los diagramas TS (Temperatura-Salinidad) y oxígeno, así como el perfil de silicato. Por otro lado, WOAPISCES demostró ser la más precisa al reproducir el perfil de nitrato, mientras que MERCATOR fue la que mejor representó el perfil de fosfato. En conjunto, estos resultados indican que, aunque ninguna condición inicial es perfecta en todos los aspectos, CARS09 es la opción más equilibrada y adecuada para la mayoría de las variables analizadas.

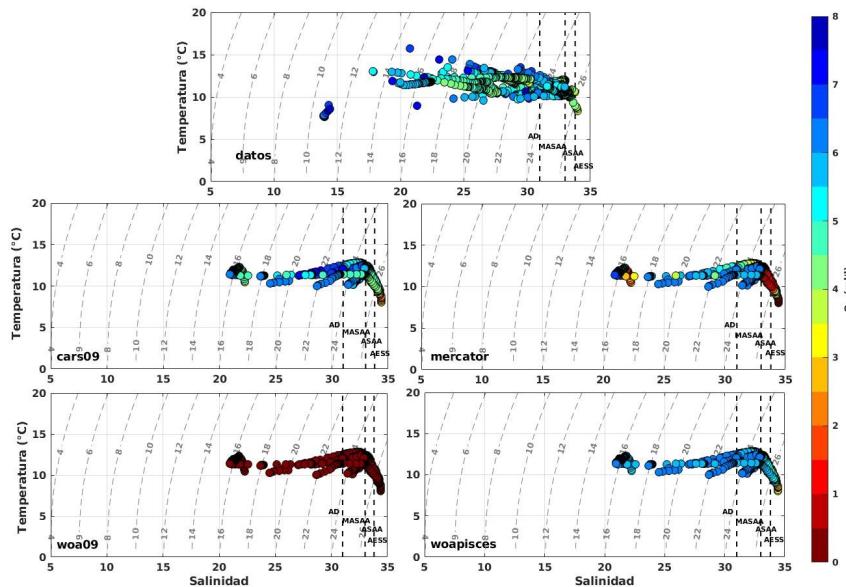


Figura 75: Diagramas TS y oxígeno disuelto de los datos observados y de las distintas condiciones iniciales.



 www.ifop.cl

 info@ifop.cl

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO - CHILE