



Informe Final

Convenio de Desempeño 2018
Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de circulación
marina para el apoyo de la acuicultura, V Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Agosto 2019



Informe Final

Convenio de Desempeño 2018.
Desarrollo de sistema de predicción
sinóptico de circulación marina para el apoyo
de la acuicultura, V Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Agosto 2019

REQUIRENTE SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

Subsecretaria de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Ignacio Guerrero Toro

EJECUTOR INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

Director Ejecutivo
Luis Parot Donoso

JEFE PROYECTO
Elías Pinilla Matamala

AUTORES
Osvaldo Artal Arrieta
Cristian Ruiz Soto
Oliver Venegas Mella
Milton Salas Salas
Elías Pinilla Matamala

ÍNDICE GENERAL

Resumen ejecutivo.....	9
1. Antecedentes.....	11
1.1 Contexto.....	11
1.2 Modelos operacionales.....	12
1.3 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA.....	15
2. Objetivos.....	20
2.1 Objetivo General.....	20
2.2 Objetivos Específicos.....	20
3. Metodología.....	21
3.1 Metodología objetivo específico 1: Optimizar y calibrar el sistema operacional oceanográfico para la región de Los Lagos y la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.....	23
3.1.1 Mejoramiento condición inicial.....	23
3.1.2 Mejoramiento de las fuentes de agua dulce.....	24
3.1.3 Mejoramiento de forzante atmosférico.....	29
3.1.4 Mejoramiento de la fuente de batimetría.....	34
3.1.5 Implementación módulo biogeoquímico (BGQ) de diagnóstico y evaluación posible implementación.....	37
3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas en tiempo real.....	43
3.3 Metodología objetivo específico 3: Perfeccionar la plataforma de visualización de resultados y aplicaciones.....	47
4. Gestión del proyecto.....	51
4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA.....	51
4.2 Reuniones académicas.....	51
4.3 Talleres de trabajo.....	54
4.4 Talleres de difusión.....	55
4.5 Congresos académicos.....	57
4.6 Compra y mantenimiento de equipo:.....	57
4.7 Carta Gantt del proyecto.....	58
5. Resultados.....	60
5.1 Resultados objetivo específico 1: Optimizar y calibrar el sistema operacional oceanográfico para la región de Los Lagos y la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.....	60
5.1.1 Evaluación mejoramiento condición inicial.....	60
.....	62
5.1.2 Evaluación efectos fuentes de agua dulce.....	62
5.1.3 Evaluación mejoramiento forzante atmosférico.....	64
5.1.4 Evaluación del efecto de la batimetría.....	68
5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas en tiempo real.....	81
5.2.1 Evaluación MOSA-WRF con información de estaciones meteorológicas en tiempo real.....	81

5.2.2 Evaluación MOSA-ROMS con información satelital y campañas oceanográficas.....	84
5.3 Resultados objetivo específico 3: Perfeccionar la plataforma de visualización de resultados y aplicaciones.....	90
6. Discusión.....	94
6.1 Implementación de un modelo numérico de predicción sinóptico para el sur de Chile (MOSA-ROMS).....	94
6.2 Desarrollos actuales y perspectivas de MOSA.....	97
6.3 Sistema de información oceanográfica CHONOS.....	101
7. Conclusiones.....	103
Anexo A: Componentes de un sistema operacional.....	105
Anexo B: Recursos computacionales.....	109
Anexo C: Ecuaciones modelo hidrodinámico ROMS AGRIF.....	113
Anexo D: Modelo operacional MOSA-WRF.....	115
Anexo E: Estadísticos principales para validación.....	120
Referencias bibliográficas.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Marco conceptual para un sistema de información sobre el clima. Fuente: Modificado de la figura 2 de Trenberth (2008), Boletín de la OMM 57 (1).....	14
Figura 2: Análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo. Las líneas rojas indican el estado del océano predicho a partir de condiciones iniciales en el tiempo de análisis (puntos rojos). Las observaciones obtenidas dentro de la ventana de análisis (verde) se han agrupado y asimilado solo en los tiempos de análisis. Fuente: Modificado de Schiller & Brassington (2011).....	16
Figura 3: Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional de las tres etapas de la fase uno (2014 – 2017).....	17
Figura 4: Diagrama de flujos que describe las componentes presentes en la automatización del modelo oceanográfico operacional Sur-Austral, MOSA-ROMS.....	19
Figura 5: Distribución de elementos horizontales en MOSA, se divide la figura por región para que se puedan apreciar los elementos, los cuales poseen una resolución de ~ 1km.....	21
Figura 6: Climatología con variabilidad mensual usada en campos de hielo norte y el estero Elefantes para ser incorporada al pronóstico operativo.....	26
Figura 7: <i>Ubicación de los puntos de CTD utilizados (en rojo), ubicación de las nuevas fuentes de agua dulce ingresadas (en verde), y fuente sobre la Laguna San Rafael (circulo amarillo)</i>	28
Figura 8: Dominios de prueba para el modelo MOSA-WRF a diferentes resoluciones espaciales: (a) 1 dominio de 5 km (b) 2 dominios de 9 km y 3 km. (c) 2 dominios de 9 km y 1.8 km (d) 2 dominios de 5 km y 1 km.....	30
Figura 9: Esquema de funcionamiento diario del modelo operacional atmosférico MOSA-WRF.....	31
Figura 10: Dominios reconfigurados de modelo MOSA-WRF para forzar MOSA-ROMS, a diferentes resoluciones espaciales: (a) 1 dominio de 5 km (b) 2 dominios de 9 km y 3 km.	32
Figura 11: Batimetría interpolada desde datos GEBCO y cartas náuticas digitales del SHOA.....	35
Figura 12: Modelo esquemático de la circulación horizontal. (a) nivel superficial (0 – 30 m), (b) nivel intermedio (30 – 150 m), (c) nivel profundo (> 150 m) (tomado de Silva et al. 1998).....	38
Figura 13: (a) Serie de tiempo de la temperatura y (b) salinidad del agua obtenida del MicroCat y (c-d) ODy porcentaje de saturación del MiniDOT. Los datos fueron colectados en el anclaje de Melinka a ~10 metros del fondo en el periodo Enero-Noviembre 2016. Tomado de Pérez-Santos et al. 2017.....	39
Figura 14: Esquema del modelo NPZD.....	40
Figura 15: Dominio de 2.7 km de resolución espacial para modelo biogeoquímico NChIPZD. Batimetría es interpolada desde datos GEBCO y cartas náuticas digitales del SHOA.....	42
Figura 16: Posiciones de anclajes de perfiladores acústicos de corriente (ADCP), estaciones meteorológicas y sensores de presión en el mar interior de Chiloé durante 2017.....	44
Figura 17: Estaciones de CTD. A la izquierda transecta Continental, a la derecha transecta insular.....	46

Figura 18: Condiciones iniciales utilizadas en el experimento de asimilación de datos. (a) SST original, (b) SST perturbada.....60

Figura 19: Mapa residual de temperatura superficial del mar entre pronósticos oceanográfico del 28 de Marzo del 2018 con y sin asimilación de datos en (a) 24 horas, (b) 48 horas, y (c) 72 horas.....61

Figura 20: Series de tiempo de temperatura superficial del mar con y sin asimilación de datos. (a) Seno Reloncaví, (b) Golfo Corcovado, y (c) Estero Elefantes.....62

Figura 21: (a) Distribución de salinidad a lo largo del estero Elefantes para datos de MOSA-ROMS, MOSA-test y una transecta de CTD durante agosto de 2016. (b) Perfiles de frecuencia de boyantes N2 para MOSA-ROMS (línea negra), MOSA-TEST (línea de puntos) y CTD de control (línea roja) en las estaciones indicadas en el mapa.....63

Figura 22: Eficiencia modelo MOSA-WRF sobre una maquina de 32 procesadores.....64

Figura 23: Rendimiento del sistema MOSA-WRF3km para el periodo 28/01/18 – 24/07/19. Se indica con el número 1 un pronóstico exitoso a 3 días y con un 0 el fracaso del pronóstico.....65

Figura 24: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF, MOSA-WRF3km y DMC en Cucao durante el periodo 28/01/19 – 24/07/19.....66

Figura 25: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF, MOSA-WRF3km y DMC en Hunay durante el periodo 28/01/19 – 24/07/19.....66

Figura 26: Ciclo diario de la radiación solar para la estación de Cucao entre 28/01/19 – 24/07/19. En azul se muestran datos observados, en rojo MOSA-WRF, amarillo MOSA-WRF3km y morado DMC.....67

Figura 27: Ciclo diario de la radiación solar para la estación de Melinka entre 28/01/19 – 24/07/19. En azul se muestran datos observados, en rojo MOSA-WRF, amarillo MOSA-WRF3km y morado DMC.....68

Figura 28: Batimetría en la zona norte del mar interior de Chiloé de la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda), y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).....69

Figura 29: Batimetría en la zona sur del mar interior de Chiloé de la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda), y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).....70

Figura 30: Series de tiempo del nivel del mar observada y modelada con las grillas actual MOSAv3 y las de prueba MOSAv4a y MOSAv4b.....71

Figura 31: Transecta longitudinal de la distribución de los niveles verticales actuales en MOSA-ROMS entre Petrohué (cabeza fiordo Reloncaví) y canal Apiao.....72

Figura 32: Transecta longitudinal de la distribución de los niveles verticales modificados entre Petrohué (cabeza fiordo Reloncaví) y canal Apiao.....72

Figura 33: Oxígeno y Nitrato observado y modelado de un agosto promedio.....73

Figura 34: Oxígeno y Nitrato observado y modelado de un noviembre promedio.....74

Figura 35: Comparación nitrato ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante noviembre. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.....75

Figura 36: Comparación oxígeno ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante noviembre. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.....76

Figura 37: Comparación de perfiles observados y simulados de nitrato y oxígeno durante noviembre entre 41.5 - 43.82 °S, 72.5 - 74.4 °W.....77

Figura 38: Comparación nitrato ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante julio. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.....78

Figura 39: Comparación oxígeno ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante julio. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.....79

Figura 40: Comparación de perfiles observados y simulados de nitrato y oxígeno durante julio entre 41.5 - 43.82 °S, 72.5 - 74.4 °W.....80

Figura 41: Rendimiento del sistema MOSA-WRF para el periodo 20/07/18 – 20/07/19.....82

Figura 42: Serie de tiempo para las componentes U y V, intensidad del viento, temperatura y radiación solar para la estación de Cucao durante 20/07/18 – 20/07/19.....83

Figura 43: Ciclo diario de las componentes zonales y meridionales del viento U y V, intensidad del viento, temperatura y radiación solar modelados y observados en la estación de Cucao durante el periodo 20/07/18 – 20/07/19.....84

Figura 44: Series de tiempo del promedio diario de TSM para todo el dominio en MOSA-ROMS y datos satelitales AVHRR entre julio 2016 y julio 2019. (b) Diferencia entre ambas series. Notar que la correlación entre ambas series es de 0.9434, con un error cuadrático medio de 0.81 °C.....85

Figura 45: Distribución espacial de estadísticos, correlación (R^2), error cuadrático medio (rmse) y sesgo (bias) obtenidas a partir de datos mensuales de VIIRS y MOSA-ROMS entre julio de 2016 y julio de 2019.....86

Figura 46: Series de tiempo del primer modo de variabilidad de los datos satelitales de TSM obtenidos con VIIRS (línea continua) y con MOSA-ROMS (línea intermitente).....87

Figura 47: Distribución espacial del error promedio (izquierda) y de la desviación estándar (derecha) entre MOSA-ROMS e imágenes satelitales de salinidad superficial del mar de SMOS para el año 2018.....88

Figura 48: Correlaciones entre valores estacionales de salinidad superficial del mar (SSM) de MOSA-ROMS y SMOS. Los puntos no incluye la zona interior de Chiloé-Aysén.....89

Figura 49: (arriba) Diagramas T/S elaborados a partir de lances de CTD de campañas oceanográficas de IFOP en Chiloé y Aysén durante 2017-2019. (abajo) Diagramas T/S elaborados con perfiles de temperatura y salinidad extraídos de MOSA-ROMS para las mismas fechas de los lances de CTD. La barra de colores de la zona inferior indica la profundidad.....90

Figura 50: Histogramas de frecuencia de salinidad (arriba) y temperatura (abajo) construidos con datos de CTD de campañas de Chiloé y Aysén (2017/2019) y MOSA-ROMS para los mismos periodos.....91

Figura 51: (a) Diagrama de dispersión de las componentes ortogonales de la corriente. (b) Espectros de energía de la corriente para datos de ADCP y de MOSA-ROMS, en el periodo entre agosto 2018 y marzo 2019. (c) Posición del anclaje del ADCP.....91

Figura 52: Pagina de inicio del portal web del sistema de información oceanográfica, CHONOS (www.ifop.cl/chonos).....92

Figura 53: Ejemplo de visualización de los resultados de MOSA-ROMS y MOSA-WRF en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos).....93

Figura 54: Ejemplo simulación de Parti-MOSA para estudiar el potencial efecto de un contagio de virus ISAv en el centro Rowlet 750.....94

Figura 55: Ejemplo de visualización de la herramienta de dispersión de partículas Parti-MOSA en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos).....95

Figura 56: Clúster utilizado para las simulaciones de los pronósticos del modelo operacional MOSA-ROMS y MOSA-WRF.....111

Figura 57: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno. Fuente Skamarock et al. (2005).....118

Figura 58: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).....119
Figura 59: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.....120

Índice de tablas

Tabla 1: Descripción ubicación de las fuentes puntuales de agua dulce.....	25
Tabla 2: Resumen ríos cuyos caudales y temperatura fueron actualizados con la información de campos de hielo norte y estero Elefantes.....	27
Tabla 3: Resumen de las diferentes configuraciones del pronóstico operacional MOSA-WRF.....	31
Tabla 4: Coordenadas geográficas mareógrafos monitoreadas por el SHOA.....	36
Tabla 5: Parámetros modelo biogeoquímico NPZD.....	41
Tabla 6: Especificaciones técnicas (Hardware y software) del servidor web virtual donde es alojado el sistema de información oceanográfica CHONOS.....	48
Tabla 7: Especificaciones técnicas (Hardware y software) del nuevo servidor adquirido donde es alojado el sistema de información oceanográfica CHONOS actualizado.....	49
Tabla 8: Escalamiento simulaciones con modelo MOSA-WRF sobre una maquina de 32 núcleos.....	65
Tabla 9: Parámetros de suavizado utilizados en la actual y nuevas grillas del modelo MOSA-ROMS.....	69
Tabla 10: Especificaciones técnicas servidor para MOSA-ROMS ubicado en Castro.....	111
Tabla 11: Especificaciones técnicas servidor para MOSA-ROMS ubicado en Data Center Viña del Mar.....	113
Tabla 12: Especificaciones técnicas servidor web para CHONOS ubicado en Data Center Viña del Mar.....	114

RESUMEN EJECUTIVO

Este proyecto presenta el estado actual y el desarrollo realizado al Modelo Operacional oceanográfico para la zona Sur-Austral de Chile “MOSA”. El propósito de este sistema operacional es proporcionar herramientas de análisis y predicción con el fin de resolver problemas tanto en un corto como mediano plazo asociados principalmente a la acuicultura. Esta herramienta otorga información ambiental diaria con una proyección hasta 72 horas de variables físicas como temperatura, salinidad, nivel del mar y corrientes marinas. Esta información es relevante para estudios de dispersión de patógenos, vertidos de hidrocarburos, deriva de objetos flotantes y/o naufragios. A su vez, a largo plazo este sistema nos permite comprender la dinámica estuarina y la circulación costera en la región de Los Lagos y Aysén.

Este estudio está precedido por 4 etapas de desarrollo a la fecha. En esta etapa, se agregaron y evaluaron cambios al modelo oceanográfico operacional MOSA-ROMS, y a su vez se estudió su desempeño en la reproducción de los principales procesos oceanográficos de la zona. También se implementó un modelo atmosférico predictivo de manera operacional, MOSA-WRF y se realizó un diagnóstico de un modelo biogeoquímico. Finalmente, se ha trabajado en mejoras de la visualización y en la robustez de la plataforma web del proyecto “CHONOS” (www.ifop.cl/chonos).

Los principales cambios incorporados a MOSA-ROMS fueron la incorporación de nuevas fuentes de agua dulce en la zona del estero Elefantes y usar como condición de borde atmosférica el modelo operacional MOSA-WRF de 5 km de resolución. Las nuevas fuentes de agua dulce significaron una mejora en la circulación estuarina y en una mejor caracterización de aguas menos salinas en superficie. A su vez, se comenzó a trabajar en un modelo hidrológico que aportará una mayor cantidad de fuentes en el corto plazo. Con esto se espera mejorar considerablemente los procesos de estratificación y mezcla del dominio, especialmente en la zona de fiordos y canales. El uso de MOSA-WRF en MOSA-ROMS busca mejorar procesos oceanográficos asociados a patrones locales de viento producto de la interacción con los canales y a la topografía de la zona.

Análogamente, se realizaron pruebas con una batimetría que modifica la profundidad del modelo en diferentes zonas del dominio con el fin de mejorar la circulación local y reproducir patrones que dependen de la batimetría, tales como saltos hidráulicos, ondas internas, resonancia, etc. Se espera continuar con las pruebas de estabilidad numérica para incorporar este nuevo dominio al modelo operacional en la próxima etapa del proyecto. Por otra parte, se realizó una prueba de asimilación de datos simple para evaluar el impacto en el pronóstico oceanográfico y el costo numérico asociado a ello.

Otro hito importante fue la implementación y evaluación de un módulo biogeoquímico acoplado con el modelo hidrodinámico ROMS. Se construyó una climatología con el objetivo de reproducir las condiciones biogeoquímicas generales de gran escala. Además, se logró incorporar datos de nutrientes provenientes de los principales ríos. Se espera contar a futuro con un modelo biogeoquímico regional de pronóstico que sirva de aporte a la gestión de la acuicultura ante emergencias sanitarias o desastres ecológicos.

Finalmente, se realizaron mejoras sustanciales a la presentación, navegación y visualización de resultados en el portal web “CHONOS”. Además, ahora se encuentran disponibles para consultar tanto el pronóstico oceanográfico MOSA-ROMS, así como el pronóstico atmosférico MOSA-WRF. Por último, se realizaron 2 cambios en Parti-MOSA. Por una parte, comenzamos a trabajar con otro código numérico con el fin de incorporar vida a las partículas en el futuro y a su vez, se incorporó la opción de escoger el tiempo de dispersión de una partícula entre 3 o 10 días, dándole mayor flexibilidad a los usuarios.

1. ANTECEDENTES

1.1 Contexto

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

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

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

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

para la industria como para el medio-ambiente, 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.

1.2 Modelos operacionales

Los modelos numéricos son ampliamente utilizados por la comunidad científica y actualmente constituyen una importante línea de desarrollo para el progreso del país. Es un campo que cuenta entre sus fortalezas con la capacidad de extender significativamente la cobertura espacial y temporal de la información oceanográfica disponible. De este modo, es posible generar herramientas y aplicaciones orientadas a mejorar la toma de decisiones en casos de contingencias sanitarias, como también de planificación territorial. En un nivel más avanzado, permite adelantarse ante posibles escenarios ambientales críticos a través de pronósticos de diferentes variables oceanográficas.

La oceanografía operacional es una rama de estudio de la oceanografía. Utiliza información de observaciones de terreno, productos satelitales y datos de modelos numéricos para diversos tipos de estudios oceanográficos y aplicaciones prácticas (Pinaridi & Coppini, 2010). Esta disciplina se desarrolla como una continuación al exitoso y extenso programa Global Ocean Observing System (GOOS) iniciado en 1998, cuyo énfasis se encuentra en obtener y procesar información de los océanos (y también de la atmósfera) en tiempo real. En este diseño, las observaciones son la base para construir un modelo operacional. Estas son la fuente de los forzantes y condiciones iniciales de los modelos numéricos, que pueden integrar estos datos para mantenerse lo más próximo posible en su evolución al estado real del océano tal como es observado.

Un sistema de pronóstico oceanográfico se fundamenta en los mismos principios que sus antecesores sistemas de pronósticos atmosféricos/climáticos. Estos son, la integración de modelos numéricos junto con observaciones a través de la asimilación de datos con el fin de obtener resultados predictivos en la escala espacial y temporal deseada (Schiller & Brassington, 2011). Una amplia gama de resultados pueden ser obtenidos, incluyendo campos de vectores y series de tiempo para estudio euleriano de corrientes. Sus aplicaciones son de gran relevancia en el seguimiento de partículas, gestión ambiental, climatología oceánica, dispersión de antibióticos o hidrocarburos, eventos de anomalías térmicas, oleaje crítico, deriva de objetos, y aplicaciones industriales entre otras. A su vez, es posible acoplarse con módulos biogeoquímicos que ayuden a establecer los límites de capacidad de carga de los sistemas estudiados.

Este es un recurso ya ha implementado en distintos lugares del mundo para resolver diferentes problemas específicos y generales. Comenzando en países desarrollados, progresivamente se ha ido implementado en varios países en vías de desarrollo. Esta es una inversión que tarde o temprano impactará de forma beneficiosa las actividades económicas, el medio ambiente y la sociedad en general (enfoque ecosistémico).

Fijando la atención hacia países productores de salmónidos y por ende, con una geografía similar al sur de Chile, tenemos los casos de Noruega, Canadá y Escocia que junto a Chile constituyen más del 90% de la producción mundial de salmones (Aqua, 2015). En el caso noruego, la principal motivación para el establecimiento de estas herramientas es el potencial de proporcionar información ambiental en regiones costeras, relativas a los vertidos de petróleo, movimientos de cualquier objeto flotante (tareas de rescate), propagación de algas nocivas y de salmones, piojos de mar, etc. Para ello han implementado, entre otros modelos, el Nordic-4 y NorKyst-800 (Albretsen, 2011), que son modelos operacionales de distintas resoluciones (4 kilómetros y 800 metros respectivamente), cuyo énfasis está en pronósticos de nivel del mar (mareas y tormentas), corrientes e hidrografía de la costa noruega. Estos modelos aún están etapas de desarrollo, sin embargo cuentan con una amplia red de observaciones, lo que permite disminuir de manera significativa la incertidumbre de los pronósticos.

En Canadá existen una serie de programas orientados a desarrollar modelos operacionales amparados bajo el alero del “Centre for Ocean Model Development for Applications” (COMDA). Se destaca la iniciativa “CONCEPTS”, que en asociación con Mercator Ocean (IRD, Francia), buscan establecer una capacidad de investigación y predicción, para desarrollar y poner en práctica un sistema operacional acoplado entre atmósfera, océano y hielo para la costa de Canadá. En Escocia, junto con la industria salmonera, la creciente industria de energía mareomotriz presente al norte del Reino Unido ha impulsado el desarrollo de sistemas operacionales, entre los que destaca el “National Centre of Ocean Forecast” (NCOF).

Sin embargo, cabe destacar que la implementación de un modelo operacional requiere asumir elevados costos, entre ellos la adquisición y mantención de computadores de alto rendimiento (Hight Performance Computers), una red observacional en terreno suficiente que permita cubrir el área a modelar, y un centro de control de calidad y asimilación de datos. Estos elementos poseen una significativa complejidad y establecen un desafío para las instituciones vinculadas, por lo que es fundamental contar con cooperaciones inter-institucionales. La experiencia internacional así lo avala, tomando por ejemplo el Modelo Operacional Mercator, el cual fue producto de un desarrollo conjunto de 6 instituciones públicas: El Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia (CNRS), el Centro Nacional para la Explotación de los Océanos (IFREMER), el Instituto de Investigación para

el Desarrollo (IRD), Météo-France, el Servicio Naval Hidrográfico y Oceanográfico de Francia (SHOM), y el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES). Mayores detalles sobre sistemas operacionales pueden encontrarse en el Anexo A (Componentes de un sistema operacional).

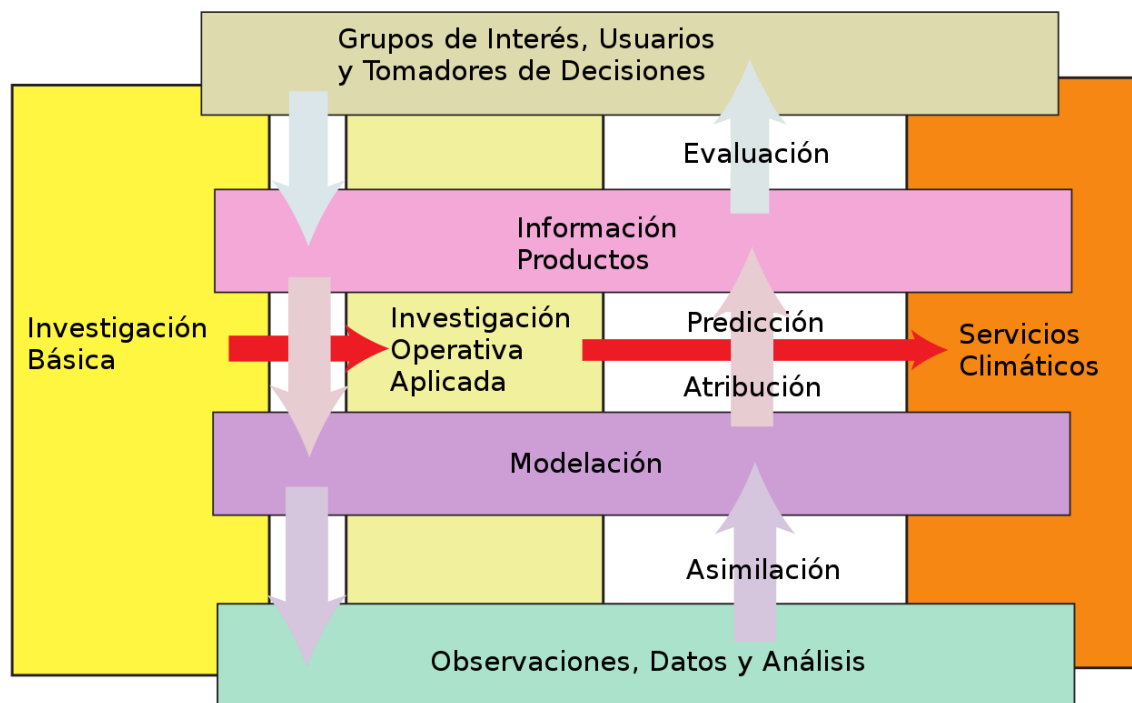


Figura 1: Marco conceptual para un sistema de información sobre el clima. Fuente: Modificado de la figura 2 de Trenberth (2008), Boletín de la OMM 57 (1).

En Chile, el desarrollo de sistemas operacionales está acotado a dos experiencias: El primero de ellos data del año 2004 basado en el proyecto “Manejo integral de la salmonicultura a través de un enfoque ecosistémico utilizando técnicas de percepción remota y tecnologías oceanográficas de última generación”. Este fue desarrollado en conjunto por Intesal de Salmonchile y las empresas AquaChile, Fjord Seafood, Marine Harvest Chile, Salmones Chiloé y Salmones Multiexport, enmarcado en el Fondo de Desarrollo e Innovación (FDI) de Corfo.

La otra experiencia se ejecutó entre Septiembre 2008 y Marzo 2012, bajo el proyecto "Sistema de Monitoreo y Pronóstico de las Condiciones Oceanográficas para la Gestión Productiva y Pública del Océano Costero: Fase I (SIPO), financiado por INNOVA CORFO y ejecutado por la Universidad Católica del Norte, el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) y la Universidad de Concepción, junto con el Instituto de Fomento Pesquero como entidad asociada, además de la colaboración del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, empresas acuícolas y sindicatos de pescadores artesanales locales. El proyecto logró desarrollar un sistema de observación y modelación costera para la IV Región. Los productos de monitoreo a tiempo real, monitoreo oceanográfico por cruceros,

pronósticos meteorológicos, oceanográficos y biofísicos se distribuían públicamente en la página web del mismo. Algunas conclusiones finales respecto a la modelación en este proyecto son:

- El proceso de validación tomó mayor tiempo del esperado. De acuerdo a la planificación este proceso se prolongaría solo durante la Etapa 2. Sin embargo, el proceso de validación y ajuste de los modelos no se detuvo en esta etapa dado que debe ser un proceso continuo a fin de perfeccionar los modelos permanentemente.
- Configuraciones razonablemente validadas a meso-escala no son suficientes para abordar estudios sobre especies costeras con fines de asesoramiento para el manejo. Para una validación con mayor detalle en la costa, se requieren datos oceanográficos e información adicional. Esta conclusión se basa en que los patrones de conectividad de sitios costeros, de relevancia acuícola y pesquera, derivados de simulaciones basadas en el individuo acopladas a las diferentes salidas hidrodinámicas difieren de características tales como distancias de conectividad máxima, nivel de auto-reclutamiento, estructura de conexión a lo largo de la costa evaluada a meso-escala, tasas de retención/advección sobre la plataforma continental, entre otros.

1.3 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 en un horizonte de 3 días. Desde un comienzo se establece un trabajo de cooperación con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, quienes asesoran el trabajo realizado. De igual forma se generan convenios de cooperación con la Dirección Meteorológica de Chile que permitan acceder a modelos operacionales atmosféricos para la zona de estudio, elemento indispensable en estos sistemas, y un par de convenios con COPAS Sur-Austral (www.sur-austral.cl) y MUSELS (www.eula.cl/musels) para aumentar la cobertura de mediciones de variables en terreno. Como se menciona anteriormente, a partir de un modelo operacional podemos obtener 3 tipos de productos: modelos retrospectivos (*Hindcast*), modelos precisos para el estado actual del océano (*Nowcast*) y modelos que representen el estado futuro del océano a través de pronósticos (*Forecast*).

Para ello se construyó un marco conceptual donde se establece el diseño de un sistema operacional cuyo dominio comprende las regiones de Los Lagos y de Aysén en el sur de Chile. Este diagrama conceptual contiene todos los módulos que debiesen ser incorporados

en el sistema (Fig. 2) y está compuesto por varios módulos que satisfacen distintas necesidades del modelo. En esta fase se implementará un modelo hidrodinámico que funcionará de manera acoplada con un modelo atmosférico basado en WRF (modelo atmosférico de código abierto), un sistema que extraiga condiciones iniciales y de borde de modelos globales (MERCATOR/GFS), y de manera experimental, se implementará un modelo hidrológico desacoplado que otorgue las descargas fluviales más importantes de la zona, mientras se evalúan sus resultados, se utilizarán datos climatológicos publicados por la Dirección General de Aguas (DGA).

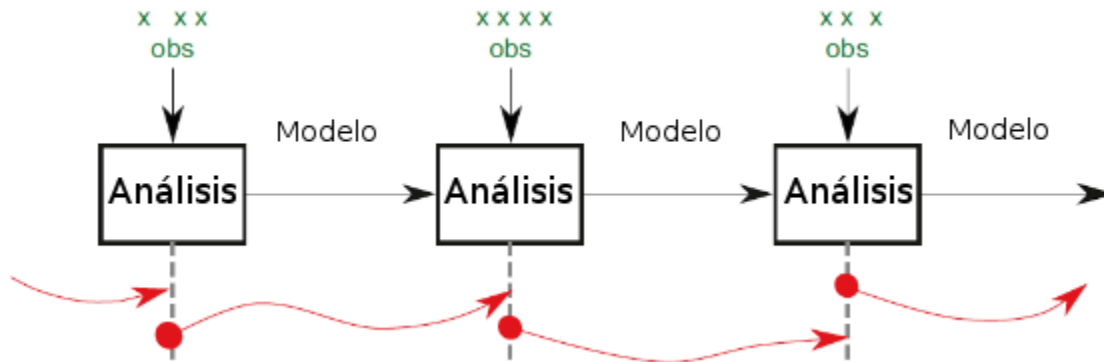


Figura 2: Análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo. Las líneas rojas indican el estado del océano predicho a partir de condiciones iniciales en el tiempo de análisis (puntos rojos). Las observaciones obtenidas dentro de la ventana de análisis (verde) se han agrupado y asimilado solo en los tiempos de análisis. Fuente: Modificado de Schiller & Brassington (2011).

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 desarrollar un sistema de predicción operacional para la zona sur austral de Chile para aplicaciones a problemáticas asociadas a la acuicultura. En la figura 3 podemos ver el desarrollo de las etapas previas. En específico, este proyecto forma parte de la cuarta etapa de desarrollo.

- **Etapas I: 2014 – 2015:** En líneas generales, la primera etapa de este proyecto incluyó el diseño del sistema, además de la implementación del modelo hidrodinámico ROMS-AGRIF, denominado para los fines del proyecto como MOSA-ROMS (Modelo Operacional Sur-Austral). Su estructura operacional, esta integrado con información del modelo global oceanográfico MERCATOR-Ocean y con el pronóstico atmosférico Global Forecast System (GFS). Este modelo se

evaluó preliminarmente con datos históricos. Todo esto acoplado a un sistema que permite visualizar los resultados en línea montados en el servidor web del proyecto (www.ifop.cl/chonos). También se incluyó un diagnóstico de información oceanográfica disponible actualmente para su eventual uso y las perspectivas a corto plazo para generación de nuevos puntos de observación.

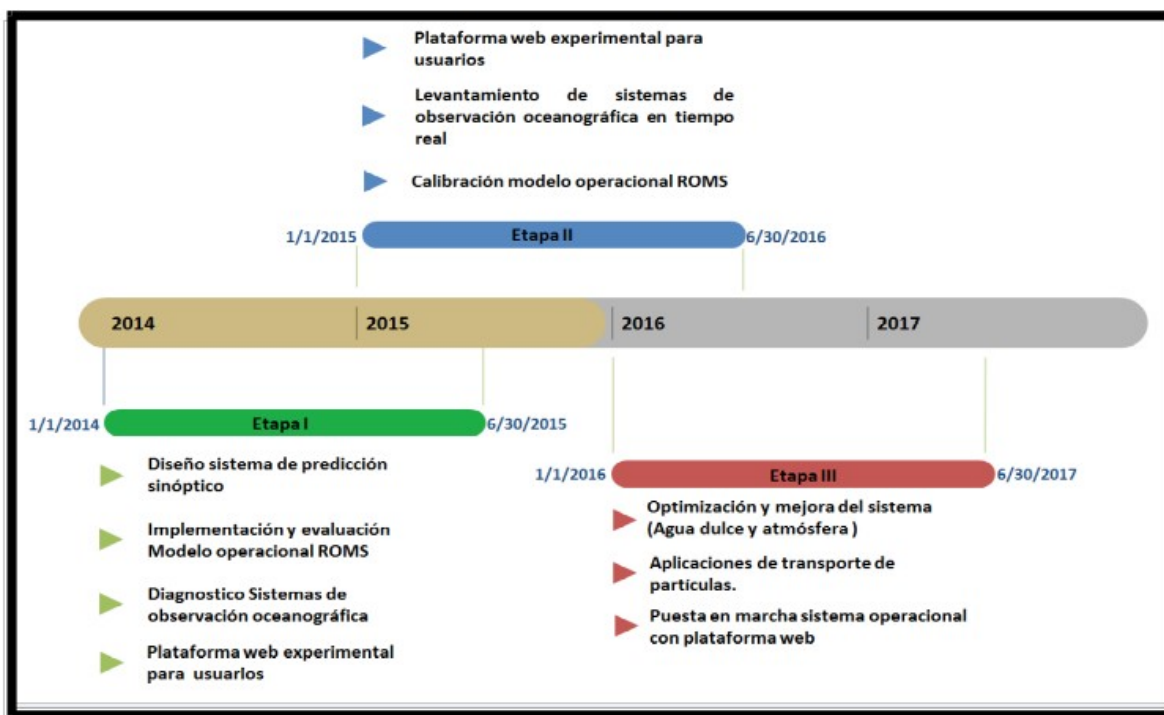


Figura 3: Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional de las tres etapas de la fase uno (2014 – 2017).

- **Etapa II: 2015 – 2016:** En esta etapa, el énfasis fue puesto en la calibración y evaluación del modelo para mejorar su calidad y disminuir los rangos de errores encontrados en la etapa previa y así tener un modelo lo más consistente posible. Para esto se realizó una evaluación de patrones oceanográficos generales del sistema a través de información de literatura científica y de observaciones recopiladas por el IFOP y otras instituciones. Además se evaluaron diseños de tecnologías de transmisión de datos en tiempo real en nuevos puntos de observación.
- **Etapa III: 2016 – 2017:** En esta etapa y luego del proceso de calibración del modelo en la etapa anterior, se generaron aplicaciones web, principalmente enfocadas a herramientas que permiten calcular el transporte de material disuelto o particulado, esto con el fin de conocer con antelación el posible transportes de materiales riesgosos asociado a la acuicultura (antibióticos, patógenos, etc.).

- **Etapa IV: 2017 – 2018:** En esta etapa, se evaluó el desempeño de MOSA-ROMS, a través de diferentes modificaciones en las condiciones iniciales, forzantes atmosféricos y calibraciones en general. Además se perfeccionó la herramienta de dispersión de partículas (Parti-MOSA) y se lanzó oficialmente una página web (CHONOS) donde se pueden encontrar los resultados de MOSA-ROMS y Parti-MOSA entre otros productos. La página web puede ser revisada en www.ifop.cl/chonos.
- **Etapa V: 2018 – 2019:** Esta es la etapa actual del proyecto. En esta etapa se mantiene los experimentos con el fin de disminuir los rangos de errores de las distintas variables ambientales en el modelo MOSA-ROMS. Se pretende que las partículas de Parti-MOSA pueden interactuar con el ambiente. A su vez, se evaluará la factibilidad técnica de implementar un modelo biogeoquímico. Finalmente, se actualizará la página web CHONOS, incorporando nuevos productos y mejorando la visualización de resultados.

Un modelo operacional de pronóstico debe seguir un conjunto de pasos lógicos de la manera más automática posible. A grandes rasgos esta operación cuenta con información que es utilizada como entrada en el modelo y productos que son generados por el modelo en sí. Un esquema del diseño de automatización implementado es resumido en la figura 4.

El modelo actualmente cuenta con una resolución espacial de ~ 1 km y con 42 niveles verticales que se ajustan a la topografía. Las condiciones de borde son tomadas desde Mercator-Ocean. Los forzantes atmosféricos son tomados desde WRF, que a su vez se alimenta de GFS. La condición inicial es tomada desde el mismo modelo MOSA-ROMS, usando la condición simulada el día anterior. Las fuentes de agua dulce son tomadas desde la DGA y los armónicos de marea desde TPXO7. Una vez generada la información de entrada el modelo es iniciado en el equipo computacional ubicado en IFOP-Castro (Anexo B). En este paso se escogen las parametrizaciones físicas y la cantidad de procesadores a utilizar. Una vez terminada las simulaciones, la información generada es subida a la plataforma web (www.ifop.cl/chonos). Con esta información es posible visualizar el pronóstico realizado y utilizar la herramienta de dispersión de partículas (Parti-MOSA).

En resumen, en este informe presentamos el diseño y la implementación del modelo operacional Sur-Austral en su etapa V de desarrollo. El objetivo principal de este proyecto es establecer un desarrollo a largo plazo, que logre reproducir la hidrodinámica del sistema y generar un base de información y conocimiento. Este desarrollo está enmarcado dentro de los proyectos de Asesoría Integral Para la Acuicultura (ASIPA), que es un convenio entre Subpesca, Ministerio de Economía e IFOP, el cual, 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.

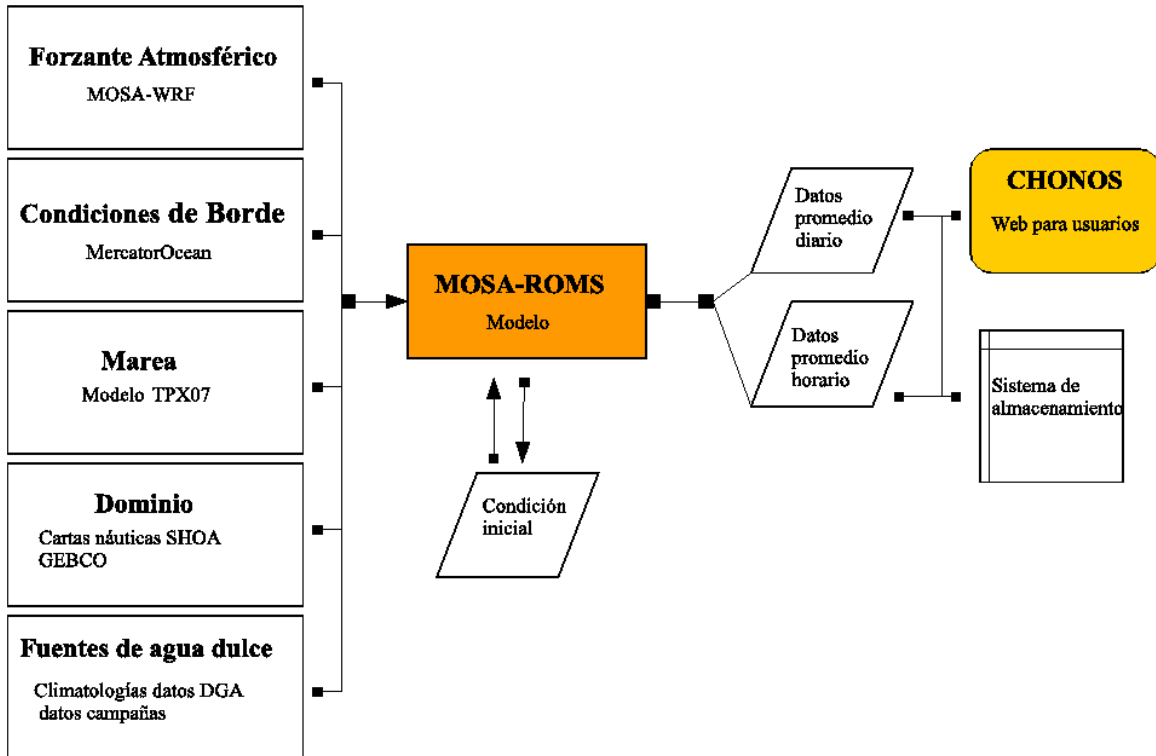


Figura 4: Diagrama de flujos que describe las componentes presentes en la automatización del modelo oceanográfico operacional Sur-Austral, MOSA-ROMS.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Implementación de un sistema operacional oceanográfico regional para la zona Sur Austral de Chile, región de Los Lagos y región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Optimizar el sistema operacional oceanográfico para la región de Los Lagos y la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

2.2.2 Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas en tiempo real.

2.2.3 Perfeccionar la plataforma de visualización de resultados y aplicaciones.

3. METODOLOGÍA

MOSA-ROMS está basado en el modelo oceanográfico regional “Regional Ocean Modelling System, Adaptive Grid Refinement in Fortran” (ROMS AGRIF, Debreu et al., 2012). Esta versi3n es desarrollada por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en Francia. ROMS AGRIF es un modelo de circulaci3n oceánica hidrostático que resuelve las ecuaciones primitivas de conservaci3n de momento, energía y masa sobre una grilla rectangular estructurada (Anexo C). MOSA-ROMS utiliza una malla horizontal estructurada tipo Arakawa-C (Arakawa & Lamb, 1981). Cada elemento es un rectángulo curvilíneo, en cuyos lados se componen las componentes de velocidad zonales y meridionales u y v , respectivamente. Las variables potenciales (temperatura, salinidad, presi3n) son calculadas en el centro del rectángulo. La mayor ventaja de este tipo de mallas es que permite una mayor estabilidad numérica para la discretizaci3n de las ecuaciones en el tiempo y en el espacio. En la vertical, se utilizan niveles verticales que siguen la topografía, lo que se conoce como distribuci3n tipo sigma.

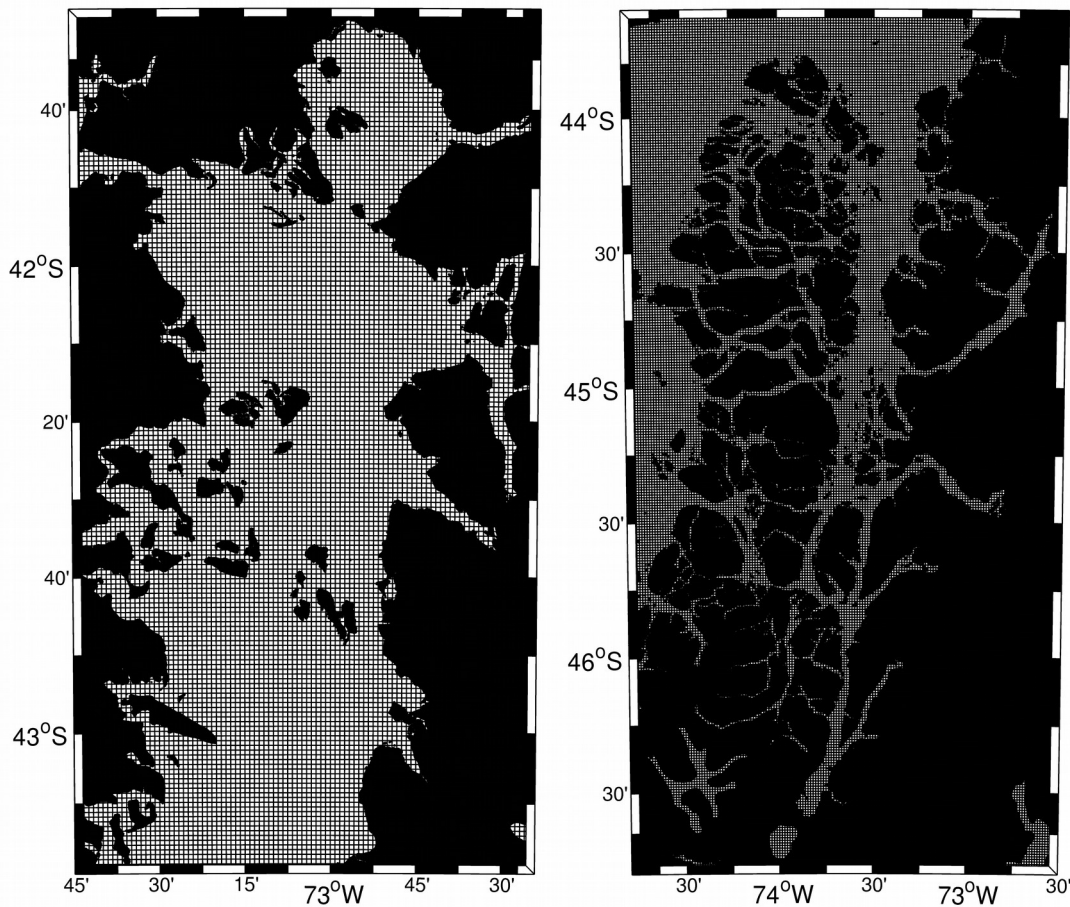


Figura 5: Distribuci3n de elementos horizontales en MOSA, se divide la figura por regi3n para que se puedan apreciar los elementos, los cuales poseen una resoluci3n de $\sim 1\text{km}$.

El dominio de MOSA-ROMS comprende las regiones de Los Lagos y Aysén, limitando entre el Seno Reloncaví por el norte y la Península de Taitao por el sur, incluyendo la costa continental oriental de la región comprendida, mientras que el borde occidental se ubica en los 79 °W (Fig. 5). Los elementos horizontales en MOSA-ROMS tienen una resolución ~1km. El modelo de elevación digital es construido con datos batimétricos de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), complementada con información del producto General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) y proyectos locales de mediciones multihaz.

En la etapa I de este proyecto, la condición inicial del modelo fue preparada desde campos 3D de velocidad, temperatura, salinidad y nivel del mar en todo el dominio usando interpolación lineal desde el producto de pronóstico Mercator-Ocean (Drévillon et al., 2008). Esta condición inicial es estable numéricamente y fue usada con el fin de mezclar el agua dentro del área de estudio hasta lograr un modelo conservativo. Una vez lograda cierta estabilidad en el modelo, se comenzó a utilizar una condición inicial creada a partir del pronóstico generado el día anterior. De esta manera, MOSA-ROMS es capaz de construir estructuras termohalinas de largo plazo y de reproducir variabilidad estacional en las condiciones oceanográficas.

Es necesario contar con información de las variables del sistema tanto horizontal como verticalmente para resolver las ecuaciones primitivas en cada paso de tiempo. Estas variables son velocidad de la corriente, temperatura, salinidad y nivel del mar. Este conjunto de variables con una cierta variabilidad temporal es lo que conocemos como condiciones de borde o de frontera. En nuestro caso particular, la información de estas variables es entregada al modelo con una variabilidad temporal diaria solo en los bordes abiertos del dominio. Los bordes abiertos son aquellos límites por los cuales existe un transporte de agua asociado. A su vez, a lo largo los bordes abiertos se utiliza una capa esponja de un ancho de 10 km, para evitar ruidos y generación de ondas ficticias producidas por reflexión de ondas en los bordes (Penven et al., 2006). Actualmente el modelo utiliza condiciones de borde interpoladas desde Mercator-Ocean. En el caso de la onda de marea, esta fue amortiguada al comienzo de las pruebas del pronóstico operacional, para evitar grandes inestabilidades en el campo de presión. Actualmente se utilizan 10 armónicos de marea sin amortiguamiento. Estos datos son derivados desde el producto de modelación inversa de mareas barotrópicas TPXO7 (Egbert & Erofeeva, 2002).

Para el caso de la superficie libre del agua se necesita información atmosférica como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor de onda larga y onda corta, precipitación, y humedad. El forzante atmosférico es una parte fundamental de cualquier modelo oceánico, ya que la circulación y la distribución de propiedades conservativas y no conservativas presentes en niveles superficiales y subsuperficiales están altamente relacionada con el viento. Los campos de las variables atmosféricas son obtenidos de

pronósticos atmosféricos basados en el modelo Weather Research Forecast (WRF, Skamarock et al., 2005) realizados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) especialmente para el dominio Chiloé - Aysén de MOSA-ROMS con una resolución horizontal de 12 km, sin embargo como se mencionará mas adelante, se está implementó un modelo atmosférico operacional también basado en WRF (MOSA-WRF) con una resolución espacial de 5 km, el cual comenzará a utilizarse desde septiembre de este año.

El modelo WRF tiene un módulo no hidrostático, que permite el libre movimiento de las parcelas de aire en la vertical. También tiene un sistema de coordenadas eulerianas, en donde el observador se encuentra fijo con respecto al movimiento del fluido. Por otra parte, el desarrollo del sistema de asimilación de datos y su arquitectura de software facilita la computación paralela y la extensibilidad del sistema. Además, posee un sistema de coordenadas verticales denotadas por η , las cuales siguen el terreno basándose en la presión hidrostática y una grilla tipo Arakawa-C para las coordenadas horizontales. Los detalles del funcionamiento del modelo MOSA-WRF se pueden encontrar en el Anexo D.

Otro forzante en el modelo es el ingreso de fuentes de agua dulce, las cuales modifican la estructura de la pycnoclina en las zonas costeras y en la zona de fiordos. Este aporte cumple un rol fundamental en la circulación estuarina desarrollando flujos gravitacionales que transportan aguas de baja salinidad a la boca de los fiordos. Las fuentes de agua dulce son ingresadas como fuentes puntuales, con un caudal variable o fijo en el tiempo, dependiendo de la disponibilidad de datos, los cuales son obtenidos de modelos hidrológicos y de datos climatológicos de la Dirección General de Aguas (DGA). Actualmente el modelo utiliza 33 fuentes puntuales de agua dulce con una variabilidad mensual.

3.1 Metodología objetivo específico 1: Optimizar y calibrar el sistema operacional oceanográfico para la región de Los Lagos y la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

Basado en el modelo operacional actualmente en funcionamiento, se mejorará el desempeño del sistema operacional en los siguientes tópicos:

3.1.1 Mejoramiento condición inicial

La calidad del pronóstico está estrechamente ligada a la calidad de sus condiciones iniciales. Por este motivo se debe trabajar en disminuir los rangos de errores asociados a la interpolación de productos de más bajas resoluciones como Mercator-Ocean, o de las desviaciones que puede presentar en el tiempo una condición inicial retro-alimentada, como la que utiliza actualmente MOSA-ROMS. Un objetivo persistente en el tiempo es explorar

metodologías que permitan disminuir la incertidumbre y los rangos de error en la condición inicial utilizada diariamente en el pronóstico operacional.

Durante la ejecución de este proyecto se han estudiado algunas alternativas para mejorar la condición inicial. Algunas soluciones fueron reconstruir una condición inicial en base a data histórica de campañas oceanográficas de IFOP en la zona o utilizando técnicas de asimilación de datos en base a información *in situ* disponible. Sin embargo, estas propuestas no resultaron adecuadas, ya que si bien existe una gran cantidad de datos históricos, estos son insuficientes para obtener una buena cobertura del dominio. Por otra parte, las técnicas de asimilación de datos son costosas numéricamente por lo que su implementación va a depender de aumentar el poder computacional para asegurar la estabilidad del modelo y los tiempos de computo para responder ante eventuales emergencias.

Para evaluar el impacto que puede tener utilizar una condición inicial modificada realizamos un experimento utilizando una técnica de asimilación simple, denominada Ocen “Observation Simulation Experiment” (OOSE). Esta técnica permite medir la eficacia de una red observacional y discriminar que datos asimilados tienen mayor impacto en las simulaciones y logran mejoras en los pronósticos (Atlas, 1997).

El experimento consistió en tomar los resultados horarios del pronóstico MOSA-ROMS del día 28 de marzo de 2018. Este día fue escogido al azar sin ninguna razón en particular. De la condición inicial de ese día se extrajeron puntos de temperatura superficial del mar (SST) grillados cada 10 kilómetros. Consideraremos estos datos de SST como si fueran observaciones y por lo tanto los datos reales a asimilar. Para perturbar la condición inicial, combinaremos estos valores con los datos de SST de otro día en particular, en nuestro caso escogimos sin ninguna razón especial el día 10 de marzo de 2018. Nos referiremos a esta simulación como (TEST-A).

Por lo tanto, simularemos un pronóstico a 72 horas desde el día 28 de marzo con una condición inicial de SST con datos asimilados. Los errores asociados a la incorporación de datos asimilados fueron estudiados comparándolos con los resultados del pronóstico original. Calculamos las diferencias entre los campos de SST a 24, 48 y 72 horas de pronóstico y en 3 puntos de control en el seno Reloncaví, golfo Corcovado y estero Elefantes.

3.1.2 Mejoramiento de las fuentes de agua dulce

Reproducir adecuadamente la circulación estuarina dentro del mar interior de Chiloé y poder representar los flujos de 2 o 3 capas típicos de esta zona es un desafío constante dentro de la modelación numérica y por lo mismo del pronóstico operacional. El principal

problema que se genera al incorporar aportes de agua dulce con intensos caudales en canales de limitada resolución espacial (en largo, ancho o profundidad) es que estos flujos producen inestabilidades numéricas. Por lo mismo, en esta tarea se ha pasado por diferentes pruebas, modificando la cantidad de ríos, la variabilidad temporal e incluso amortiguando los valores de los caudales. Al comenzar esta etapa MOSA-ROMS funcionaba con 25 ríos o fuentes puntuales (Tabla 1) dentro de los fiordos patagónicos con una variabilidad temporal mensual.

Tabla 1: Descripción ubicación de las fuentes puntuales de agua dulce.

	Latitud (°S)	Longitud (°E)	Lugar representativo		Latitud (°S)	Longitud (°E)	Lugar representativo
1	45.4143	72.8056	Río Aysén	14	45.3558	73.0556	Río Cuervo
2	45.8513	73.5278	Río de los Huemules	15	41.3907	72.3056	Río Petrohué
3	46.0252	73.3472	Río Blanco	16	41.6507	72.3333	Río Puelo
4	46.2945	73.4861	Río Exploradores	17	41.9716	72.4583	Hornopirén
5	46.5148	73.7778	Laguna San Rafael 1	18	42.2497	72.4583	Río Mirta
6	46.6865	73.8889	Laguna San Rafael 2	19	42.4345	72.4167	Río Vodudahue
7	41.5052	72.8333	Río Chamiza	20	42.5778	72.5278	Río Reñihue
8	41.8682	73.8056	Estero Coipomo	21	42.7412	72.8472	Río Negro
9	42.0541	74.0417	Río Chepu	22	44.5004	72.5972	Río Queulat
10	42.6596	74.1250	Lago Cucao	23	42.9551	72.7639	Río Yelcho
11	44.7377	72.6944	Río Cisnes	24	43.2592	72.9444	Río Corcovado
12	41.6195	73.6806	Río Maullín	25	43.6524	72.9583	Río Tictoc
13	43.7628	72.9722	Río Palena	-			

La climatología mensual generada para estos ríos proviene de datos de la dirección general de aguas (DGA). Dado que no se cuenta con información para todos los lugares seleccionados, se llevó a cabo una interpolación desde los datos de cuencas hídricas dadas por la DGA en su balance hídrico de Chile de 1987. Para esto se identificaron cada una de las cuencas y sub-cuencas de relevancia utilizando un criterio de umbral proporcional a la extensión promedio de todas las cuencas de una sub-cuenca. Estas cuencas y sub-cuencas fueron discretizadas a partir de archivos de capas SIG derivados de modelos de elevación digital topográficos (DEM). Estos DEM engloban las áreas que se encuentran dentro de una misma divisoria de aguas común que desalojan a cota cero.

De este modo, los caudales de una cuenca sin información son extrapolados desde una cuenca con caudales conocidos. El valor del caudal de la cuenca sin información se estima mediante una relación entre la superficie de ambas cuencas. Para esto usamos como referencia las estaciones de la DGA con resolución diaria. Las brechas que no superan el mes de medición son interpolados de manera lineal. Luego, para cada día se extrae el porcentaje que supone este día en la descarga total anual y tal porcentaje se aplica a las cuencas/sub-cuencas hídricas. De esta manera, las sub-cuencas presentan una curva de distribución de la descarga mensual durante un año de distinta magnitud pero que siguen el mismo patrón de distribución temporal. Se observa que casi todos los ríos se ubican en la zona continental de Chile (22/25 ríos) y que solo 4 ríos superan los 500 m³/s de caudal promedio anual.

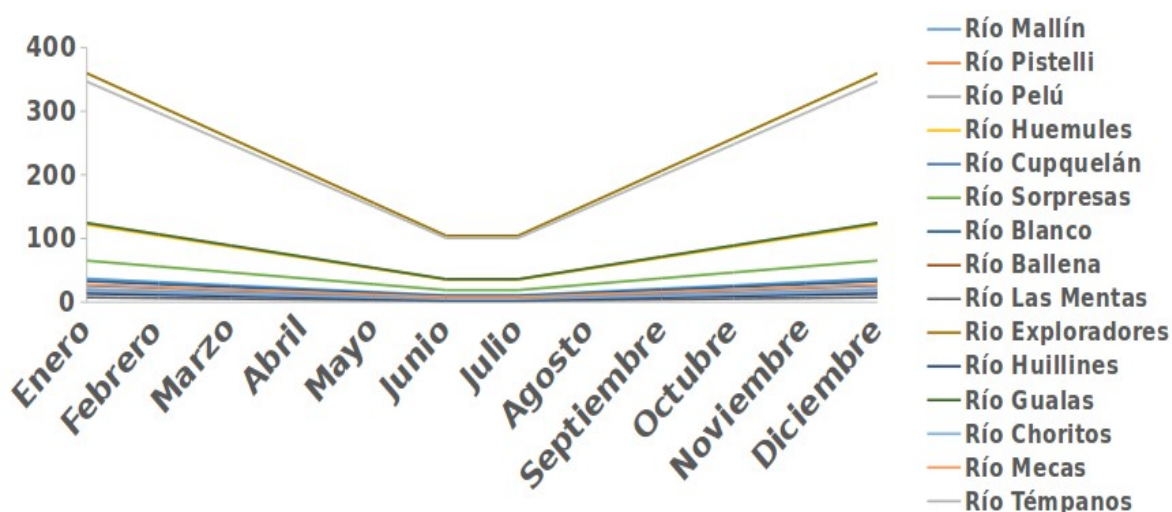


Figura 6: Climatología con variabilidad mensual usada en campos de hielo norte y el estero Elefantes para ser incorporada al pronóstico operativo.

En esta etapa agregamos nueva información de caudales de ríos en la zona de campos de hielo norte y del estero Elefantes. Esta información fue generada con datos obtenidas entre agosto de 2016 y abril de 2017 por la estación Patagonia de la Universidad Católica, como parte de las actividades del proyecto de oceanografía de IFOP “Determinación de caudales de ríos en la zona de Estero Elefantes”. Para este estudio se utilizó la información registrada por 3 sensores de nivel hidrométrico y sus correspondientes barómetros para compensar la presión atmosférica. Luego se seleccionaron 15 macro-cuencas con un área mínima de drenaje de 50 km². La variabilidad de estos datos son promedios mensuales (Fig. 6). Luego se realizó la misma estrategia usada anteriormente para las fuentes puntuales. Esta nueva base de datos nos permitió actualizar los caudales de 5 ríos (Tabla 2) y nos agregó 8 nuevas fuentes puntuales. Hay que notar que 2 macro-cuencas se juntaron como una fuente puntual. De esta manera, aumentamos las fuentes puntuales de agua dulce de

MOSA-ROMS de 25 a 33. Todos los flujos medios de las fuentes puntuales tienen una variabilidad mensual.

Tabla 2: Resumen ríos cuyos caudales y temperatura fueron actualizados con la información de campos de hielo norte y estero Elefantes.

Fuente puntual anterior	Nueva fuente puntual
Laguna San Rafael 2	Río Témpanos
Laguna San Rafael 1	Río Gualas
Río Exploradores	Río Exploradores
Río Blanco	Río Blanco y Río Sorpresas
Río Huemules	Río Huemules

Por otra parte, la laguna de San Rafael es una importante fuente de aporte de agua dulce sin advección a la zona, por lo cual no puede ser considerada como una fuente puntual dentro del modelo. Para solucionar este problema, en la etapa anterior de este proyecto agregamos esta agua dulce en superficie como agua de lluvia de manera exagerada (400 cm/día). Este valor fue cambiado a 200 cm/día en esta etapa, ya que el modelo presentó errores de inestabilidades numéricas debido al alto flujo.

Una vez corregido el valor de Campos de Hielo Sur y agregando las nuevas fuentes de agua dulce, se procedió a correr un modelo en forma paralela a MOSA-ROMS, entre los meses de julio y agosto de 2018, para evaluar su estabilidad e impacto en el modelo. Luego, se identificaron datos de CTD de campañas de IFOP realizadas en la zona para la época de invierno en años anteriores. Específicamente se utilizaron datos de CTD de agosto de 2016 realizados durante la campaña de invierno del proyecto “Modelación de alta resolución en el estero Elefantes, 2016”, los cuales fueron utilizados como puntos de control que permitan ver el efecto de las nuevas fuentes en la zona (Fig. 7).

Para la evaluación se procedió a extraer promedios diarios de temperatura y salinidad del primer día pronosticado en el modelo de MOSA-ROMS y en el modelo de pruebas con las nuevas fuentes ingresadas (MOSA-TEST) en las posiciones de los CTD antes mencionados durante los 15 primeros días de agosto, y estos valores llevados a un promedio general, para obtener un patrón representativo del periodo y comparable con los datos de CTD. Con los datos de MOSA-ROMS y MOSA-TEST se calculó la frecuencia de boyantes (N^2) en algunos puntos de la transecta y se compararon con perfiles de N^2 en los CTD, con el fin de observar el grado de estratificación presente en ambos casos.

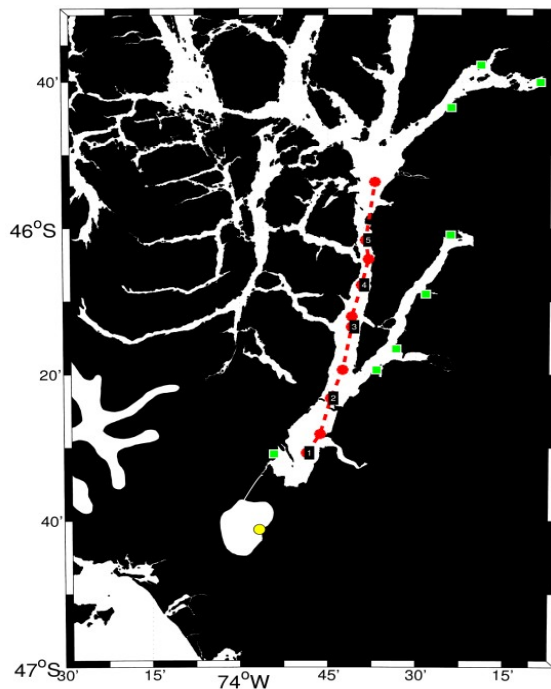


Figura 7: Ubicación de los puntos de CTD utilizados (en rojo), ubicación de las nuevas fuentes de agua dulce ingresadas (en verde), y fuente sobre la Laguna San Rafael (circulo amarillo).

En paralelo, se ha trabajado en etapas previas a acoplar a MOSA-ROMS un modelo hidrológico para reproducir de manera mas adecuada la circulación estuarina. Con anterioridad se realizaron consultorías para la obtención de un modelo hidrológico en la zona, sin embargo se mostraron insuficientes para cumplir con los requerimientos que el constante desarrollo de los modelos de IFOP demandan: reproducir ciclos estacionales propios de los regímenes de cada río y mantención del balance de agua dulce del sistema completo (inclusión de volúmenes de agua de ríos pequeños por debajo de la escala del modelo), junto a pronóstico de caudales para el acoplamiento a los modelos de pronóstico oceanográficos de IFOP. A estas demandas también se suma la necesidad de disponer de una plataforma de acceso y navegación interactiva a los grandes volúmenes de información que se generen de una forma interactiva e intuitiva, de manera que permita el uso eficaz tanto para la comunidad de IFOP como un posible uso público de así considerarse. En esta etapa se contrató una asesoría, cuyo objetivo es la construcción de un modelo numérico hidrológico que estime caudales de fuentes de agua dulce, en tiempos pasados (hindcast), en los puntos de descarga de éstas (ríos y glaciares) a los mares de las regiones de los Lagos y de Aysén. Se espera contar con esta información dentro de este año y realizar pruebas de estabilidad para agregar al modelo operacional durante la etapa VI de este proyecto.

3.1.3 Mejoramiento de forzante atmosférico

Un factor relevante en el desempeño de un pronóstico hidrodinámico operacional es lograr una buena reproducción del forzante atmosférico, especialmente en la región de estudio dado su fuerte impacto en la dinámica regional y local (Letelier et al., 2011). La accidentada topografía presente en la región juega un rol fundamental en la dinámica atmosférica de baja altura, permitiendo canalizar los vientos a lo largo de sus abundantes valles, fiordos y canales, dando paso al desarrollo de patrones locales de circulación, que modelos de gruesa resolución no son capaces de resolver adecuadamente.

Actualmente, para forzar la superficie de MOSA-ROMS se utiliza salidas del modelo WRF facilitado por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). Este producto tiene una resolución horizontal de 12 km, la cual en gran parte del dominio no logra resolver la geomorfología compleja que está presente en esta región. Producto de esta limitación implementamos un pronóstico atmosférico operacional basado en el modelo WRF con una resolución de 5 km (MOSA-WRF), buscando así, un manejo propio de las configuraciones y operatividad del sistema, además de un aumento en la resolución espacial con respecto al producto que actualmente entrega la DMC, y así representar con mayor precisión el sistema de fiordos y canales que componen esta zona, y a su vez los patrones de circulación atmosférica modulados en gran parte por esta topografía.

Este proceso fue posible mediante dominios anidados, cuyo principio se basa en situar un dominio de mayor resolución espacial (denominado hijo) dentro de otro dominio de menor resolución espacial (denominado padre). En general se sigue una relación de 1:3 o 1:5 de resolución horizontal con respecto al padre, básicamente para evitar errores numéricos propios del procesos de anidamiento. Este método resulta esencial, especialmente para la zona de canales y fiordos de las regiones de Los Lagos y Aysén, cuyas dimensiones en su mayoría presentan valores bajo los 12 km.

El primer paso fue establecer dominios anidados con el modelo WRF, con diferentes resoluciones espaciales, para luego evaluar su factibilidad en términos de la operatividad del pronóstico. Estas pruebas se realizaron en el mismo servidor donde actualmente opera MOSA-ROMS, conformado por 48 núcleos computacionales destinados para el cálculo numérico.

Se construyeron 4 escenarios y se estudió su desempeño en términos de tiempo de computo durante un día. Los dominios se centraron en la zona del mar interior de las regiones de Los Lagos y Aysén ($\sim 41\text{--}47.5^\circ\text{S}$ y $71\text{--}78.5^\circ\text{W}$). Se construyeron con proyección geográfica Lambert y con datos topográficos de la USGS con ~ 900 m de resolución horizontal (30'' de arco). Se utilizaron 28 niveles verticales sigma, los cuales

siguen la topografía del terreno. A su vez, se utilizó como forzante el modelo global de predicción atmosférica Global Forecast System (GFS) de 0.25° de resolución horizontal.

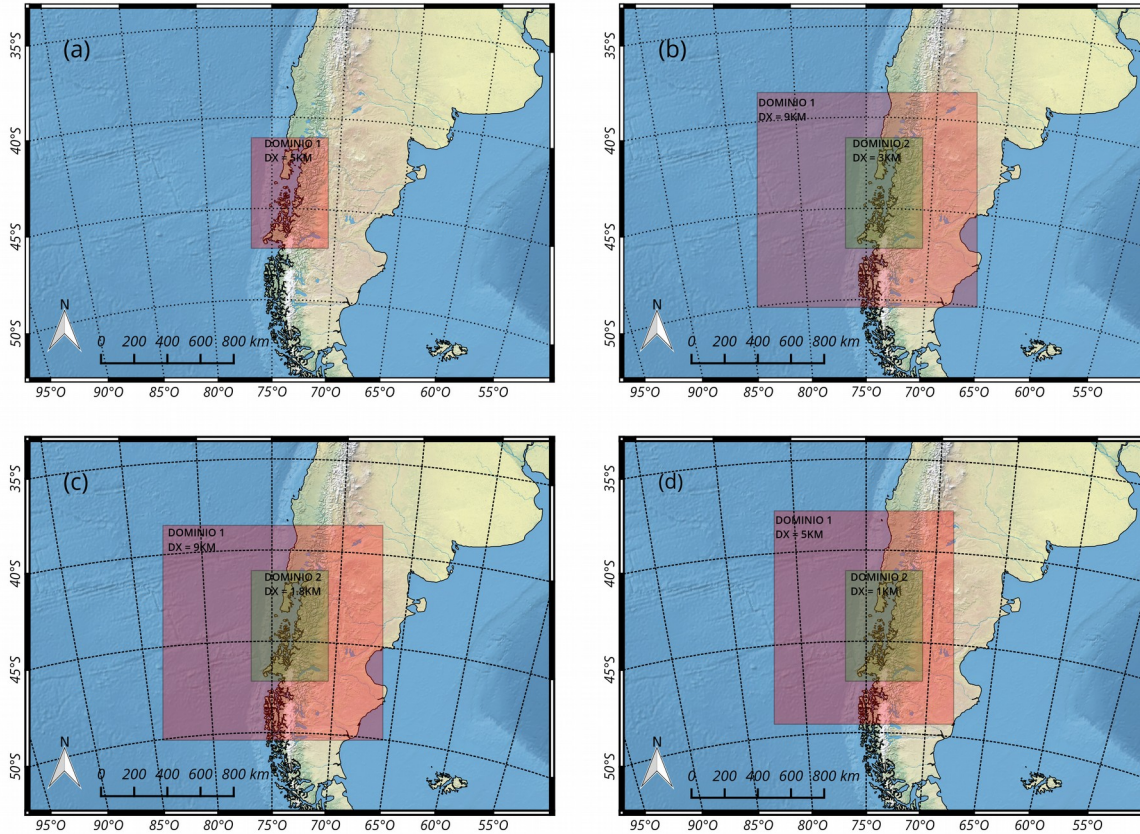


Figura 8: Dominios de prueba para el modelo MOSA-WRF a diferentes resoluciones espaciales: (a) 1 dominio de 5 km (b) 2 dominios de 9 km y 3 km. (c) 2 dominios de 9 km y 1.8 km (d) 2 dominios de 5 km y 1 km.

El primer escenario se constituyó por un dominio padre compuesto de 120x160 elementos con una resolución espacial a razón 1:5 desde los datos GFS (Fig. 8a), con lo que se aumenta la resolución horizontal de ~ 25 km a 5 km. El segundo escenario consistió en dos dominios con una razón de escala 1:3 (Fig. 8b). De esta manera se obtuvo un dominio padre de 9 km y un dominio hijo de 3 km de resolución espacial. El tamaño de las matrices fue de 140x160 y 145x226 para los dominios padre e hijo, respectivamente. El tercer escenario se fijó con dos dominios (Fig. 8c). El dominio padre, nuevamente se obtuvo mediante la relación 1:3, alcanzando los 9 km y manteniendo la matriz de 140x160 elementos. Por otro lado, el dominio hijo siguió una relación de 1:5 con respecto al padre, obteniendo una resolución espacial de 1.8 km y una matriz de 231x356 elementos. Finalmente, se diseñó un escenario compuesto por dos dominios con una relación de 1:5 (Fig. 8d). De este modo, se obtuvieron dos dominios de 5 km y 1 km para el dominio padre e hijo, respectivamente. El tamaño de los dominios fue de 100x127 y 231x266 elementos de grilla. Cabe notar que este último escenario no logró ser estable numéricamente.

Los tiempos de c3mputo, junto con el resumen de los dominios son presentados en la Tabla 3. Se observ3 que el menor tiempo empleado para la ejecuci3n del pron3stico, corresponde al escenario 1, tal como era esperable, al ser solo un dominio y tener la grilla de menor tama1o de elementos. Por lo tanto, se implement3 como pron3stico operacional, la configuraci3n del escenario 1. Las salidas se establecieron cada 1 hora y se activ3 la opci3n de series de tiempo para obtener estaciones virtuales en los puntos que conforman la red meteorol3gica instalada por IFOP (descritas en la secci3n 3.2).

Tabla 3: Resumen de las diferentes configuraciones del pron3stico operacional MOSA-WRF.

Escenario	dx padre (km)	dx hijo (km)	# Elementos padre	# Elementos hijo	Tiempo simulaci3n: 1 d3a pron3stico (min)
1	5	-	120x160	-	30
2	9	3	140x160	145x226	90
3	9	1.8	140x160	231x356	240
4	5	1	220x260	531x666	-

SISTEMA DE PRON3STICOS ATMOSF3RICOS
MOSA-WRF

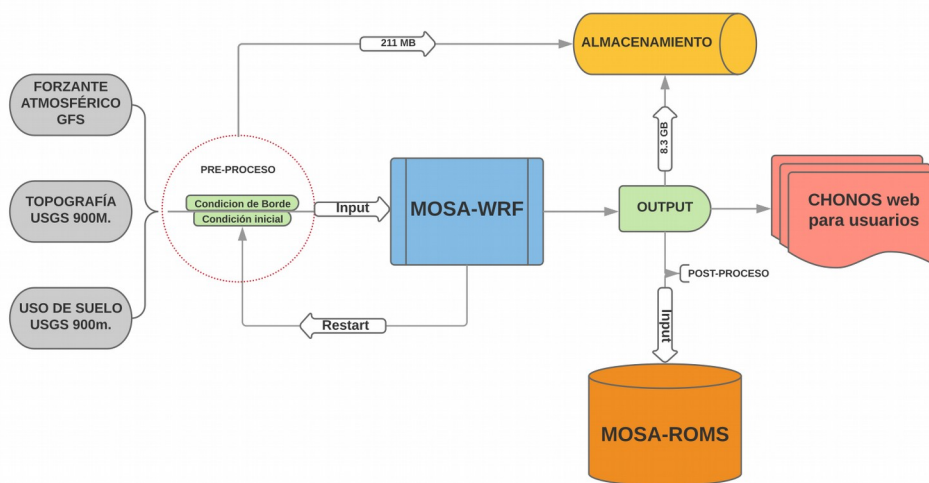


Figura 9: Esquema de funcionamiento diario del modelo operativo atmosférico MOSA-WRF.

Respecto a la operaci3n diaria de MOSA-WRF, el proceso comienza con la descarga del forzante atmosférico GFS (<http://www ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod/>). Una vez completada esta tarea, se procede a ejecutar el pre-procesamiento del modelo, utilizando la informaci3n atmosférica reci3n adquirida, junto a informaci3n geogr3fica incorporada en el modelo, como la topograf3a y uso de suelos (Fig. 9). Esta informaci3n es

interpolada en cada elemento de la grilla horizontal, como en los niveles verticales establecidos en el dominio MOSA-WRF, dando origen a las condiciones inicial y de borde necesarias para llevar a cabo una simulación atmosférica. Una vez generado estos archivos, comienza a procesar el modelo un pronóstico con horizonte de 3 días, generando archivos “restart” cada 24 horas, los que se utilizan como condición inicial del pronóstico del día siguiente.

Por una parte, el resultado del modelo será presentado de manera gráfica en la plataforma CHONOS y estará a disposición de cualquier usuario a través de distintos gráficos interactivos, y por otro lado, estas salidas son post-procesadas, otorgándoles un formato establecido previamente, para luego ser incorporados como forzante atmosférico en MOSA-ROMS.

Este procedimiento consiste en extraer solo los campos superficiales de las variables utilizadas para forzar el sistema de modelación hidrodinámica MOSA-ROMS; estos son los flujos de calor, humedad y radiación, las componentes horizontales del viento y campos de presión atmosférica, precipitación y por último, 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. Al término de este proceso son almacenadas las salidas y las condiciones de borde e iniciales del sistema, sumando entre ellas 8.5 GB aproximadamente.

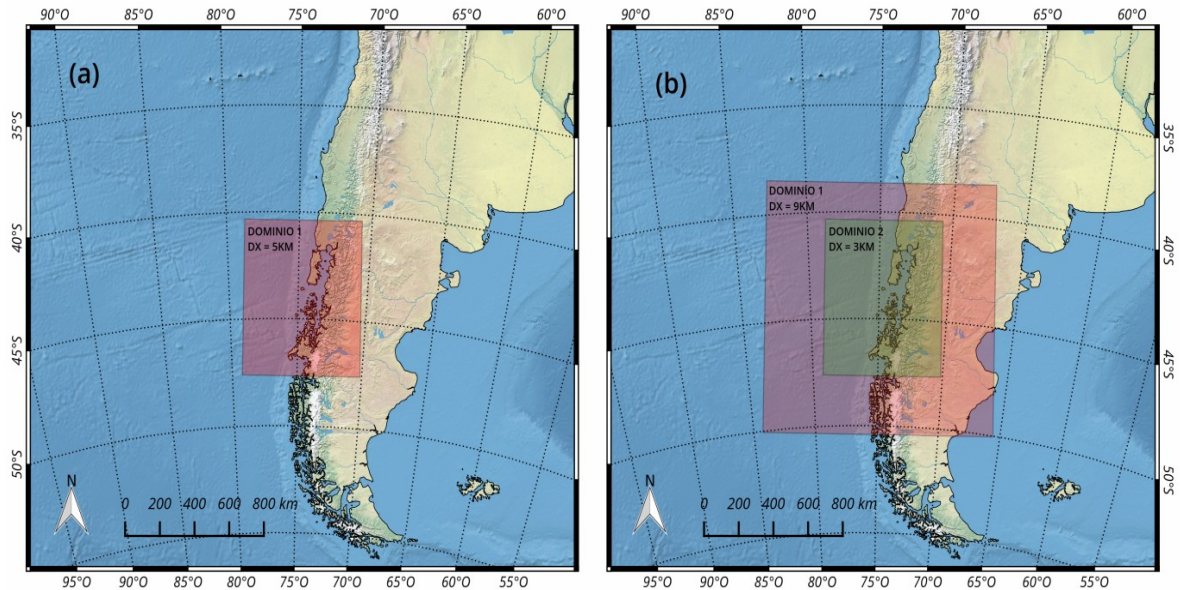


Figura 10: Dominios reconfigurados de modelo MOSA-WRF para forzar MOSA-ROMS, a diferentes resoluciones espaciales: (a) 1 dominio de 5 km (b) 2 dominios de 9 km y 3 km.

Para que el acoplamiento entre ambos pronósticos se pudiera llevar a cabo, fue esencial extender el área de MOSA-WRF, de tal manera de cubrir la totalidad del dominio MOSA-ROMS, quedando una nueva matriz de 155x170 elementos (Fig. 10a).

Paralelamente y a modo de prueba, se puso en marcha el segundo escenario construido (MOSA-WRF3km), buscando una mayor resolución horizontal y de esta manera mejoras tanto en la calidad del pronóstico atmosférico, como en el hidrodinámico. De igual manera, fue necesario ampliar este escenario, obteniendo matrices de 140x160 y 217x259 para el dominio padre e hijo respectivamente (Fig. 10b).

MOSA-WRF de 3 km se procesa en la misma maquina en donde corre el sistema operacional MOSA-WRF. Una vez que finalizado el pronostico operacional de MOSA-WRF se comienza a procesar el nuevo dominio de prueba, utilizando como condición de borde el mismo forzante atmosférico, previamente descargado de GFS. La condición inicial es obtenida del archivo “restart” correspondiente a algún pronostico pasado, de hasta tres días hacia atrás. El pre-proceso del pronostico global GFS a WRF y el post-proceso de las simulaciones de este modelo se realizan de manera análoga al modelo operacional MOSA-WRF.

Dada esta nueva configuración, se habilitó un nuevo nodo de cálculo con 38 núcleos, disponibles para el funcionamiento de MOSA-WRF, por lo cual, fue esencial realizar una prueba de escalamiento y así evidenciar la mejor distribución de los procesadores destinados al sistema. Este mecanismo hace referencia a como se comporta un programa que trabaja en paralelo si la cantidad de procesadores aumenta. De esta manera se establece la eficiencia del servidor, evitando un mal uso del recurso computacional que afectaría negativamente a cualquier usuario que se encuentre trabajando en la misma máquina.

Para llevar a cabo las pruebas de escalamiento, se estableció, en primer lugar, un periodo de ejecución de 6 horas. Posteriormente, se corrió el modelo de manera serial (1 núcleo) y se registró el tiempo que tardó la simulación. Luego, se procedió del mismo modo, pero se aumentaron progresivamente procesadores, ejecutando el modelo de forma paralela. Para este caso se hicieron pruebas con 2, 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28 y 32 núcleos. Para resolver la eficiencia, en primer lugar se debe calcular el speedup del programa en cuestión, el cual se obtiene mediante el cociente entre el tiempo de ejecución de forma serial (1 núcleo) y el tiempo de ejecución al ir aumentando los núcleos. Con esto podemos medir la ganancia, que se obtiene mediante la paralelización

$$Speedup = \frac{T_{original}}{T_{mejora}} \quad (1)$$

Así podemos obtener la eficiencia a través del cociente entre el speedup y el número de procesadores en los cuales ejecutamos la aplicación.

$$Eficiencia = \frac{Speedup}{N^{\circ} Procesadores} \quad (2)$$

Finalmente se evaluó si existió un progreso en el forzante atmosférico, tras la implementación de MOSA-WRF. Esto se llevó a cabo mediante rosas de viento y el ciclo diario de la radiación solar, considerando el fuerte impacto de estas dos variables en la hidrodinámica de MOSA-ROMS. La metodología incorporó las salidas facilitadas por la DMC, el sistema MOSA-WRF implementado como pronóstico operativo de 5 km y las salidas del escenario de prueba MOSA-WRF de 3 km. Estos resultados se compararon de manera cualitativa, con los datos registrados por dos estaciones que componen la red de estaciones meteorológicas instaladas en el marco de este proyecto (detalladas en la sección 3.2) durante el período en común de los 3 productos numéricos, desde el 28 de enero del 2019 hasta la fecha. Se escogieron estas estaciones meteorológicas, por que los patrones de viento de una estación están modulados con condiciones oceánicas (Cucao) y la otra con condiciones pre-cordilleranas (Huina). En el caso de la radiación solar se utilizaron las estaciones de Cucao y Melinka, ya que son las únicas con sensor de radiación solar implementado.

3.1.4 Mejoramiento de la fuente de batimetría.

La batimetría junto a la morfología de la línea de costa contribuyen activamente en el desarrollo de los patrones locales de circulación en la región de estudio. Esta zona se caracteriza por tener una topografía compleja con numerosas islas, montes submarinos, estrechos, canales y ríos (Rodrigo, 2006). Como ejemplo de ello, la interacción de la batimetría con las intensas corrientes de marea pueden condicionar el grado de mezcla en toda la columna de agua, especialmente en zonas costeras y constricciones. Por otra parte, dada la resolución espacial de los modelos y el método de integración para resolver las ecuaciones primitivas del océano, la incorporación fidedigna de valores de batimetría se ve limitada. Esto significa que la información bruta extraída de sondas batimétricas o cartas náuticas deben ser procesadas, filtradas y editadas para evitar errores numéricos. De este modo, se debe buscar un equilibrio entre la estabilidad del modelo y el grado de precisión que se le exija. Esta precisión puede estar condicionada al suavizamiento y filtrado de los valores de batimetría, cuyas modificaciones pueden alterar los procesos físicos asociados a la interacción entre la batimetría y las corrientes. Lo anterior se refleja finalmente en el nivel del mar, la estratificación y mezcla de la columna de agua, generación de ondas internas, saltos hidráulicos, efectos no lineales, entre otros.

En esta etapa nos centramos en mejorar la batimetría del dominio del modelo, con el fin de representar de mejor manera el comportamiento de la estructura vertical de temperatura y salinidad, así como la dirección e intensidad de las corrientes de marea.

Actualmente, MOSA-ROMS se basa en una batimetría generada a partir de datos GEBCO y de cartas náuticas del SHOA (Fig. 11). La coordenada vertical del modelo esta distribuida en 42 niveles verticales sigma que siguen la batimetría con mayor resolución en superficie, con el fin de reproducir adecuadamente procesos físicos que ocurren en la capa de mezcla. Cabe notar que aumentar la cantidad de niveles verticales aumenta el costo computacional. Los parámetros de configuración de estas coordenadas en MOSA-ROMS (grilla denominada MOSAV3) son: $\theta_s = 7$ (parámetro de control superficial), $\theta_b = 2$ (parámetro de control de fondo), $T_{cline} = 200$ (ancho de la capa superficie/fondo utilizado en el estiramiento de coordenadas).

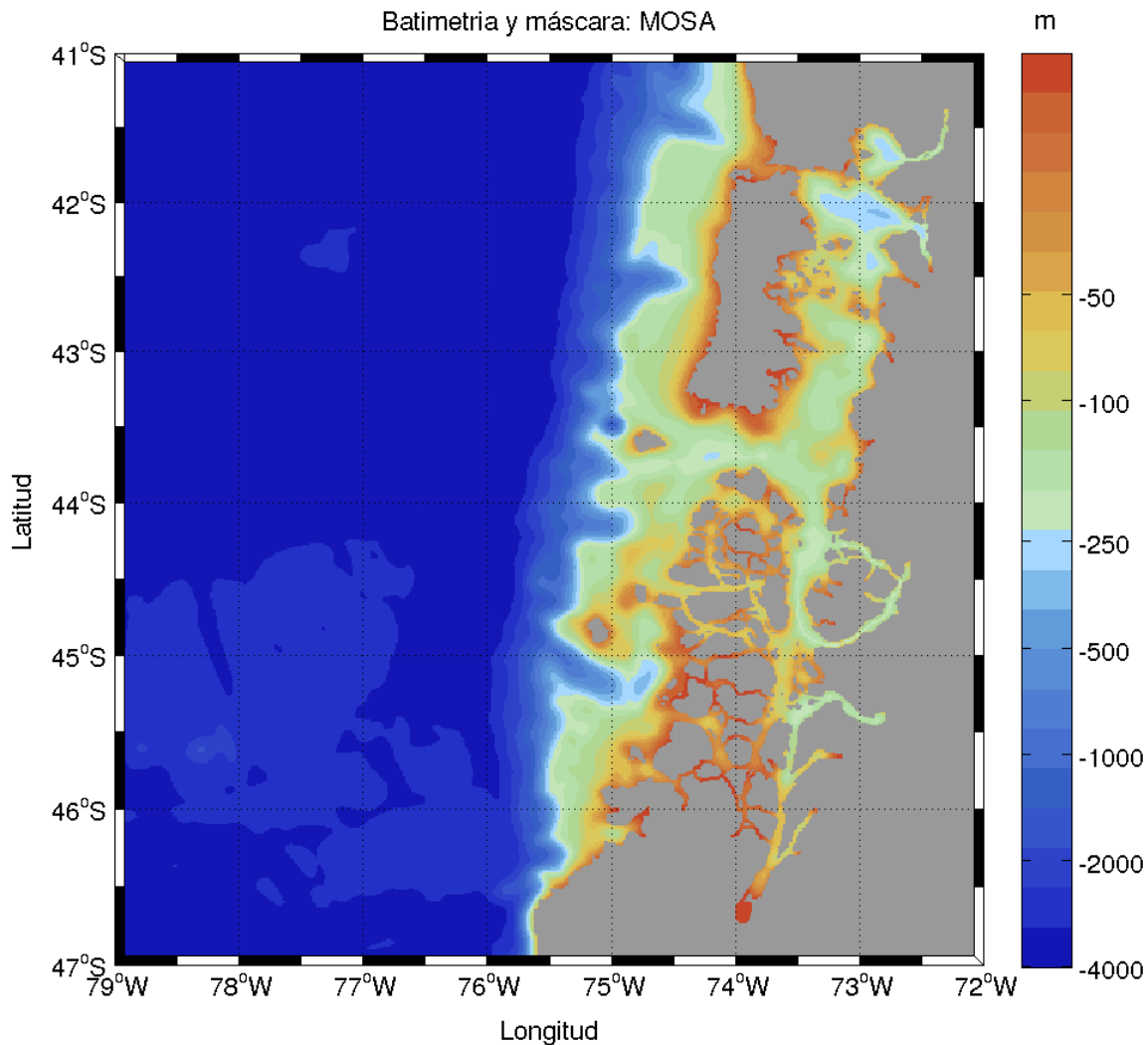


Figura 11: Batimetría interpolada desde datos GEBCO y cartas náuticas digitales del SHOA.

Resulta complejo usar batimetrías realistas en la zona de fiordos y canales en ROMS, donde existen abruptos cambios de profundidad en pocos kilómetros, ya que estas generan errores numéricos en el gradiente de presión resultando en problemas para mantener los

principios de conservación en grillas con elementos regulares. Debido a lo anterior, las grillas deben ser filtradas o suavizadas para evitar inestabilidades numéricas, produciendo en algunos casos un fuerte suavizado de los rasgos batimétricos. Dado que esta grilla se usa en el modelo operacional hay que establecer un equilibrio entre una grilla que permita tener simulaciones estables en el tiempo y una grilla realista para la zona.

Para mejorar la calidad de la grilla, se identificaron zonas donde la batimetría juegue un rol importante en la circulación, y que a su vez, la profundidad no se encuentre correctamente representada. Esto ocurre principalmente en las bocas de los fiordos, canales insulares e interiores de Aysén donde el modelo siempre tiende a ser mas somero que la realidad. En estas zonas se espera modificar la batimetría, de modo que alcance profundidades más realistas. Las fuentes de información para mejorar la batimetría serán las cartas náuticas del SHOA, las cuales han sido re-procesadas. Por otra parte, se trabajó en la distribución de los niveles verticales, puesto que, cuando la profundidad aumenta, los niveles verticales tienden a separarse, especialmente en superficie. Esto es algo crítico para el modelo, ya que en superficie es donde se necesita concentrar una mayor cantidad de niveles verticales para reproducir de mejor manera procesos oceanográficos físicos relevantes en la zona de estudio, como profundidad de la capa de mezcla, generación de ondas baroclínicas, resonancia mareal, etc..

Para evaluar el efecto de los cambios en batimetría y la línea de costa de esta nueva configuración estudiaremos el comportamiento de la marea al interior del dominio de estudio. Para esto se realizó una simulación de 3 días con cada grilla nueva, utilizando las mismas parametrizaciones físicas, caudales de ríos y armónicos de marea que usa MOSA-ROMS actualmente. La condición inicial de estas simulaciones fueron extraídas del modelo global Mercator-Ocean, debido a que los cambios introducidos en la batimetría no permiten utilizar la condición inicial mezclada de MOSA-ROMS. Usaremos los datos de los mareógrafos del SHOA (Tabla 4) para evaluar si se ha alterado el nivel del mar con los cambios introducidos a la batimetría. La versión actual de MOSA-ROMS (MOSA_{v3}) ha presentando validaciones altamente satisfactorias del nivel del mar en estos puntos en evaluaciones anteriores del proyecto, por lo que se considera un parámetro de comparación válido para identificar si las grillas nuevas introducen errores o inestabilidades al sistema.

Tabla 4: Coordenadas geográficas mareógrafos monitoreadas por el SHOA.

	Ancud	Puerto Montt	Castro	Melinka	Chacabuco
Latitud (°S)	41.86740	41.48474	42.48089	43.89846	45.46708
Longitud (°O)	73.83306	72.96124	73.75818	73.74820	72.82004

3.1.5 Implementación módulo biogeoquímico (BGQ) de diagnóstico y evaluación posible implementación

En los últimos años, ha incrementado la preocupación de la influencia antropogénica sobre el ecosistema marino; si bien los ecosistemas cambian naturalmente, la tasa de cambio parece haber sido incrementada por la actividad antrópica. En este sentido uno de los desafíos a los que nos vemos enfrentados es comprender los efectos de la eutroficación costera en la dinámica de los ecosistemas marinos.

La eutroficación es definida como un incremento en la tasa de la producción primaria y acumulación de materia orgánica, usualmente resultado de una adición de nutrientes que modifica la composición del 'pool' de nutrientes, donde la intensidad de la respuesta depende de factores ambientales como altas temperaturas, radiación, estratificación entre otros (Rabalais et al., 2009). Cuando el nutriente limitante del crecimiento del fitoplancton es agregado al sistema acuático, la respuesta de la comunidad fitoplanctónica es el aumento de las tasas de crecimiento y acumulación de biomasa, provocando floraciones algales, las que en algunos casos representan una amenaza adicional debido a la producción de toxinas nocivas (Glibert et al., 2010). Además, el aumento de productividad primaria provoca un incremento de sedimentación de materia orgánica y una subsecuente disminución del oxígeno debido al proceso de descomposición.

Por otra parte, en las últimas décadas en la Patagonia chilena, la acuicultura se ha transformado en uno de los sectores fundamentales de la economía nacional, llegando a ser considerada como uno de los promotores del sostenido y exitoso crecimiento exportador del país. Sin embargo, el cultivo masivo de organismos, puede provocar impactos en distintos niveles de los ecosistemas involucrados. Estos impactos incluyen; ingreso de nutrientes (e.g. fósforo y nitrógeno) a la columna de agua; aumento del material particulado en suspensión, disminución de la transparencia de la columna de agua; aumento de la materia orgánica en los sedimentos, disminución de la concentración de oxígeno y cambios en las comunidades del bentos. En este contexto, entender y cuantificar el efecto de actividades de acuicultura en el mar interior de Chiloé es altamente complejo, esto debido a la gran diversidad de variables bióticas y abióticas involucradas y a las eventuales relaciones e interacciones entre ellas.

La zona de canales y fiordos, está influenciada por la presencia de tres masas de agua; el agua subantártica modificada (ASAAM, ubicada entre superficie y 30m salinidad 31-33), agua subantártica (ASAA) y agua ecuatorial subsuperficial (AESS). La ASAMM se ubica como una capa superficial y es resultado de la mezcla de la masa de agua de origen oceánico (ASAA) con agua dulce, caracterizando a este cuerpo de agua por presentar valores de salinidad de entre 31 y 33 y de temperatura entre 9.5 y 10.5°C (Schneider et al., 2014). Bajo esta masa de agua se encuentra la ASAA, que se ubica como una capa

subsUPERficial (30 -150m) con altos valores de nutrientes ($\sim 1.2 - 1.6 \mu\text{M PO}_4\text{-3}$; $\sim 26\mu\text{M NO}_3\text{-}$), valores medios para el O_2 (5.7-8.6 mg L⁻¹; 63 - 97% de saturación) y valores de salinidad de entre 33 y 33.9 además de estar asociada a temperaturas de entre 11.5 y 12.5°C (Sievers and Silva, 2008). La AESS se presenta como una capa de fondo ubicada entre los 150 y 300m caracterizada por presentar altos valores de nutrientes ($\sim 2.0 \mu\text{M PO}_4\text{-3}$; $\sim 24 \mu\text{M NO}_3\text{-}$), bajo contenido de O_2 ($< 5.7 \text{ mg L}^{-1}$; $< 63\%$ de saturación) y salinidades sobre los 33.9 (Silva & Vargas, 2014; Pérez-Santos et al., 2014).

Ambas masas de agua de origen oceánico (Fig. 12) ingresan por la boca del Guafo bajo los 30 m, donde se bifurcan en dos ramas fluyendo una hacia el norte y otra hacia el sur. La masa de agua ubicada bajo los 150 m (AESS) está restringida por la batimetría, llegando hasta las islas desiertos y por el sur hasta la constricción de Meninea e introduciéndose por los canales Puyuhuapi y Jacaf.

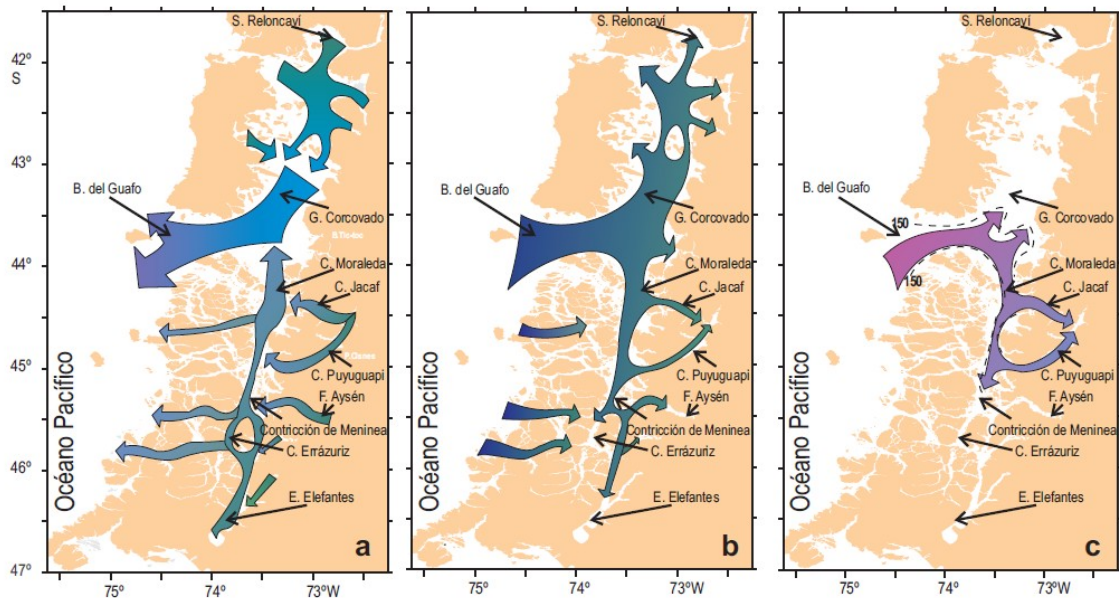


Figura 12: Modelo esquemático de la circulación horizontal. (a) nivel superficial (0 – 30 m), (b) nivel intermedio (30 – 150 m), (c) nivel profundo (> 150 m) (tomado de Silva et al. 1998).

En este sentido, a partir de un anclaje instalado en Melinka, Pérez-Santos et al. (2017) sugiere la existencia de una estacionalidad en las masas de agua AESS y ASAA (Fig. 13), donde durante primavera y otoño la AESS coincidió con la capa hipóxica, que se registró entre los 147 y 152 m, sin embargo a partir de mayo entre los 140 y 145 m de profundidad se detectó un aumento del oxígeno disuelto y una disminución de salinidad coincidiendo con las características de la ASAA.

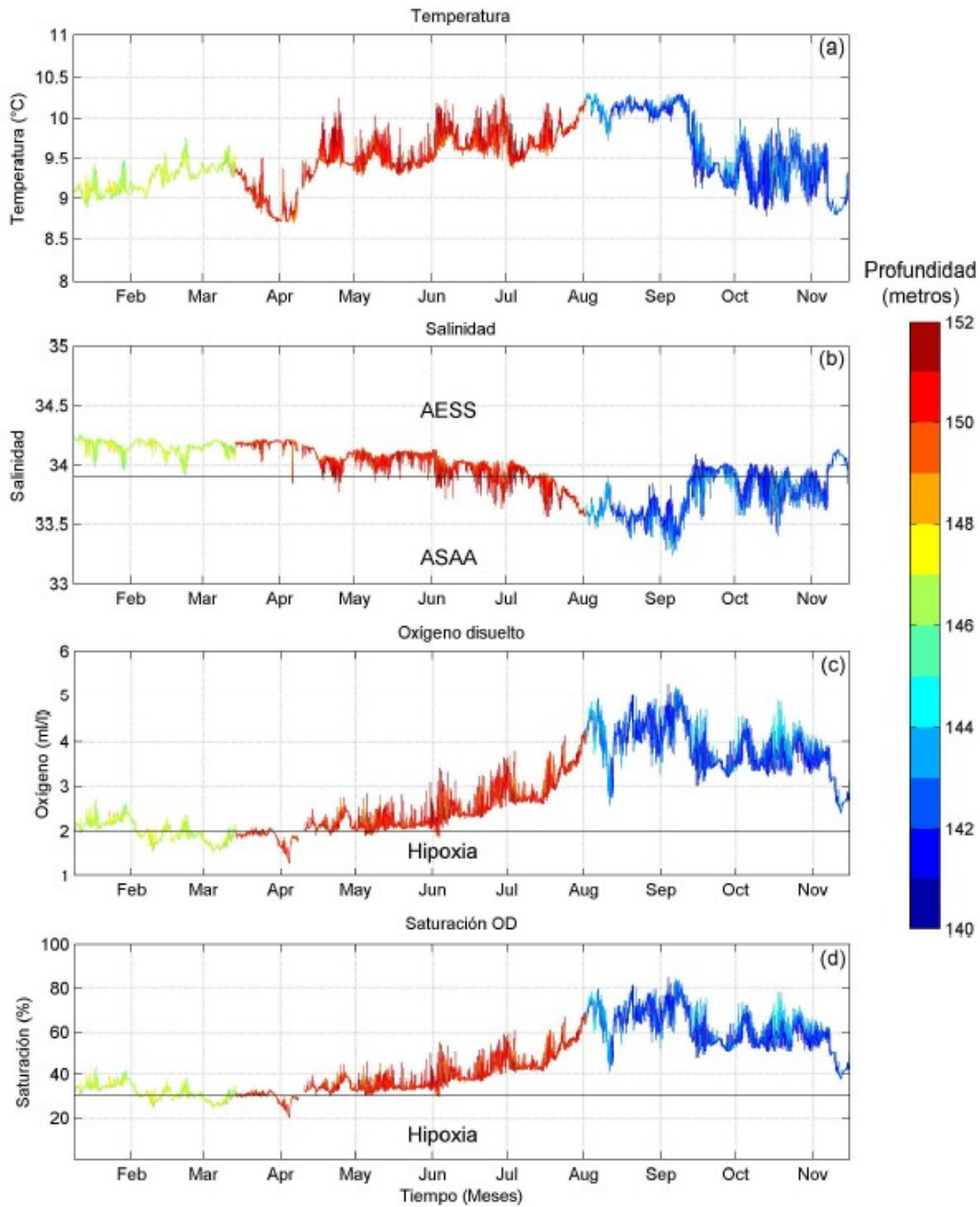


Figura 13: (a) Serie de tiempo de la temperatura y (b) salinidad del agua obtenida del MicroCat y (c-d) ODy porcentaje de saturación del MiniDOT. Los datos fueron colectados en el anclaje de Melinka a ~10 metros del fondo en el periodo Enero-Noviembre 2016. Tomado de Pérez-Santos et al. 2017.

En esta etapa del proyecto realizaremos pruebas con el modelo biogeoquímico desarrollado por Fasham et al. (1990), el cual simula 4 variables de estado (Fig. 14): nitrato, fitoplancton, zooplancton y detrito todo expresado en mmol Nm^{-3} y cuenta con 16 parametrizaciones (Tabla 5). Este modelo reproduce como subproducto las concentraciones de oxígeno disuelto y las concentraciones de clorofila, que es derivada de la concentración

de fitoplancton usando las razones de clorofila de 0.02 (mg Chla/ mg C) y C:N de 6.625 (mmol C/mmol N). Nos referiremos a este modelo como NPZD, el cual es acoplado al modelo oceanográfico físico ROMS-AGRIF.

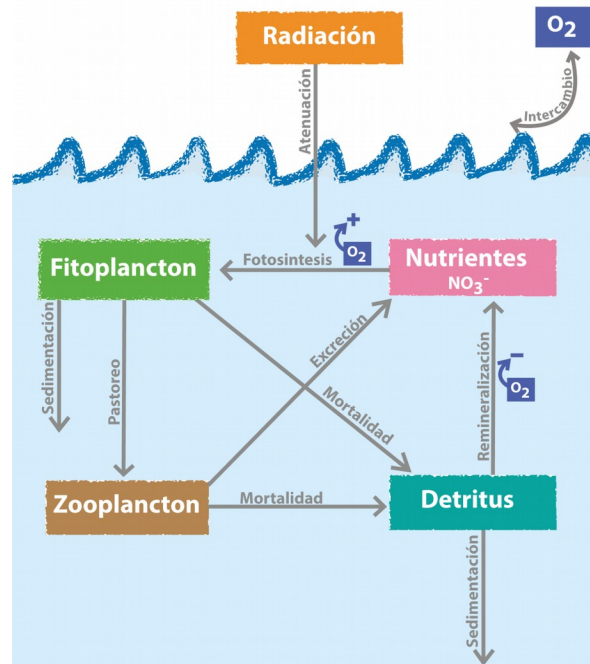


Figura 14: Esquema del modelo NPZD

Los principales procesos incluidos en el modelo NPZD son el crecimiento del fitoplancton y la asimilación de nitrato por el fitoplancton, pastoreo del zooplancton sobre el fitoplancton, mortalidad del plancton (fitoplancton y zooplancton), sedimentación y remineralización del detrito. El crecimiento del fitoplancton es forzado por la radiación fotosintética activa, temperatura y nitrato. La radiación fotosintética activa, corresponde al 43% de la radiación de onda corta incidente en la superficie del mar, esta variable se calcula en cada elemento de la grilla a través del coeficiente de atenuación de agua de mar y el contenido de fitoplancton, donde en profundidad la radiación fotosintética activa disminuye exponencialmente con la profundidad. En cuanto a la asimilación de nitrato este modelo utiliza la función de Michaelis-Menten, es decir cuando las concentraciones de nitrato son limitadas el consumo es escaso y su aumento determinada por la constante de saturación media; mientras que en altas concentraciones de nitrato el consumo aumenta hasta hacerse constante independiente de que la concentración de nitrato aumente. El zooplancton asimila el fitoplancton ingerido con la eficiencia beta siguiendo una función hiperbólica, donde a altas concentraciones de zooplancton llega a un ‘plateau’ representando depredadores saciados.

Tabla 5: Parámetros modelo biogeoquímico NPZD

Parámetro		Valor	Unidad
K_w	Atenuación de la luz en el agua de mar	0.04	m ⁻¹
K_{Chla}	Atenuación de la luz por clorofila	0.024	(m ² mg Chla) ⁻¹
α	Pendiente inicial de la curva P-I	1.0	(W m ⁻² d) ⁻¹
R_{C:NPhyt}	Razón C:N para el fito	6.625	mMol C (mMol N) ⁻¹
R_{C:NZOO}	Razón C:N para el zoo	6.625	mol-C (mol-N) ⁻¹
Θ_{max}	Razón máxima de clorofila celular a carbono.	0.0535	mg Chla/mg C
K_{NO3}	Saturación media para la absorción de NO ₃ por el fito	2	(mmol-N m ⁻³) ⁻¹
M_{fdet}	Tasa de mortalidad de fito a detritus	0.03	d ⁻¹
G_{max}	Tasa máxima de crecimiento de zoo	0.9	d ⁻¹
β	Eficiencia de asimilación del zoo	0.75	
K_{fito}	Constante de saturación media del zooplancton para la ingestión de fito	1.0	d ⁻¹
M_{zmet}	Tasa de excreción específica del zoo	0.10	d ⁻¹
M_{zdet}	Tasa de mortalidad del zoo a detritus	0.10	d ⁻¹
M_{Dremin}	Tasa de remineralización del detritus a NO ₃	0.05	d ⁻¹
W_{Phyt}	Velocidad de hundimiento del fito	0.5	m d ⁻¹
W_{Det}	Velocidad de hundimiento del detritus	5.0	m d ⁻¹

En su primera evaluación utilizamos la misma grilla del modelo operacional (Fig. 11), por lo cual su batimetría y línea de costa se mantienen. El modelo simuló un año climatológico distribuidos en 42 niveles verticales que siguen la topografía. Las condiciones de borde de salinidad y temperatura del modelo fueron obtenidas del modelo global World Ocean Atlas 2005 (WOA2005, Antonov et al., 2006; Locarnini et al., 2006), con condiciones de marea basadas en TPXO7 (Egbert & Erofeeva, 2002) y con forzantes atmosféricos obtenidos desde Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS, Da Silva, 1994). En esta simulación no se incluyeron fuentes de agua dulce.

De este modo, la primera evaluación consistirá en estudiar la distribución vertical de las masas de aguas de origen oceánico (ASSA y AESS) que ingresan por la boca del Guafo descrita por Silva et al. (1998) y la estacionalidad observada por Pérez-Santos et al. (2017). Para esto compararemos los resultados del modelo con las mediciones realizadas por los cruceros CIMAR-Fiordos.

Un segundo experimento consistió en utilizar un modelo de mas baja resolución (2.7 km) y aumentar la extensión del dominio de estudio en la parte norte y sur (Fig. 15). Para este nuevo dominio utilizamos condiciones de borde provenientes de Mercator-Ocean, condiciones atmosféricas de COADS, y vientos corregidos con datos climatológicos provenientes de QuikSCAT (Liu et al., 1998). Al igual que el modelo operacional MOSA-ROMS, se utilizaron las bases de datos climatológicas de la DGA como aportes de agua dulce. Dado que esta grilla tiene una menor resolución, utilizamos 28 fuentes puntuales de agua dulce. Además, para cada fuente puntual se consideraron valores de nutrientes promedio de clorofila, oxígeno, zooplancton, fitoplancton y nitrato. Estos datos provienen de mediciones realizadas por el proyecto ASIPA “Modelación de alta resolución aplicada al transporte hidrodinámico en la región de Aysén 2019”.

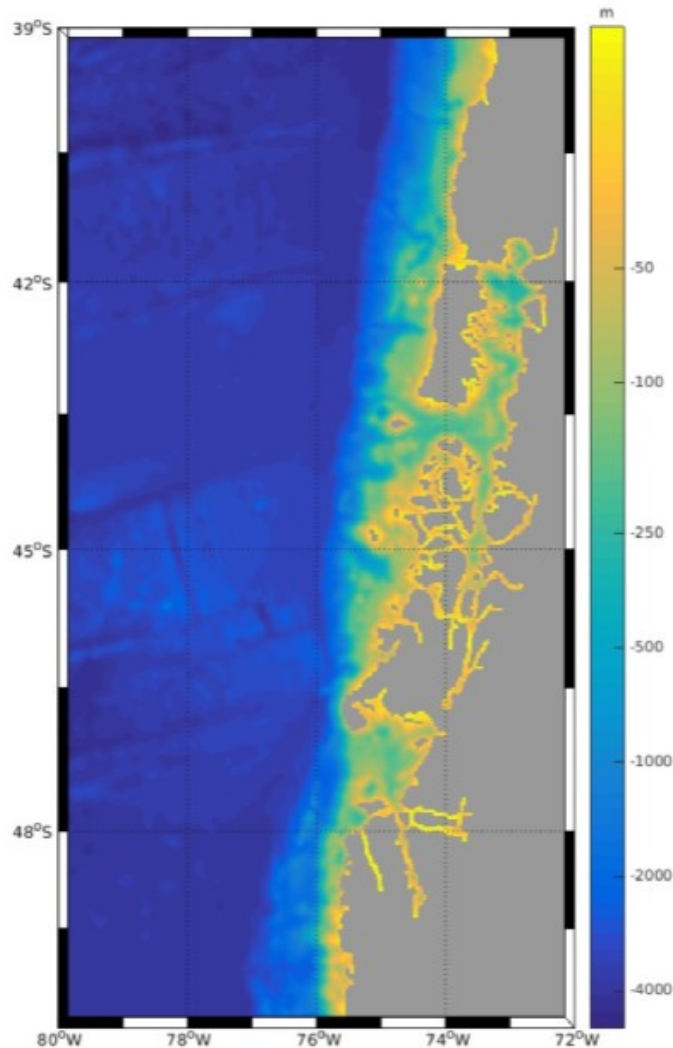


Figura 15: Dominio de 2.7 km de resolución espacial para modelo biogeoquímico NChIPZD. Batimetría es interpolada desde datos GEBCO y cartas náuticas digitales del SHOA.

Se simularon 4 meses sin considerar campos de nutrientes, solo con el fin de mezclar las condiciones oceanográficas físicas y lograr la estabilidad numérica del modelo. Posteriormente simulamos 1 año utilizando el modulo biogeoquímico “NChlPZD”. Al igual que el primer experimento, usamos los datos de CIMAR-Fiordos para la validación.

3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas en tiempo real.

Las observaciones son una parte esencial de los sistema de pronósticos operacionales, pues pueden ser usadas tanto por el modelo operacional como condiciones de borde o bien como información para calibración y/o evaluación. Sin embargo contar con información oceanográfica *in situ* en tiempo real resulta más complejo, debido a los costos y logística que esto conlleva, no así con las observaciones atmosféricas, cuya operación resulta más económica y menos riesgosa. Esto ha dificultado la tarea de evaluar la evolución del error de las variables pronosticadas en el modelo oceánico MOSA-ROMS, reduciendo las fuentes de información continua a imágenes satelitales de temperatura superficial y salinidad superficial del mar, esta última con poca resolución, no cubriendo la zona del mar interior del dominio de MOSA-ROMS. También se dispone de datos colectados en diferentes campañas oceanográficas de IFOP en la zona, dentro de los proyectos: “Modelación de alta resolución aplicada al transporte hidrodinámico en la región de Aysén” y “Determinación de escapas de intercambio de aguas en fiordos y canales de la Patagonia”, durante 2018 y 2019.

Como parte de este proyecto se instaló una pequeña red de monitoreo en tiempo real con información de variables atmosféricas. Esta red de monitoreo atmosférico esta compuesta de 5 estaciones meteorológicas autónomas (Fig. 16), las cuales se encuentran transmitiendo en tiempo real información de viento, radiación solar, precipitación, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa. La distribución de las estaciones responde a representar condiciones oceánicas, de mar interior y precordillera, con el fin de analizar y describir procesos predominantes, en distintas escalas temporales, logrando aumentar el conocimiento científico en torno a las ciencias atmosféricas y su interacción con el océano dentro de esta región.

La primera estación fue montada sobre una torre de agua en el pueblo de Cucao (42.601 °S, 74.123 °W), la segunda en la antena de radio de la posta de Melinka (43.897 °S, 73.746 °W), la tercera en un terreno particular de la localidad rural de Apiao (42.594 °S, 73.223 °W), la cuarta en la escuela rural del sector Llaguepe (41.722 °S, 72.483 °W) y la última en el terreno correspondiente a la fundación Huinay (42.378 °S, 72.415 °W). Todas las estaciones están dotadas de los sensores nombrados anteriormente, los cuales transmiten la información mediante tecnología de comunicaciones móviles (Global System Mobile communications, GSM) en tiempo casi-real. Además fueron implementadas con paneles

solares para un funcionamiento autónomo. Finalmente, se configuraron los sensores para registrar los datos cada 10 minutos y transmitir la información cada 1 hora. Esta información actualmente también se encuentra disponible de manera pública en la plataforma web del proyecto www.ifop.cl/chonos.

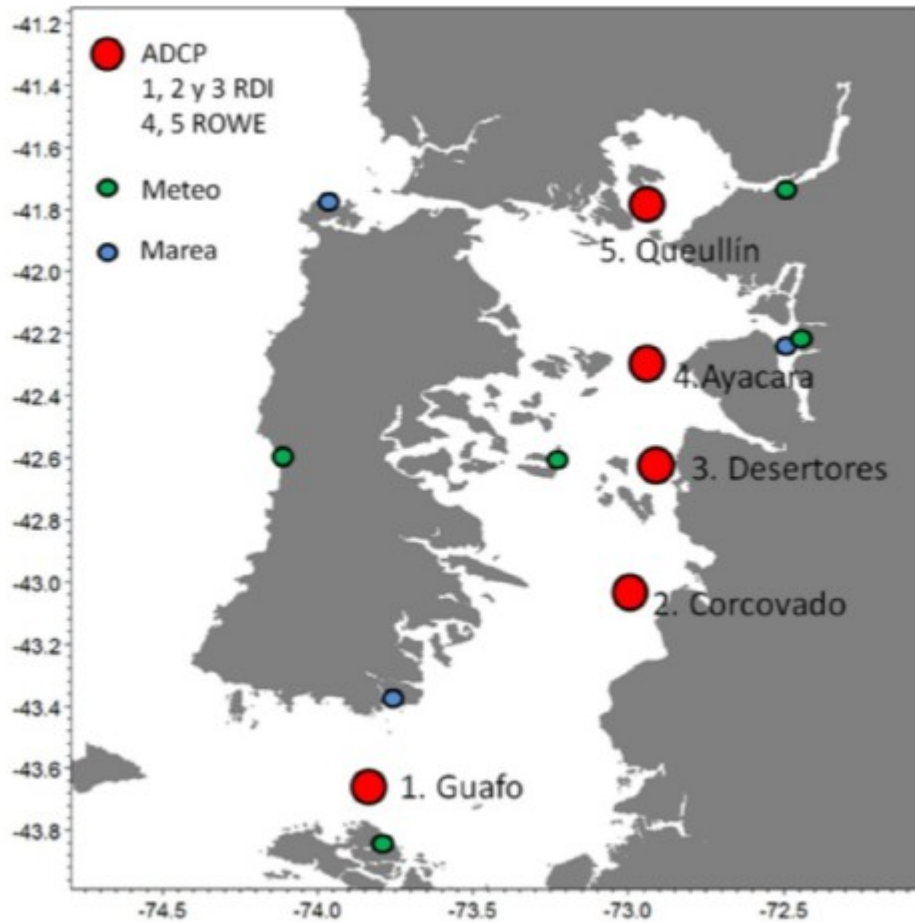


Figura 16: Posiciones de anclajes de perfiladores acústicos de corriente (ADCP), estaciones meteorológicas y sensores de presión en el mar interior de Chiloé durante 2017.

El modelo operacional atmosférico MOSA-WRF fue evaluado con esta red de monitoreo en tiempo casi real y el modelo operacional oceanográfico MOSA-ROMS fue evaluado con información de las campañas oceanográficas y datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) y salinidad superficial del mar (SSM). Se cuantificó el error mediante análisis estadístico, coeficiente de correlación de Pearson (r), sesgo (bias), cociente entre las desviaciones estándar (amplitud) y el error absoluto medio (Anexo E).

3.2.1 Evaluación modelo MOSA-WRF

Para evaluar el desempeño de MOSA-WRF, se escogió la estación de Cucao, ya que es la de mayor registro y la que se ha mantenido más estable en el tiempo. Las variables propuestas para este análisis, se fundamentaron básicamente en aquellas con mayor influencia en el sistema hidrodinámico, puesto que uno de los principales propósitos de MOSA-WRF es mejorar el forzante atmosférico utilizado en el sistema MOSA-ROMS y por lo tanto, obtener mejores resultados de las predicciones operativas. Estas fueron: dirección e intensidad del viento, componentes zonal U y meridional V del viento, temperatura superficial y precipitación acumulada.

En primer lugar, fue necesario realizar un procesamiento de los datos observados, descomponiéndose la dirección e intensidad del viento en componente zonal (U) y meridional (V) mediante la siguiente ecuación:

$$U = M * \sin(\phi + 180) \quad (3)$$

$$V = M * \cos(\phi + 180) \quad (4)$$

donde M y ϕ , corresponden a la magnitud y dirección del viento respectivamente. Esta descomposición se realiza por que las estaciones están configuradas en convención meteorológica, a diferencia de las salidas del modelo que entrega la dirección hacia donde este se dirige. Sumado a esto, al viento se le aplicó un filtro triangular con una ventada de 24 horas, con el fin de eliminar el posible ruido provocado por turbulencias de alta frecuencia.

Se optó por trabajar con valores horarios, ya que el modelo se configuró para escribir sus salidas de pronóstico cada 1 hora. Para esto, se extrajeron los datos instantáneos de las estaciones meteorológicas para cada hora. El periodo de evaluación se estableció entre 20/07/18 – 20/07/19, comprendiendo un año de información. Se analizaron correlaciones, sesgos, amplitudes y el error medio absoluto. Además se observó el el comportamiento del ciclo diario para las distintas señales.

3.3.2 Evaluación modelo MOSA-ROMS

Evaluamos el modelo oceánico MOSA-ROMS con mediciones obtenidas de campañas oceanográficas de IFOP, las cuales cuentan con datos de correntometría eulerianas en la columna de agua a través de anclajes ADCP's (Fig. 16) y de mediciones de salinidad y temperatura mediante estaciones de CTD (Fig. 17). Estas campañas de medición corresponden a un esfuerzo de este y otros proyectos llevado a cabo por el IFOP así también como de instituciones en convenio realizadas entre los años 2017 – 2018. Estas

campañas se realizan 4 veces al año (uno en cada estación), lo cual permite realizar un análisis estacional del desempeño del modelo. Para estos análisis se utilizaron 127 lances de CTD.

Cada pronóstico de MOSA-ROMS tiene información de 3 días de simulación, correspondiente al pronóstico del día actual más 48 horas. Se crearon 3 productos a partir del modelo oceanográfico. Un producto de 0 a 24 horas, otro de 24 a 48 horas, y el último de 48 a 72 horas. Con los datos de CTD se elaboraron diagramas de distribución conjunta de temperatura y salinidad (diagramas T/S) y se calcularon histogramas de frecuencias de distribución de ambas variables. A su vez, se realizaron los mismos diagramas con los datos de MOSA-ROMS, resguardando que se comparen las mismas fechas de los lances con el modelo.

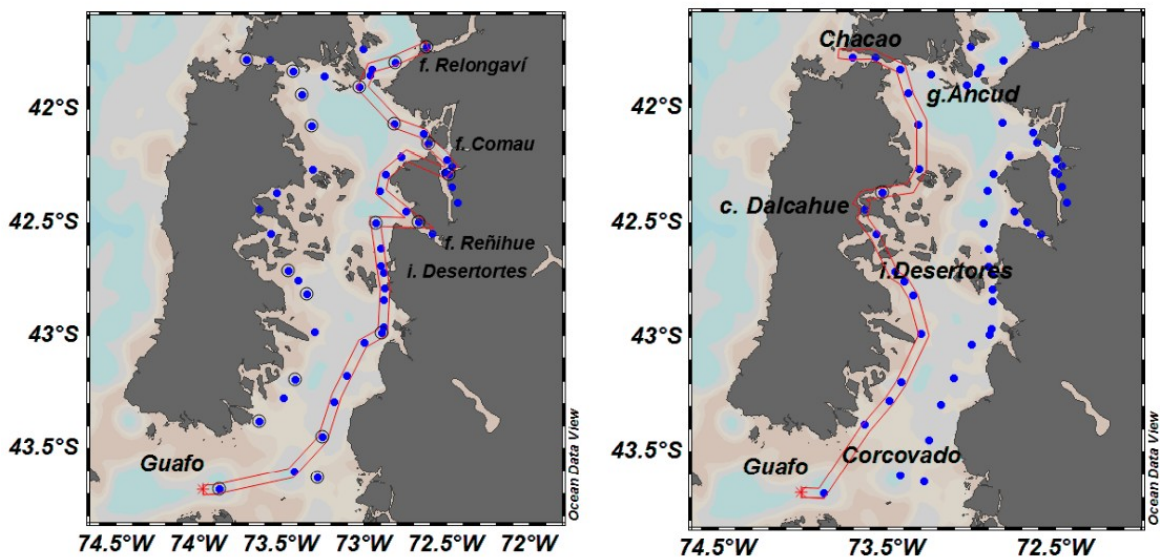


Figura 17: Estaciones de CTD. A la izquierda transecta Continental, a la derecha transecta insular.

Aparte de las observaciones tomadas en campañas oceanográficas, también se trabajará con imágenes satelitales de temperatura (TSM) y salinidad (SSM) superficial del mar, las cuales permiten evaluar los patrones espaciales y temporales de dichas variables, en nuestro caso en periodos entre julio de 2016 y julio 2019.

Para evaluar TSM usaremos 2 tipos de fuentes de datos: VIIRS-SNNP y Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). VIIRS-SNNP es un producto que cuenta con una resolución aproximada de 4 km . Para obtener una evaluación entre MOSA-ROMS y imágenes satelitales VIIRS-SNNP, se procedió primero con la obtención de los datos de VIIRS-SNNP que corresponden a promedios mensuales de TSM en el dominio de MOSA-ROMS (<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/VIIRS/Mapped/Monthly/4km>). Estos datos fueron llevados a la resolución de MOSA-ROMS (~ 1km) a través de una interpolación lineal,

cuidando que no existan inconsistencias con las zonas de tierra/agua después de aplicar este procedimiento. Luego de ello se efectuaron 2 tipos de análisis, uno temporal y otro espacial.

Con AVHRR se busca visualizar el desempeño diario de la temperatura superficial del mar (TSM) en todo el dominio de MOSA-ROMS. Este producto integra diversas fuentes de datos en el océano y satelitales para obtener la mejor interpolación posible a una resolución de 0.25°. La fuente de estos datos se encuentra disponible en <https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/>.

Para el caso de SSM se utilizaron datos de la misión Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), los cuales fueron obtenidos desde el portal web del CATDS (ftp.ifremer.fr/Ocean_products/). De este producto, se descargaron imágenes mensuales de SSM para el año 2018, las cuales fueron recortadas al dominio de MOSA. Se realizó un control de calidad a estos datos para descartar valores anómalos de salinidad en las zonas costeras. Para comparar estos datos con MOSA-ROMS, se construyeron promedios estacionales para ambos productos. En el caso de MOSA-ROMS, utilizamos la salinidad superficial diaria promedio del día 1 de pronóstico. Debido a las diferencias de resolución de ambos productos (MOSA-ROMS ~ 1.2 km, SMOS ~ 25 km), se trabajó en base al dominio del producto satelital. Notar que debido a la resolución y características de los datos satelitales, este análisis no cubre la zona de mares interiores, y a su vez arrojan mayores errores en los bordes costeros, presentado salinidades inusualmente bajas para la zona occidental del dominio.

Para todas las series de tiempo escalares usaremos histogramas, sesgo, error cuadrático medio y índices de correlación (Anexo E). Para el caso de las variables vectoriales, usaremos además rosas de viento y espectros rotatorios. El resumen de las salidas del modelo operacional junto con información de las principales variables pronosticadas se encuentran en el portal web del proyecto www.ifop.cl/chonos.

3.3 Metodología objetivo específico 3: Perfeccionar la plataforma de visualización de resultados y aplicaciones.

En la etapa anterior, se generó una plataforma preliminar de información oceanográfica con el fin de integrar diferentes productos que se desarrollaban en el grupo de modelación de IFOP-Chiloé en los últimos años. Esta información es libre y gratuita con el fin de convertirse en una herramienta para gestión ambiental y sanitaria. En esta nueva etapa, se diseñará una plataforma web más robusta donde se muestren estos resultados y aplicaciones. Para esto se tomaron las observaciones y comentarios de usuarios realizadas a la plataforma anterior, así como también, las implementaciones y diseño de plataformas operacionales de otros países.

La actual plataforma web fue bautizada como CHONOS (www.ifop.cl/chonos), en honor a los antiguos habitantes de los mares del sur de Chile. La plataforma está dividida en resultados directos del modelo de pronósticos oceanográfico (MOSA-ROMS) y en herramientas numéricas que permiten generar simulaciones puntuales de dispersión de partículas (Parti-MOSA) y simular conectividad entre diferentes regiones en base a escenarios climatológicos (CLIC).

Esta aplicación está disponible con la idea de que el usuario obtenga dicha información de la forma más directa y sencilla posible. Actualmente esta aplicación está funcionando en el centro de procesamiento de datos del IFOP en Viña del Mar. CHONOS utiliza la siguiente infraestructura computacional (Tabla 6):

Tabla 6: Especificaciones técnicas (Hardware y software) del servidor web virtual donde es alojado el sistema de información oceanográfica CHONOS.

Memoria RAM	32 GB
Procesadores	8
Disco duro	500 GB
Sistema operativo	Centos 7
Servidor de mapas	Geoserver
Framework web	No
Servidor web	Apache 2.4
Base de datos SQL	No

Para la nueva versión de CHONOS fue adquirido un nuevo servidor web con las siguientes especificaciones técnicas (Tabla 7). Detalles más específicos pueden ser encontrados en el Anexo B.

Dentro del sistema CHONOS, se implementó un módulo lagrangiano de dispersión de partículas, con el objetivo de estudiar la trayectoria de diversos objetos usando los resultados del sistema de pronóstico hidrodinámico MOSA-ROMS. Este módulo, llamado Parti-MOSA, está disponible a través del sitio web <http://www.ifop.cl/chonos>. Consiste en una interfaz gráfica programada en php y javascript que despliega la zona de interés usando la API de GoogleMaps. A través de esta interfaz, los usuarios pueden seleccionar una ubicación desde la cual se realizará la dispersión de partículas con el puntero del ratón.

Además de esto se debe seleccionar, mediante la activación de un menú desplegable, la fecha del pronóstico de corrientes que será usado para los cálculos de trayectoria. Opcionalmente, se puede definir la profundidad a la que es liberada la partícula, y también

la superposición de un mapa de temperatura superficial del mar calculada por el modelo para el inicio del pronóstico seleccionado. En resumen, los pasos son:

1. Hacer clic en el punto de interés.
2. Seleccionar la fecha a simular.
3. Seleccionar la profundidad de liberación (opcionalmente usar el valor por defecto).
4. Apretar el botón calcular.

Internamente, estos pasos configuran el archivo inicial del modulo de cálculo de deriva lagrangiana. Existe otro código auxiliar que de forma automática, extrae de cada pronóstico hecho por MOSA-ROMS los campos de velocidad horizontal u y v , necesarios para este cálculo. Para esto se usan herramientas de NCO y rutinas en lenguaje “*shell*”. La trayectoria misma de la partícula es calculada usando el código computacional conocido como ROFF, que fue desarrollado por Xaver Capet en UCLA. Este código es una simplificación de un código antiguo del modelo ROMS. La trayectoria generada es guardada en formato NetCDF y posteriormente graficada en forma de líneas sobre la API de Google Maps.

Tabla 7: Especificaciones técnicas (Hardware y software) del nuevo servidor adquirido donde es alojado el sistema de información oceanográfica CHONOS actualizado.

Memoria RAM	128 GB
Procesadores	24
Disco duro	4 TB
Sistema operativo	Centos 7
Servidor de mapas	Geoserver
Framework web	Django 2.0
Servidor web	Nginx
Base de datos SQL	PostgreSQL

En el diseño de esta interfaz se tuvo como objetivo primordial el facilitar la interacción de cualquier usuario con los resultados del sistema de pronóstico MOSA-ROMS, sin que fuera necesario para el usuario tener conocimientos de oceanografía o modelación numérica, para así poder llegar a un universo de usuarios muy amplio. Además se diseñó la interfaz para que sea compatible con dispositivos digitales como tablets o smartphones.

Las limitaciones actuales de Parti-MOSA son principalmente la falta de la velocidad vertical en el cálculo de la trayectoria. Esto fue definido así para disminuir la cantidad de

información que era transferida entre los computadores donde se realizan los cálculos de MOSA-ROMS y el servidor web que alberga a Parti-MOSA, por lo que es un problema netamente práctico y en cuanto ambos sistemas computacionales estén integrados, o físicamente en la misma ubicación, puede ser solucionado. Además, se trabaja con partículas virtuales, las cuales no presentan cambios en densidad por su exposición a los campos de temperatura y salinidad, como podría ser en el caso de que la partícula representara una larva virtual. Esta limitación será solucionada en las mejoras siguientes a Parti-MOSA, mediante el reemplazo del código ROFF. Otra limitación extra, es que Parti-MOSA no considera el efecto del viento sobre las partículas que se quisieran liberar cerca de la superficie, el llamado "*windage*" por lo que la aplicación a usos de búsqueda y rescate o derrames de petróleo es mejorable. Si bien el resolver estas limitaciones puede mejorar el producto, también lo convierten en un modelo más complejo, al presentar a los usuarios más opciones a seleccionar, disminuyendo así el número de usuarios posibles, por lo que la versión 2 de Parti-MOSA cumple un rol importante al facilitar el "jugar" con los resultados de MOSA-ROMS de forma sencilla e interactiva.

En el entendido que también es importante desarrollar aplicaciones más complejas de deriva lagrangiana, se desarrolló una nueva versión de Parti-MOSA, el cual tiene como característica importante el estar basado en el código python OpenDRIFT (Dagestad et al., 2018). Este es un código de deriva lagrangiano que consta de diversos módulos los que pueden ser seleccionados para estudiar casos de búsqueda y rescate, derrames de petróleo, y estudio de larvas pelágicas. Reemplazamos ROFF con OpenDRIFT pues el código ROFF no está siendo desarrollado en la actualidad, y es posible para el equipo de trabajo implementar mejoras mediante programación en python.

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA

Estas reuniones entre el ejecutor del proyecto (División Investigación en Acuicultura, IFOP) y la 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. Por otra parte, para un mejor desarrollo de las actividades comprometidas y para lograr una mayor cobertura participativa, se utilizaron distintos medios como correo electrónico, telefonía y teleconferencias. La aplicación de esta modalidad de trabajo facilita la posterior colaboración ante requerimientos específicos que se generen en el desarrollo del proyecto.

4.2 Reuniones académicas

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

Reunión 1

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico “Meteodata” en sus dependencias en la ciudad de Santiago. En esta reunión se analizó el estado actual del servidor web en donde es alojado el sistema de información oceanográfica CHONOS y se establecieron las futuras mejoras e incorporaciones a desarrollar.

Fecha: 31 Mayo, 2018.

Lugar: Meteodata. Domeyko 1864, Santiago.

1. Mark Falvey (Meteodata)
2. Andres Arriagada (Meteodata)
3. Osvaldo Artal (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

Reunión 2

Se realizó una reunión técnica con el Dr. Andres Sepulveda y el Dr. Vincent Echevin en el departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción los días 21 y 22 de Junio. El Dr. Sepúlveda pertenece al departamento de Geofísica y el Dr. Echevin al Laboratorio de Oceanografía y Clima (LOCEAN) de la Universidad Pierre and Marie Curie (UPMC) en Francia. En esta reunión se trabajó en las implementaciones de las mejoras del portal web

para el pronóstico MOSA-ROMS y su producto derivado de seguimiento de partículas (Parti-MOSA). Además se avanzó en la confección de experimentos basados en modelos biogeoquímicos acoplados al modelo ROMS para la etapa V de este proyecto.

Fecha: 21 – 22 Junio, 2018.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Vincent Echevin (UPMC)
3. Osvaldo Artal (IFOP)
4. Valentina Besoain (IFOP)

Reunión 3

El asesor del proyecto, el Dr. Andrés Sepúlveda, visitó el centro Putemún para evaluar las actividades en desarrollo, entre ellas cabe mencionar: Evaluación MOSA-ROMS, estrategias de difusión, modelos biogeoquímicos, implementación del modelo atmosférico WRF y técnicas de asimilación de datos.

Fecha: 25 – 28 Julio, 2018.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Osvaldo Artal (IFOP)
3. Elias Pinilla (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)
5. Valentina Besoain (IFOP)
6. Oliver Venegas (IFOP)

Reunión 4

La colaboradora del proyecto, la Dra. Odette Vergara, visitó el centro Putemún para ver el estado de avance de los modelos biogeoquímicos y como .

Fecha: 13 – 14 Noviembre, 2018.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Valentina Besoain (IFOP)
3. Odette Vergara (UdeC)

Reunión 5

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico “Metedata” en IFOP-Castro. En esta reunión mostraron los nuevos cambios y mejoras para la nueva versión de CHONOS.

Fecha: 9 – 11 Enero, 2019.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Cristian Ruiz (IFOP)
3. Valentina Besoain (IFOP)
4. Gabriel Soto (IFOP)
5. Elias Pinilla (IFOP)
6. Pablo Reche (IFOP)
7. Milton Salas (IFOP)
8. Andres Arriagada (Metedata)
9. Mark Falvey (Metedata)

Reunión 6

La colaboradora del proyecto, la Dra. Odette Vergara, visitó el centro Putemún para ver el estado de avance de los modelos biogeoquímicos y como .

Fecha: 14 – 15 Enero, 2019.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Valentina Besoain (IFOP)
3. Gabriel Soto (IFOP)
4. Elias Pinilla (IFOP)
5. Odette Vergara (UdeC)

Reunión 7

Se realizó una reunión técnica con el asesor Dr. Andres Sepulveda y sus colaboradores Dr. Daniel Brieva y Dra. Odette Vergara en el departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción entre los días 8 y 10 de Abril del 2019. En esta reunión se trabajó en las mejoras del producto de seguimiento de partículas, Parti-MOSA. Además se avanzó en la confección de experimentos basados en modelos biogeoquímicos.

Fecha: 8 – 10 Abril, 2019.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Cristian Ruiz (IFOP)
3. Andrés Sepúlveda (DGEO)
4. Daniel Brieva (UdeC)
5. Odette Vergara (UdeC)

Reunión 8

Se realizó una reunión técnica con el asesor Dr. Andres Sepulveda y colaborador internacional Raschid Benschila en el departamento de Geofísica de la Universidad de

Concepción entre los días 13 y 14 de Junio del 2019. En esta reunión se trabajó sobre acoplamiento de modelos oceanográficos y atmosféricos usando OASIS.

Fecha: 13 – 14 Junio, 2019.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Oliver Venegas (IFOP)
3. Andrés Sepúlveda (DGEO)
4. Rashid Benshila (LEGOS)

Reunión 9

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Dr. Mark Falvey y Andrés Arriagada en las oficinas de Meteodata en Santiago los días 4 y 5 de Julio del 2019. En esta reunión se discutieron aspectos técnicos del portal web oceanográfico CHONOS y se capacita en su uso.

Fecha: 4 – 5 Julio, 2019.

Lugar: Meteodata. Domeyko 1864, Santiago.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Mark Falvey (Meteodata)
4. Andres Arriagada (Meteodata)

4.3 Talleres de trabajo

Una de las actividades del proyecto es la realización de un taller sobre desarrollo de técnicas de asimilación de datos. Esto con el objeto de adquirir los conocimientos básicos para su futura implementación en los pronósticos oceanográficos y atmosféricos. Estas técnicas permiten a través de datos observados generar una condición inicial con un error mínimo, disminuyendo la incertidumbre del modelo. El taller se ha dividido en 2 etapas, la primera realizada entre el 5 y el 7 de abril de 2017 en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción y la segunda entre 25 y 27 de Julio del 2018. Ambos talleres fueron dirigidos por el Dr. Andrés Sepúlveda.

En el primer taller se realizó una introducción teórica y práctica de los conceptos matemáticos y estadísticos sobre problemas inversos y la evaluación de posibles técnicas de asimilación de datos. Una de las conclusiones relevantes de este trabajo fue que se podría eventualmente realizar una asimilación de datos 3DVAR (enfoque variacional) con datos de TSM o del nivel de mar (altimetría) obtenidos de imágenes satelitales. Si bien no es suficiente, puesto que solo otorga información de la superficie del mar, es justamente la zona de mayor variabilidad, por lo que puede ser una primera aproximación. El segundo

taller fue de carácter práctico, en donde se revisaron los formatos requeridos por las observaciones y el modelo, para que estos sean compatibles al implementar asimilación de datos en el pronóstico operacional.

Fecha: 27 Julio, 2018.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Cristian Ruiz (IFOP)

4.4 Talleres de difusión

El proyecto contempla la realización de talleres de difusión sobre el estado de avance del modelo sinóptico. Estos talleres pueden ser abierto a la comunidad o cerrados a la discusión académica exclusivamente con diversos especialistas en modelación y oceanografía en Chile.

Taller difusión 1

El 5 de febrero del 2018 se realizo un taller de difusión de los resultados de los proyectos oceanográficos desarrollados en la Patagonia durante 2016 – 2017 en las dependencias de IFOP Valparaíso, donde se dio a conocer nuevos resultados a un amplio rango de invitados.

Fecha: 5 de febrero, 2018

Lugar: IFOP Valparaíso.

Expositores:

1. Gabriel Soto (IFOP)
2. Elias Pinilla (IFOP)
3. Cristian Ruiz (IFOP)

Taller difusión 2

El jueves 5 de septiembre del 2018 se realizó un taller de difusión de resultados de los proyectos de oceanografía de la División de Acuicultura. El taller se efectuó en el Hotel La Hostería en Castro, Chiloé. En él taller se presentaron resultados y evaluaciones del modelo, la implementación del modelo MOSA-WRF y el portal CHONOS.

Fecha: 6 de septiembre, 2018.

Lugar: La Hostería, Castro.

Expositores;

1. Heraldo Contreras (IFOP)
2. Oliver Venegas (IFOP)
3. Osvaldo Artal (IFOP)

4. Susana Giglio (SUBPESCA)
5. Elias Pinilla (IFOP)
6. Valentina Besoain (IFOP)
7. Ivan Perez Santos (U de Los Lagos)
8. Andres Sepulveda (UdeC)
9. Gabriel Soto (IFOP)
10. Pablo Reche (IFOP)
11. Cristian Ruiz (IFOP)

Taller difusión 3

El miércoles 28 de noviembre del 2018 se realizó un taller de capacitación de la plataforma web CHONOS. El taller se efectuó en las oficinas de INTEMIT en Castro.

Fecha: 28 de Noviembre, 2018.

Lugar: Oficina Intemit, Castro.

Expositores;

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Elias Pinilla (IFOP)
3. Pablo Reche (IFOP)

Taller difusión 4

El martes 14 de mayo del 2019 se realizó un taller de difusión sobre los resultados de los proyectos de oceanografía de la División de Acuicultura. El taller se efectuó en el hotel Dreams en Coyhaique. En el taller se presentaron los principales estudios oceanográficos realizados en la zona, además de presentar las nuevas características del portal web de información oceanográfica CHONOS.

Fecha: 14 de Mayo, 2019.

Lugar: Hotel Dreams, Coyhaique.

Expositores;

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Elias Pinilla (IFOP)
3. Gabriel Soto (IFOP)
4. Pablo Reche (IFOP)

Taller difusión 5

El jueves 23 de mayo del 2019 se realizó un taller de capacitación de las nuevas características de la plataforma web CHONOS. El taller se efectuó en las oficinas de INTEMIT en Castro.

Fecha: 23 de Mayo, 2019.

Lugar: Oficina Intemit, Castro.

Expositores;

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Elias Pinilla (IFOP)
3. Pablo Reche (IFOP)

4.5 Congresos académicos

Cristian Ruiz, Osvaldo Artal, Elias Pinilla, Héctor H. Sepúlveda. Sistema de información oceanográfica, CHONOS. VII Congreso Nacional de Acuicultura. Arica, 11 – 14 Septiembre, 2018. Expositor: Cristian Ruiz.

Valentina Besoain, Osvaldo Artal, Elias Pinilla, Héctor H. Sepúlveda. Modelo biogeoquímico en el mar interior de Chiloé: implementación y perspectivas. VII Congreso Nacional de Acuicultura. Arica, 11 – 14 Septiembre, 2018. Expositor: Valentina Besoain.

4.6 Compra y mantenimiento de equipo:

Desde la etapa II de este proyecto se han buscado alternativas para montar puntos de observación en línea que permitan conocer el grado de error que tiene el modelo operacional, como a su vez poder utilizar la información para mejorar las condiciones iniciales del modelo. En esta búsqueda se han realizado las siguientes actividades al respecto:

1. **Convenio IFOP – COPAS Sur-Austral (UdeC):** Este convenio firmado entre el Instituto de Fomento Pesquero y el Centro de investigación oceanográfica en el Pacífico Sur-Austral (COPAS Sur-Austral) busca poner en operación una boya oceanográfica perteneciente a la Universidad de Concepción en el Fiordo Puyuhuapi, comprometiendo a IFOP asumir los costos de mantención y puesta en marcha. Esta información será vital para disminuir la incertidumbre del modelo en una zona de alto interés.
2. **Convenio IFOP – MUSSEL:** Este convenio entre IFOP y el Centro para el estudio de forzantes múltiples socio-ecológicos marinos (MUSSEL), el cual está compuesto por varias instituciones, busca complementar la información que tiene MUSSEL en 2 puntos de observación en las costas de Chiloé central (Dalcahue y Chonchi). Estos puntos miden temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y otros parámetros. IFOP se compromete a incorporar estaciones meteorológicas y la capacidad de transmitir en línea dicha información para, entre otros usos, ser utilizados por el modelo operacional en su evaluación y calibración.

3. **Compra de equipos multiparámetros y estaciones meteorológicas:** IFOP ha adquirido recientemente 5 estaciones meteorológicas con capacidad de transmisión de datos en línea y 3 sensores multiparámetros, los cuales miden entre otras cosas, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. Este material será destinado para la creación de 3 puntos de observación en línea entre Chiloé Central y Aysén, y complementar las estaciones de muestreo de MUSELS en Chiloé Central con estaciones meteorológicas. Los equipos multiparámetros resultaron con problemas de implementación por lo que actualmente se están cotizando nuevas alternativas.

4. **Renovación Sistema de Computo:** Debido a la creciente demanda y la evolución natural del sistema integrado de información fue necesario adquirir un nuevo sistema de computo (Anexo B). Este sistema es un versión mejorada y más moderna de la tecnología con la que se contaba. Por otra parte, este equipo será montado en las instalaciones del IFOP en Viña del Mar, con el fin de mejorar los tiempos de transferencia de datos entre el servidor del pronóstico y el servidor web en donde se despliega la información generada.

5. **Adquisición servidor web:** Dado las nuevas opciones de visualización y los nuevos productos incorporados al sistema de observación oceanográfico CHONOS se adquirió un equipo exclusivo para este propósito. Las especificaciones técnicas pueden ser encontradas en el anexo B.

4.7 Carta Gantt del proyecto

El proyecto tiene una duración total de 20 meses, comenzando en enero del 2018 y finalizando en agosto del 2019.

Actividades	E18	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E19	F	M	A	M	J	J	A
1. Mejoramiento fuentes de agua dulce	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
2. Acoplamiento modelo WRF	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X									
3 Mejorar batimetría							X	X	X	X										
4. Evaluación modelo v/s observaciones								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5. Desarrollo aplicación web para usuarios					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
5 Taller para usuarios aplicación web									X							X				
9. Taller difusión																				X
10. Reuniones de coordinación	X				X			X					X							X

5. RESULTADOS

5.1 Resultados objetivo específico 1: Optimizar y calibrar el sistema operacional oceanográfico para la región de Los Lagos y la región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

Paralelamente al trabajo de mantención y soporte informático que requiere el sistema para que los procesos de automatización se mantengan constantes y robustos, se ha trabajado continuamente en mejorar el desempeño del modelo numérico. Para esto se han diseñado experimentos que buscan mejorar la representación de las distintas variables oceanográficas físicas como temperatura, salinidad y corrientes oceánicas a través de mejoras en la condición inicial, efectos de aportes de nuevas fuentes de agua dulce, mejoras en las condiciones atmosféricas, cambios en la batimetría o en la forma de distribuir las capas verticales del modelo. Finalmente se ha realizado un diagnóstico de modelación biogeoquímica.

5.1.1 Evaluación mejoramiento condición inicial

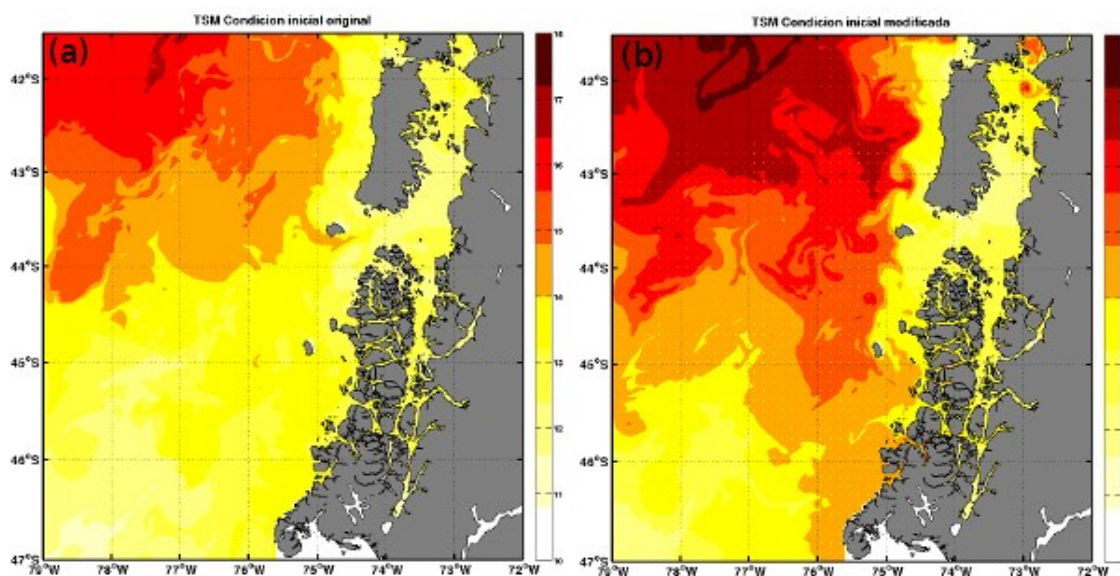


Figura 18: Condiciones iniciales utilizadas en el experimento de asimilación de datos. (a) SST original, (b) SST perturbada.

Implementamos un experimento utilizando una técnica de asimilación simple denominada “Ocean Observation Simulation Experiment” (OOSE). La prueba consistió en combinar la condición inicial de SST de MOSA-ROMS del día 10 de marzo del 2018 con datos de SST grillados cada 10 kilómetros de la condición inicial de SST del 28 de marzo del 2018. Se realizaron 1 simulación a 72 horas correspondiente al día 28 de marzo del 2018 (Fig. 18).

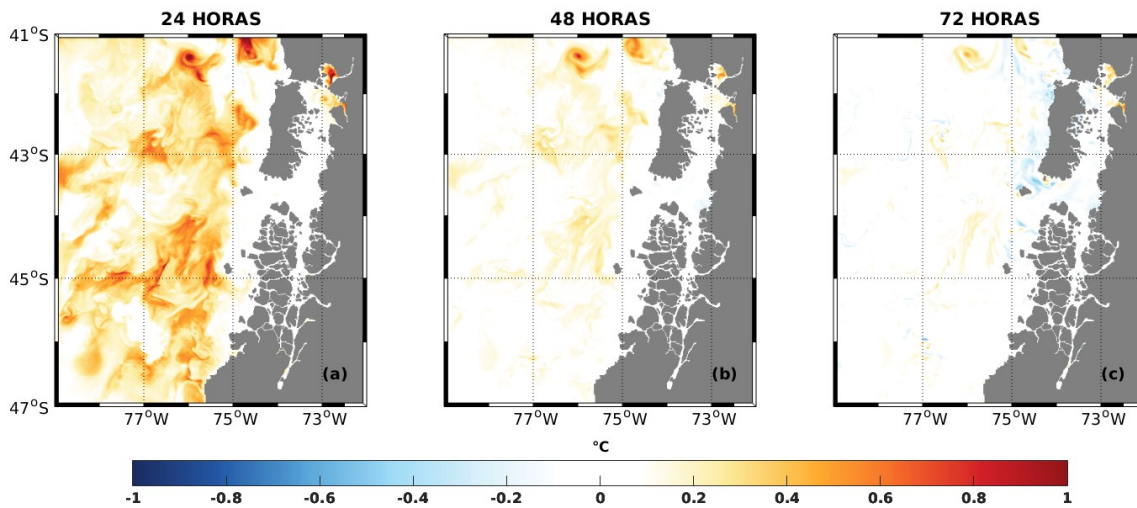


Figura 19: Mapa residual de temperatura superficial del mar entre pronósticos oceanográfico del 28 de Marzo del 2018 con y sin asimilación de datos en (a) 24 horas, (b) 48 horas, y (c) 72 horas.

Podemos observar que las principales diferencias en los campos simulados de SST con o sin asimilación de datos son producto mas bien de la condición inicial que de los datos asimilados (Fig. 19). Las principales diferencias son dentro de las primeras 24 horas, las cuales para esta fecha en particular pueden alcanzar diferencias cercanas a 1 °C. Esto es esperable, ya que combinamos los datos a asimilar con una condición inicial de aproximadamente 2 semanas antes del pronóstico, y por ende, una condición más cálida. Después de las 48 horas de simulación se observa que el producto con asimilación de datos tiende a reproducir los mismos patrones de SST que la simulación sin asimilación, lo que nos permite inferir que el uso de datos asimilados debería ser como máximo cada 24 horas. Posterior a las 24 horas la simulación numérica estará influenciada y regulada principalmente por las condiciones de borde.

Al centrarse en la SST en puntos específicos dentro del mar interior de Chile podemos notar la influencia del ingreso de aguas oceánicas a través de la boca del Guafo, así como de la condición oceanográfica local. En el caso del seno Reloncaví se observó una diferencia de ~ 2.5 °C entre las condiciones iniciales con y sin asimilación (Fig. 20a). Tal como se mencionó anteriormente los rangos de diferencia disminuyen notablemente después de las 24 horas (< 0.5 °C), lo que implica que esta zona esta reguladas por las condiciones iniciales locales. En el golfo Corcovado ocurrió que la condición inicial con o sin asimilación fueron muy similares con una diferencia del orden de 0.1 °C (Fig. 20b). Aquí ocurre lo contrario que en el caso del seno Reloncaví, pues los valores de SST de las simulaciones con o sin asimilación de datos son casi idénticas dentro de las primeras 24 horas de pronóstico. Luego de las 24 horas las diferencias entre simulaciones aumentaron a más del doble posiblemente por la diferencias de SST en la parte oceánica y el ingreso de

estas aguas oceánicas al mar interior. Finalmente en el caso del estero Elefantes se observa una diferencia del ~ 0.8 °C entre las condiciones iniciales con o sin asimilación (Fig. 20c). A diferencia del seno Reloncaví las simulaciones tendieron a ajustarse mucho más rápido, casi a las 6 horas, posiblemente por la falta de datos asimilados en esta zona.

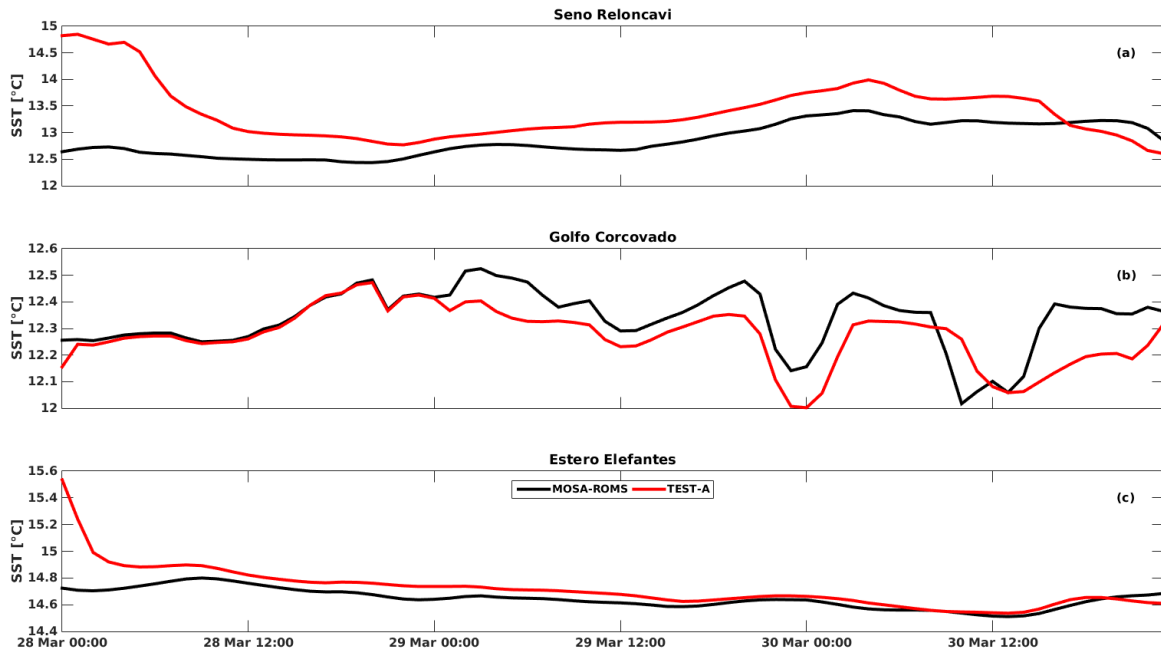


Figura 20: Series de tiempo de temperatura superficial del mar con y sin asimilación de datos. (a) Seno Reloncaví, (b) Golfo Corcovado, y (c) Estero Elefantes

5.1.2 Evaluación efectos fuentes de agua dulce.

Con el objeto de mejorar la representación de las estructuras termohalinas verticales de MOSA-ROMS, se procedió a incorporar nuevas fuentes de agua dulce obtenidas de un estudio de caudales de ríos en la zona de Estero Elefantes y Laguna San Rafael, (ver metodología 3.1.2), y al mismo tiempo corregir los aportes de Campos de Hielo Sur, emplazados en la Laguna San Rafael. Esto genera un modelo con 33 fuentes de agua dulce, que llamaremos MOSA-TEST.

Al comparar la distribución de salinidad a lo largo del estero Elefantes entre MOSA-ROMS y MOSA-TEST resulta evidente el incremento de agua de alta boyantes en superficie en este último, el cual se mantiene desde el extremo sur hasta el canal Costa por el norte (Fig. 21a). Esta capa de baja salinidad se mantiene en los primeros 10 metros de profundidad, provocando una fuerte estratificación de la columna de agua, manteniendo una circulación de 2 capas a través del canal. Este volumen de agua dulce extra produce un hundimiento de la termoclina, especialmente cerca de la confluencia entre río Témpanos y

el estero Elefantes. Estos rasgos no son observados en MOSA-ROMS, donde se presenta una columna más homogénea y mezclada, con valores de salinidad mayores en general. Al observar los datos de CTD, notamos que estos presentan una capa totalmente mezclada en la cabeza del canal, lo cual no está representado en el modelo, sin embargo, una vez que la capa se estratifica tiende a presentar una estructura vertical más cercana a MOSA-TEST, cuyos valores de salinidad también se aproximan de manera satisfactoria al observado.

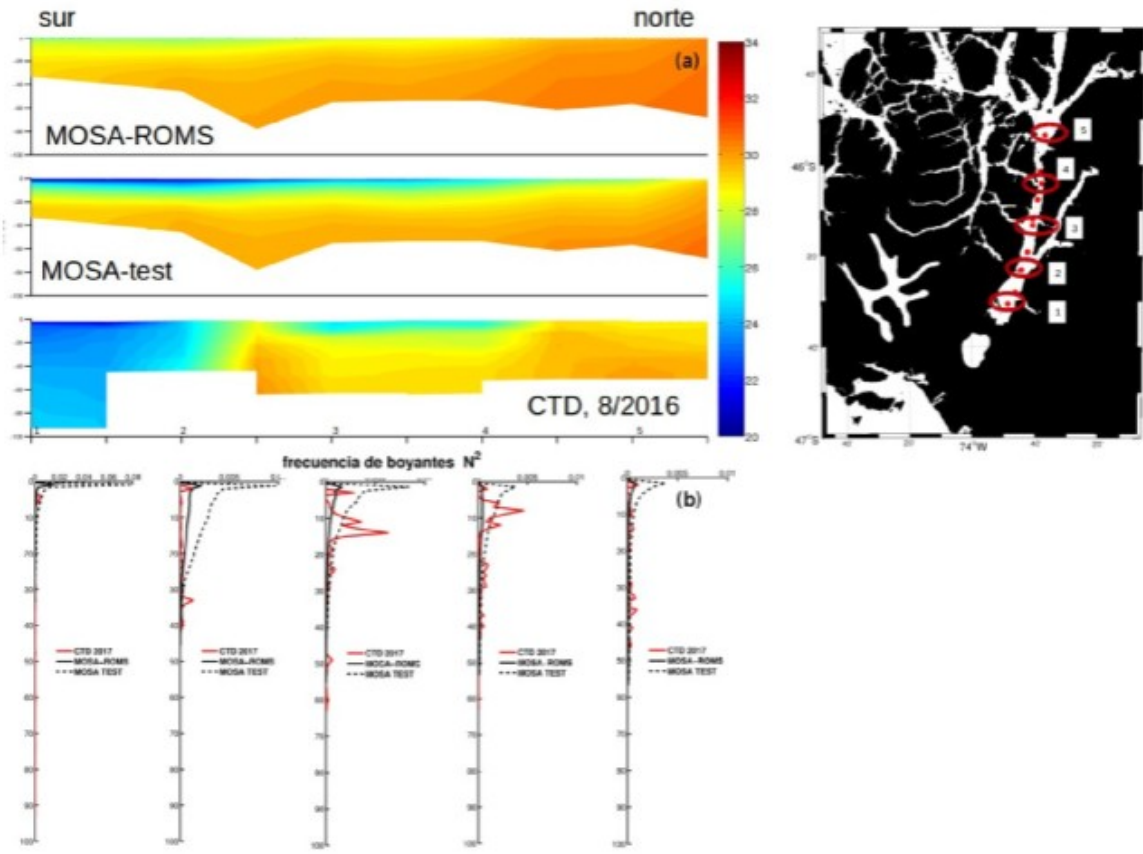


Figura 21: (a) Distribución de salinidad a lo largo del estero Elefantes para datos de MOSA-ROMS, MOSA-test y una transecta de CTD durante agosto de 2016. (b) Perfiles de frecuencia de boyantes N^2 para MOSA-ROMS (línea negra), MOSA-TEST (línea de puntos) y CTD de control (línea roja) en las estaciones indicadas en el mapa.

Con respecto al dominio, notamos que existe una diferencia considerable de profundidad en el golfo Elefantes entre el modelo y lo observado en los perfiles de CTD. Esta discrepancia está localizada en la cabeza del estero Elefantes, donde se encuentra el Golfo Elefantes, el cual separa la cabeza del estero con el resto del canal a través del paso Quesahuen, formando una constricción que marca un cambio abrupto en la profundidad. Este rasgo morfológico no está definido en el dominio de MOSA-ROMS, lo cual explica la diferencia observada.

Para evaluar la capacidad de mezcla y estratificación del modelo con las nuevas fuentes se utilizaron algunas estaciones de CTD como control de la frecuencia de boyantes (N^2) a lo largo de la transecta (Fig. 21b). Los perfiles indican que en la cabeza del Estero Elefantes, el modelo de prueba MOSA-TEST, sobrestima la estratificación, mientras que los datos presentan una columna completamente mezclada, esto producto de la diferencias de batimetría explicada anteriormente. Por su parte MOSA-ROMS presenta una débil estratificación en este punto, mostrándose mas homogénea y mezclada hacia el norte. A lo largo de la transecta, los perfiles de N^2 presentan una capa de mezcla mas profunda en los datos observados que en los pronósticos, aunque la magnitud de esta se acerca mas a MOSA-TEST que a MOSA-ROMS. Sin embargo, hacia el norte de la transecta, los perfiles de MOSA-TEST y los CTD presentan un mejor ajuste, denotando un efecto de propagación de la profundidad de la capa de mezcla hacia el norte que encuentra su equilibrio cerca del canal Costa.

Los resultados presentados dejan en evidencia que la configuración actual MOSA-ROMS no representa de manera satisfactoria los procesos esperados en esta zona, la cual cumple un rol dominante en la dinámica de las estructuras verticales a lo largo del estero Elefantes y el canal Costa. Por esta razón, desde agosto del 2018 MOSA-ROMS se encuentra operativo con 33 fuentes puntuales de agua dulce, resultando en un modelo estable numéricamente.

5.1.3 Evaluación mejoramiento forzante atmosférico.

Dentro de las primeras actividades desarrolladas para mejorar el desempeño del modelo atmosférico MOSA-WRF fue realizar un análisis de escalamiento computacional. El desempeño variando la cantidad de núcleos para simular 1 día de pronóstico son resumidos en la Tabla 8.

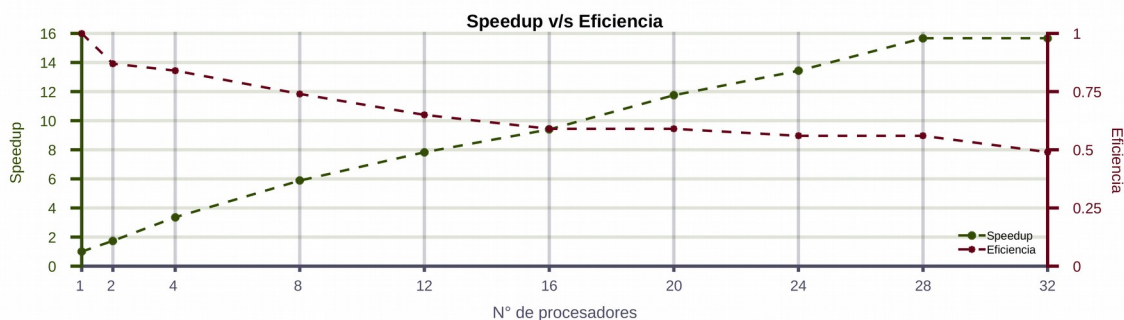


Figura 22: Eficiencia modelo MOSA-WRF sobre una maquina de 32 procesadores.

Dado que la eficiencia debe ser mayor a 0.5 (con un decimal), según la Fig. 22, el número de núcleos que se debiera utilizar para ejecutar el sistema operativo MOSA-WRF,

es de a lo más 28. Simulaciones con un número mayor de núcleos no serían eficientes, ocuparían más recursos computacionales e inclusive pueden resultar en mayores tiempos de computo.

Tabla 8: Escalamiento simulaciones con modelo MOSA-WRF sobre una maquina de 32 núcleos.

N.º Cores	1	2	4	8	12	16	20	24	28	32
TIEMPO (MIN)	47	27	14	8	6	5	4	3.5	3	3
SPEEDUP	1	1.74	3.36	5.88	7.83	9.4	11.75	13.43	15.67	15.67
EFICIENCIA	1	0.87	0.84	0.74	0.65	0.59	0.59	0.56	0.56	0.49

Por otro lado se realizó una evaluación del modelo MOSA-WRF de 3 km, puesto en marcha blanca desde el 28 de enero de 2019. Para esto comparamos sus resultados con el modelo operacional MOSA-WRF de 5 km y con las salidas del modelo WRF suministra por la DMC de 12 km de resolución espacial . El periodo escogido para la evaluación de los tres pronósticos (MOSA-WRF, DMC y MOSA-WRF3km) se estableció en función del tiempo que lleva ejecutándose el dominio MOSA-WRF3km. Por lo tanto se fijó el periodo 28/01/19 – 24/07/19 y se estudiaron las variables magnitud y dirección del viento, mediante rosas de viento y radiación solar a través del análisis de su ciclo diario. Las estaciones escogidas para el caso de los vientos, fueron Cucao, por sus condiciones oceánicas con topografía abierta y Huinay, por su fuerte influencia de la componente topográfica, al encontrarse en un valle precordillerano. Y para el caso de la radiación solar se consideró Cucao y Melinka, ya que son las únicas con sensor de radiación solar implementado.

El tiempo de cómputo promedio para este último escenario de prueba es de 6 horas, almacenando un total de 20 Gb para cada pronóstico. En la figura 23 se puede apreciar el rendimiento de este dominio desde que se lanzó hasta el 24 de julio de 2019, indicando con un 1 si el pronóstico fue exitoso y con un 0 si el pronostico sufrió una caída de cualquier índole. La gráfica muestra solo en ocho ocasiones un pronostico defectuoso de un total de 178. Esto significa que MOSA-WRF3km alcanzó un ~ 95 % de estabilidad.

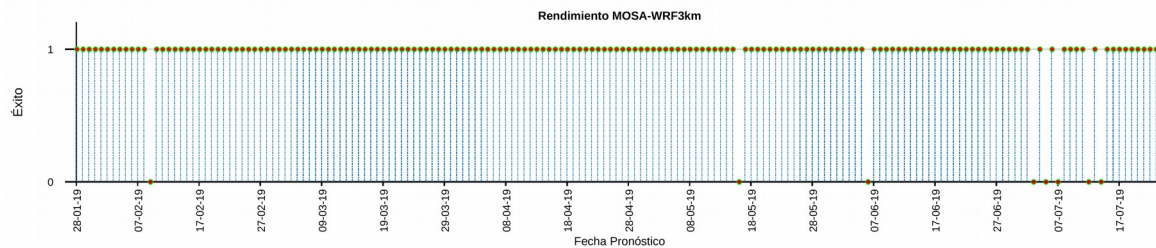


Figura 23: Rendimiento del sistema MOSA-WRF3km para el periodo 28/01/18 – 24/07/19. Se indica con el número 1 un pronóstico exitoso a 3 días y con un 0 el fracaso del pronóstico.

En Cucao podemos apreciar una componente principal en la dirección del viento con mayores magnitudes y frecuencia provenientes del noroeste y norte (Fig. 24). Junto a estas, le sigue una importante componente con origen en el suroeste con intensidades poco menores y una frecuencia del 10 % de ocurrencia. Al observar las salidas pronosticadas, podemos afirmar que el sistema MOSA-WRF logra reproducir las componente de mayor frecuencia y magnitudes proveniente del noroeste y norte, sin embargo la componente con origen en el suroeste no se logra resolver, resaltando una tercera componente considerable desde el noroeste-oeste. El pronóstico de la DMC logra reproducir las mismas direcciones principales, sin embargo, la de mayor ocurrencia en este caso, es desde el norte y la siguen las del noroeste y noroeste-oeste. Finalmente el pronóstico de mayor resolución MOSA-WRF3km logró resolver de mejor manera las principales direcciones del viento, junto a su frecuencia de ocurrencia, siendo estas las de mayor frecuencia y magnitud desde el noroeste y noroeste-oeste, y por último la tercera componente de considerable relevancia desde el suroeste con frecuencia cercana al 10 % que los otros modelos no pudieron resolver.

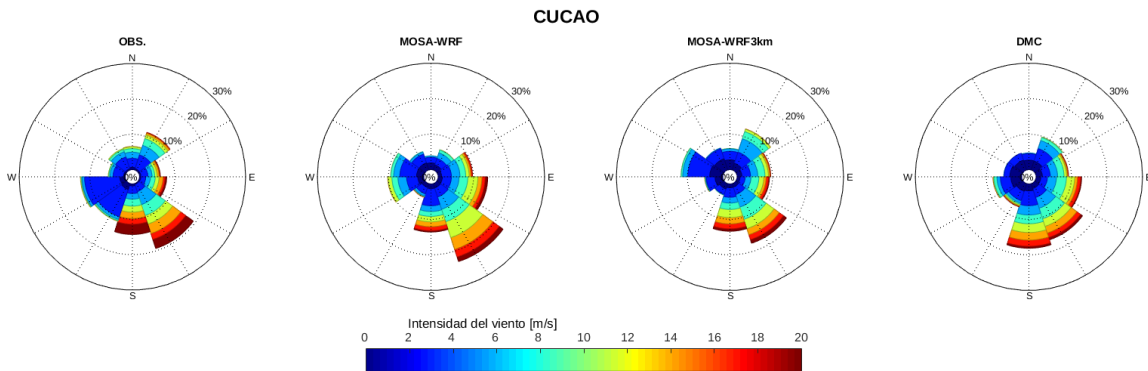


Figura 24: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF, MOSA-WRF3km y DMC en Cucao durante el periodo 28/01/19 – 24/07/19.

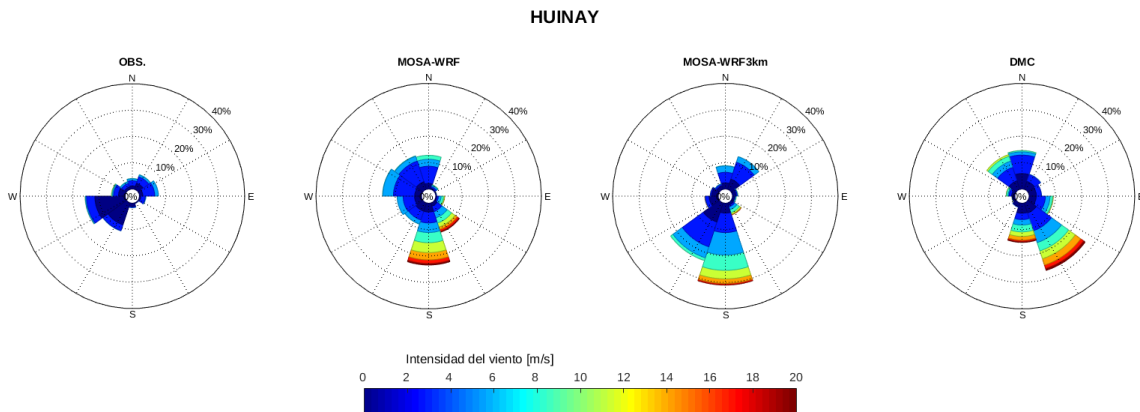


Figura 25: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF, MOSA-WRF3km y DMC en Hunay durante el periodo 28/01/19 – 24/07/19.

En la estación de Huinay se registraron vientos de menor intensidad, con máximos de ~ 8 m/s, destacando principalmente la dirección noreste-suroeste. Esta dirección dominante responde en gran parte a los vientos de montaña que circulan a través del valle, orientado en la misma dirección en donde se encuentra emplazada la estación (Fig. 25). Los tres pronósticos resolvieron como componente principal vientos procedentes del norte (MOSA-WRF y MOSA-WRF3km) y noroeste (DMC), sin embargo la componente en el eje noreste-suroeste fuertemente influenciada por la topografía solo fue resuelta por el pronóstico MOSA-WRF3km.

En el caso del ciclo diario de la radiación solar, en Cucao se puede observar una ajustada fase de los distintos pronósticos con respecto a las observaciones (Fig. 26). Sin embargo, la amplitud de la señal tuvo ciertos desajustes. El pronóstico de la DMC presentó una subestimación del 27% de la amplitud de la señal observada. Por su lado MOSA-WRF sobrestimó esta señal en un 11%. Finalmente el modelo MOSA-WRF3km fue el que mejor se ajustó en términos de amplitud, sobrestimando las observaciones solo un 9%.

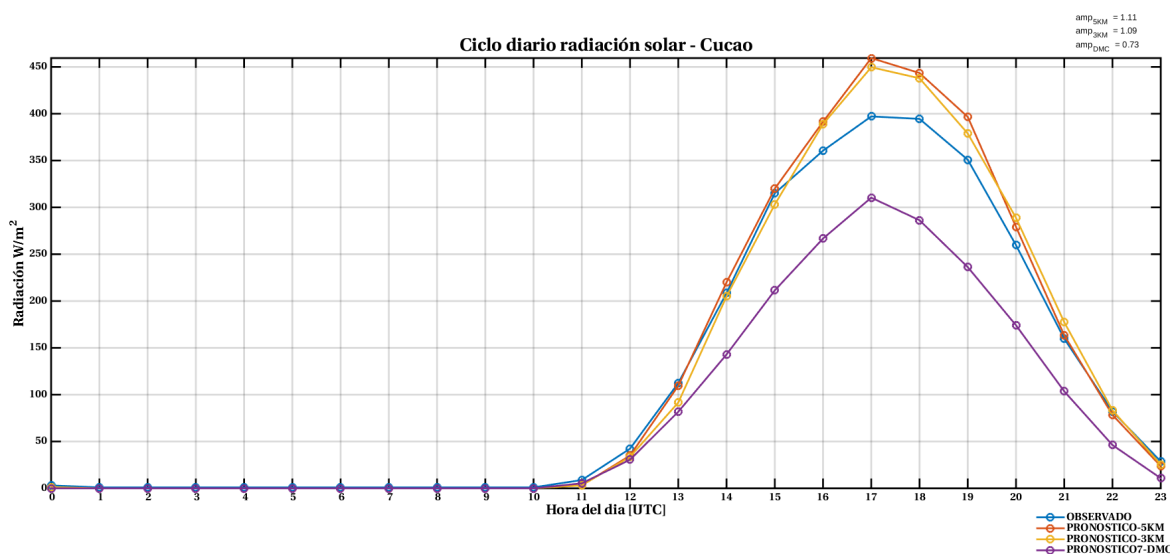


Figura 26: Ciclo diario de la radiación solar para la estación de Cucao entre 28/01/19 – 24/07/19. En azul se muestran datos observados, en rojo MOSA-WRF, amarillo MOSA-WRF3km y morado DMC.

En Melinka, las fases se representaron de igual manera, ajustándose en gran parte a la señal observada (Fig. 27). No obstante, al igual que en Cucao hubo imprecisiones al resolver la amplitud del ciclo diario. Nuevamente, el pronóstico de la DMC es el producto menos fiel con los datos observados, ya que subestimó en un 23% dichas amplitudes. Para los modelos MOSA-WRF y MOSA-WRF3km se obtuvo un error similar, sobrestimando en un 19% las observaciones.

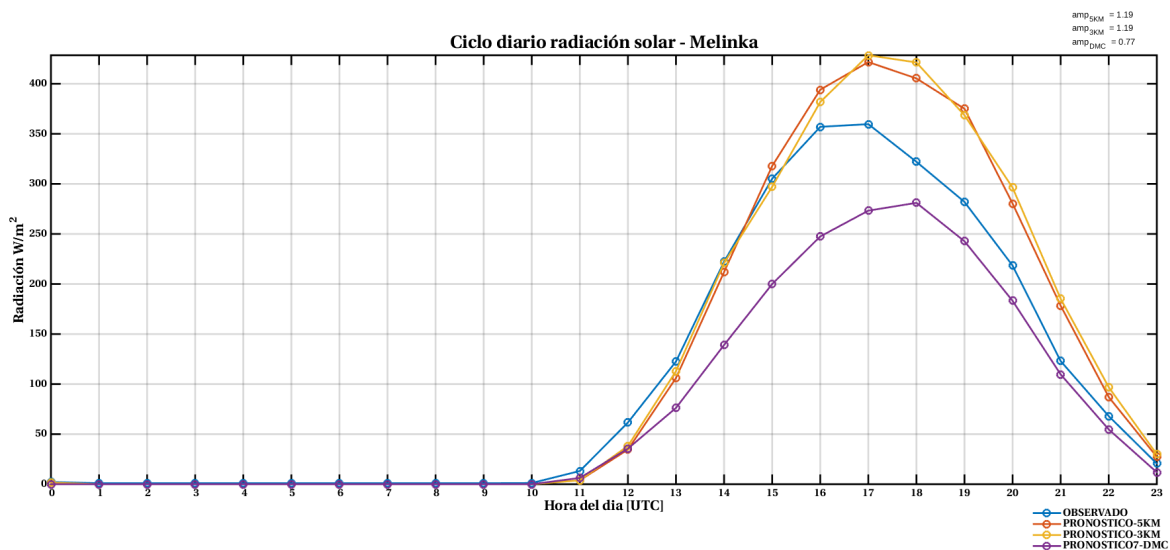


Figura 27: Ciclo diario de la radiación solar para la estación de Melinka entre 28/01/19 – 24/07/19. En azul se muestran datos observados, en rojo MOSA-WRF, amarillo MOSA-WRF3km y morado DMC.

5.1.4 Evaluación del efecto de la batimetría.

Se han identificado zonas donde la batimetría del dominio MOSAV3 presenta diferencias significativas con respecto a las sondas batimétricas disponibles. Estas zonas podrían eventualmente podrían afectar al desarrollo de estructuras hidrodinámicas coherentes en la zona. Realizamos experimentos de estabilidad con 2 grillas modificadas, denominadas MOSAv4a y MOSAv4b. Dichas grillas contienen cambios en zonas que se identificaron previamente como sensibles.

Específicamente se trabajó en la modificación de la batimetría en las zonas del estero y seno del Reloncaví, fiordo Comau y alrededores de isla Queullin, dentro de la región de Los Lagos. En la región de Aysén se realizaron ajustes en el archipiélago de las Guatecas, canales King, Byron, Ninualac, Errázuriz, Costa, estero Elefantes, y en los fiordos Quitr Alco y Cupquelán. En cada una de estas zonas se corrigieron eventuales disparidades, utilizando cartas náuticas del SHOA.

Las grillas se construyeron en base a parámetros que indican el grado de suavizado empleado en ellas. Cabe recordar que en ROMS se sugieren ciertos rangos de suavizado en las grillas, a modo de hacerlas numéricamente estables. En este caso se utilizan 3 parámetros:

1. r_target : Es un parámetro de pendiente, resultado del cociente entre el gradiente horizontal de la profundidad y la misma profundidad ($r = grad(h)/h$).

2. filter_deep_topo: Define el numero de pasadas de un filtro selectivo para para reducir el aislamiento de montes submarinos y singularidades.
3. n_filter_final: Hace referencia al numero de pasadas de un filtro Hanning al final del procedimiento que evita la persistencia de ruidos en los datos.

Tabla 9: Parámetros de suavizado utilizados en la actual y nuevas grillas del modelo MOSA-ROMS.

	MOSAv3	MOSAv4a	MOSAv4b
r_target	0.25	0.25	0.33
n_filter_deep	4	0	1
n_final	2	0	2

Los valores utilizados en las nuevas grillas se muestran en la tabla 9. Notar que al tratarse de una modificación sobre una grilla ya suavizada, se evita el empleo de filtros. Los valores escogidos son producto de diversas pruebas de sensibilidad, que buscaron introducir cambios en una grilla ya estable, pero sin generar grandes saltos de batimetría en ella.

La profundidad en las nuevas grillas alcanza los 400 m en la boca del estuario Reloncaví, siendo uno de los cambios mayores en la región de los Lagos (Fig. 28). También hay cambios considerables en el paso de Islas Queullin, la cual es una importante zona de intercambio de aguas entre la cuenca del seno Reloncaví y el golfo Ancud. Por otra parte, aun cuando se introducen cambios en el fiordo Comau, las grillas mostraron diferencias menores con la grilla actual.

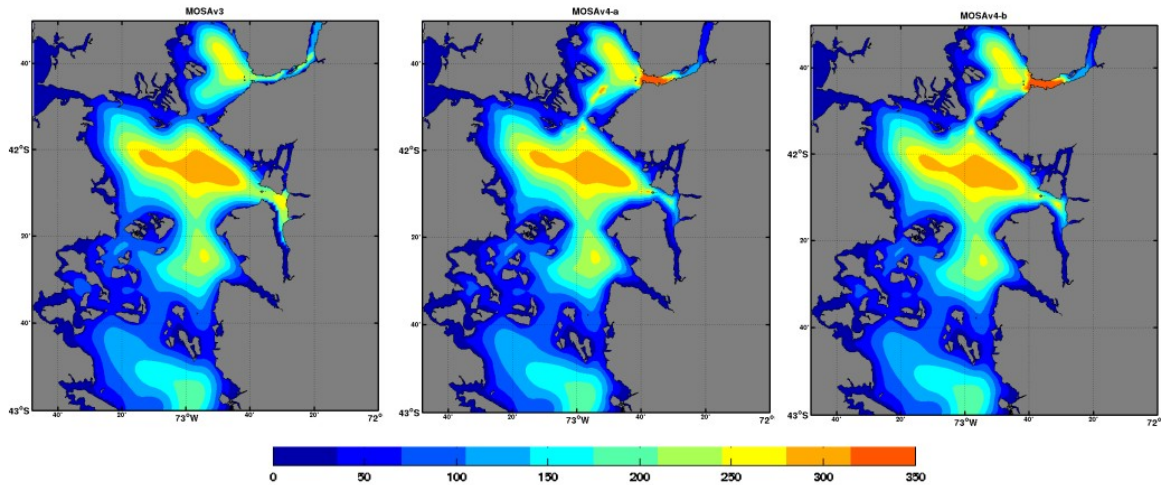


Figura 28: Batimetría en la zona norte del mar interior de Chiloé de la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda), y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).

Análogamente, en la región de Aysén se realizaron modificaciones en diferentes zonas, que podrían causar un impacto significativo en diferentes procesos oceanográficos. Los cambios en los rangos de profundidad fueron menores a los modificados en Chiloé y estuvieron centrados en la zona insular de Aysén (Fig. 29). En el archipiélago de las Guaitecas se mejoró la entrada al canal Tuamapu en el oeste, donde se buscó mejorar la definición de dicha cuenca. En el Archipiélago de Chonos se trabajó en los canales King y Perez. También se realizaron ajustes menores en el Canal Ninualac, Byron, Goñi y Darwin. En el canal Moraleda se realizaron modificaciones importantes en la zona del archipiélago las Huichas, mientras que cambios menores se realizaron en los canales Errázuriz, Costa y en el Estero Elefantes. En este último se disminuyó la profundidad a valores más reales, debido a que MOSAv3 mostraba un canal amplio y profundo en lugar de un angostura y una constricción presentes al norte de la boca del fiordo Cupquelán.

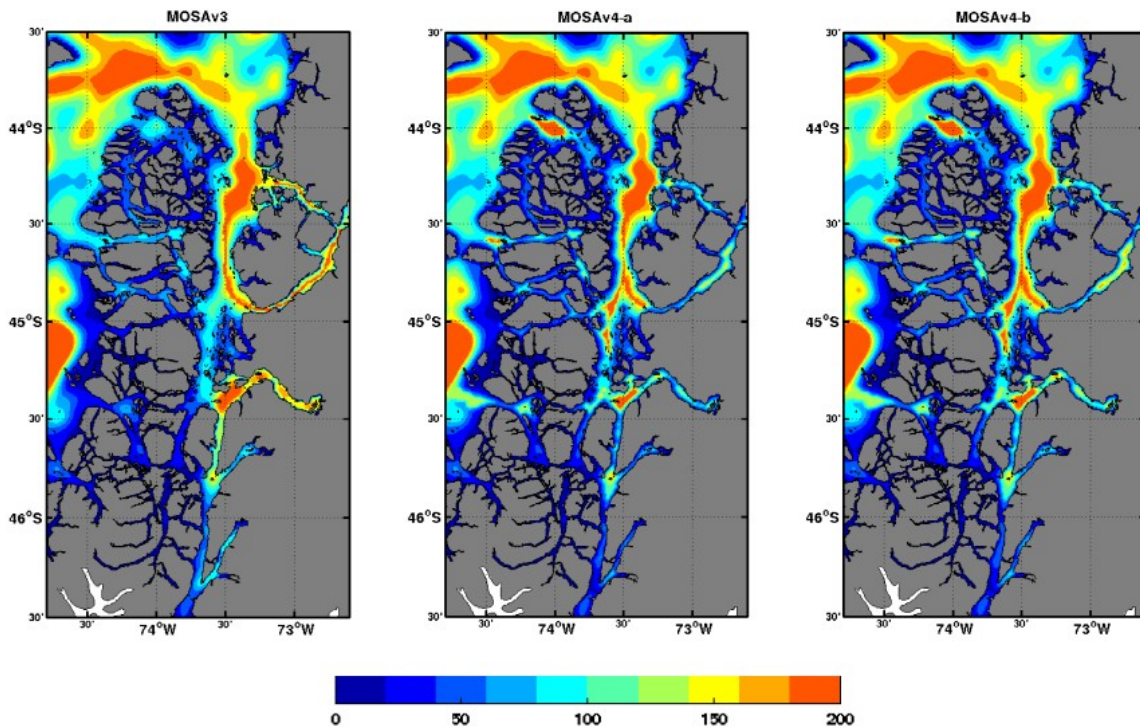


Figura 29: Batimetría en la zona sur del mar interior de Chiloé de la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda), y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).

Las series de tiempo del nivel del mar en los puntos de control durante la simulación entre el 21 y 24 de agosto, muestran que en general se mantiene el ajuste que se venía observando con la grilla actual con una señal relativamente en fase y con errores menores (Fig. 30). Se observan también inestabilidades al inicio de la simulaciones, especialmente en Ancud Castro y Puerto Chacabuco, lo que indica que el modelo necesitaría un tiempo mayor de estabilización para poder acomodar la condición inicial usada. No obstante, los

resultados muestran un desempeño satisfactorio de las nuevas grillas, sumado al hecho de que se mostraron estables en las simulaciones.

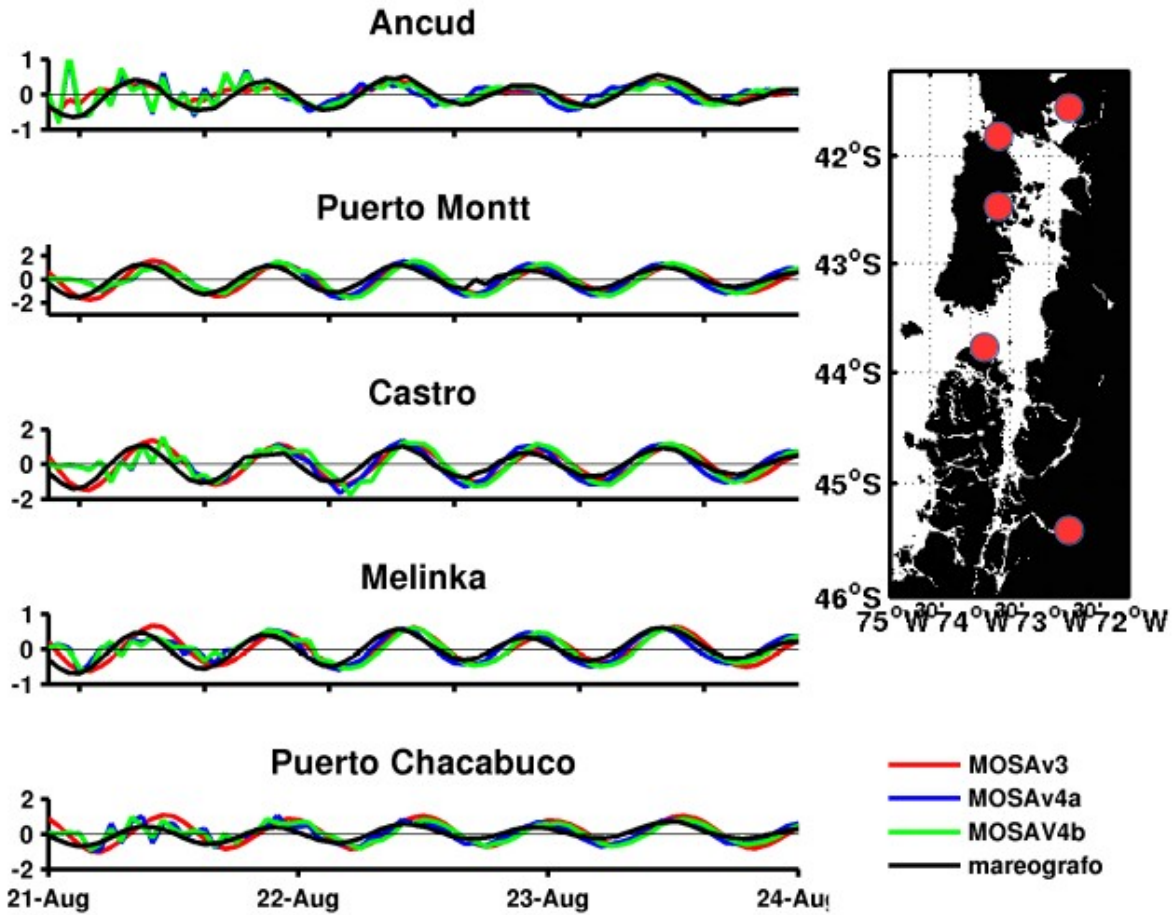


Figura 30: Series de tiempo del nivel del mar observada y modelada con las grillas actual MOSAv3 y las de prueba MOSAv4a y MOSAv4b.

Por otra parte, buscamos una nueva distribución de los niveles verticales de las coordenadas que siguen la batimetría modificando los parámetros de fondo y de estiramiento. Después de varias modificaciones a estos valores, se optó por testear una configuración con los valores de $\theta_b=2.5$ y $T_{cline}=20$. La figura 31 muestra un transecto longitudinal con la distribución de niveles verticales actualmente usada por MOSA (MOSAv3) entre Petrohué y el canal Apiao, cruzando todo el fiordo Reloncaví. Por otra parte, la figura 32 presenta la misma transecta pero esta vez con la batimetría modificada (más profunda). Esta nueva configuración en la distribución de los niveles verticales mantiene una mínima distancia entre si en superficie cuando la profundidad aumenta, como ocurre en la boca. Este tipo de esquemas es altamente recomendable para las zonas estuarinas, ya que mantiene una alta resolución de cálculo en la capa superficial, que es donde ocurren la mayoría de los procesos de mezcla e intercambio.

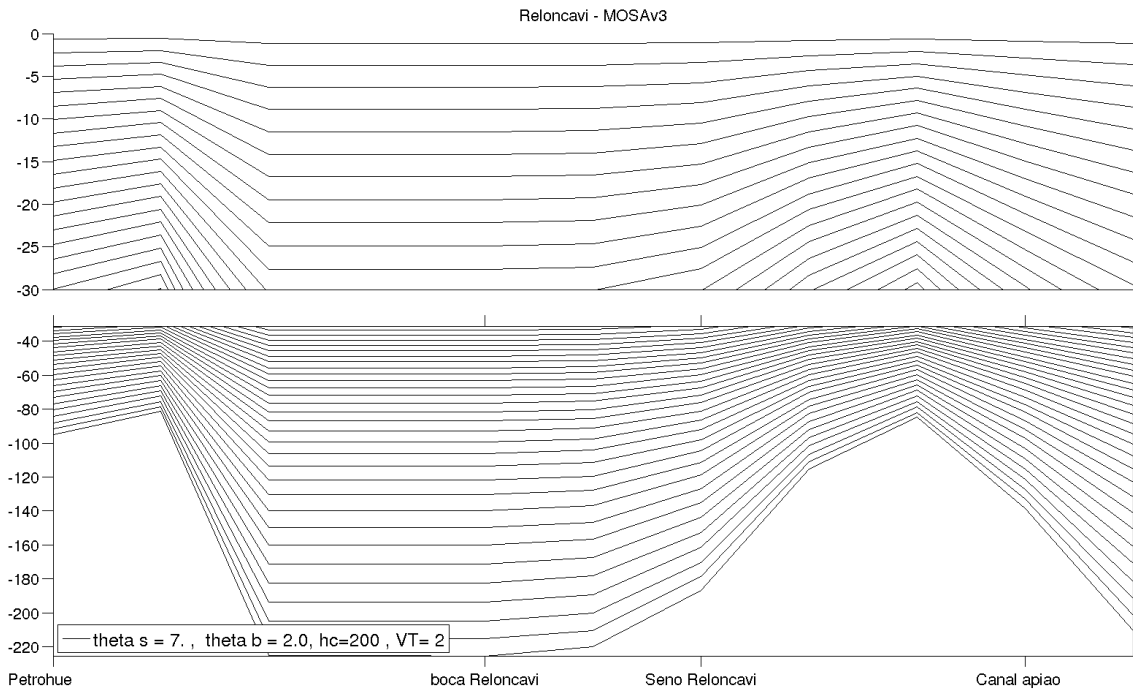


Figura 31: Transecta longitudinal de la distribuci3n de los niveles verticales actuales en MOSA-ROMS entre Petrohu3 (cabeza fiordo Reloncav3) y canal Apiao.

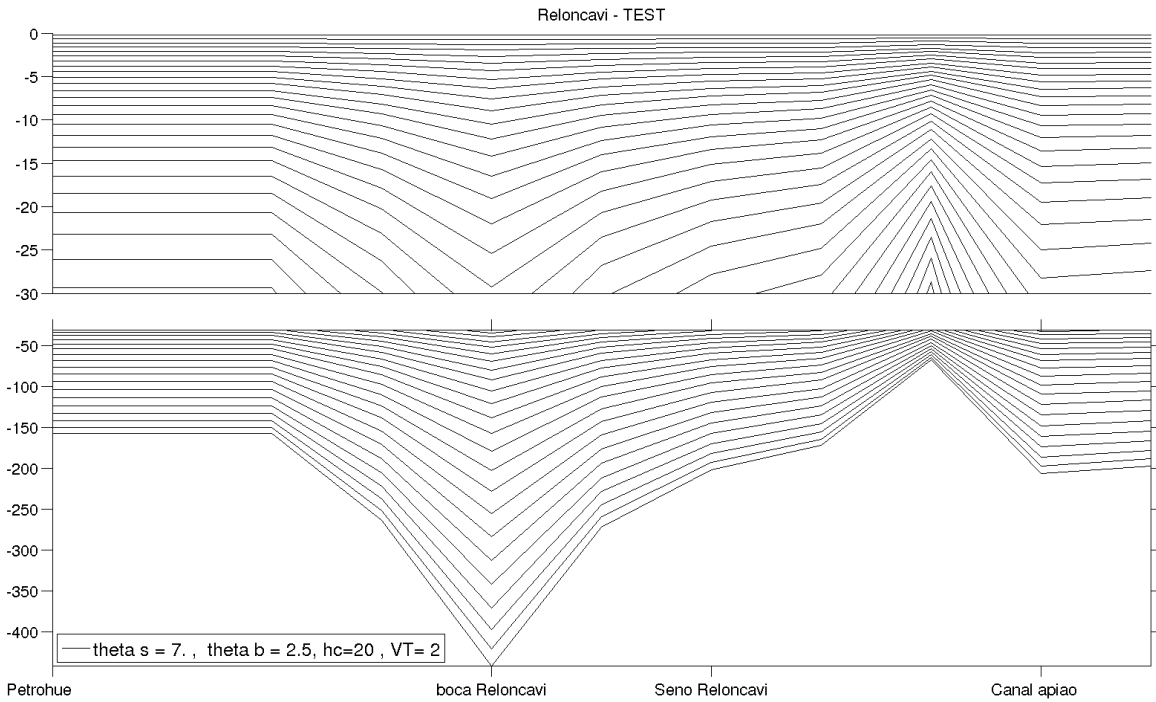


Figura 32: Transecta longitudinal de la distribuci3n de los niveles verticales modificados entre Petrohu3 (cabeza fiordo Reloncav3) y canal Apiao.

Las modificaciones a la batimetría y de los niveles verticales serán utilizadas para construir el dominio MOSAv4 definitivo. Sin embargo, luego de ser construido, se debe testear en modo operacional donde se evaluará su estabilidad durante un periodo suficiente (generalmente un mes), hasta tener certezas que no provoque errores en los cálculos ni genere inestabilidades en el sistema. Se espera en los próximos meses su implementación final.

5.1.5 Evaluación modelo biogeoquímico.

En una primera etapa se simuló un año climatológico de un modelo biogeoquímico basado en un modelo NPZD. Estas simulaciones fueron contrastadas con información de los cruces oceanográficos del programa CIMAR-Fiordos. Dado la distribución temporal y espacial de las mediciones realizadas en estas campañas, analizaremos los resultados obtenidos durante los meses de agosto y noviembre para las variables de oxígeno disuelto y nitrato en la zona de la Boca del Guafó.

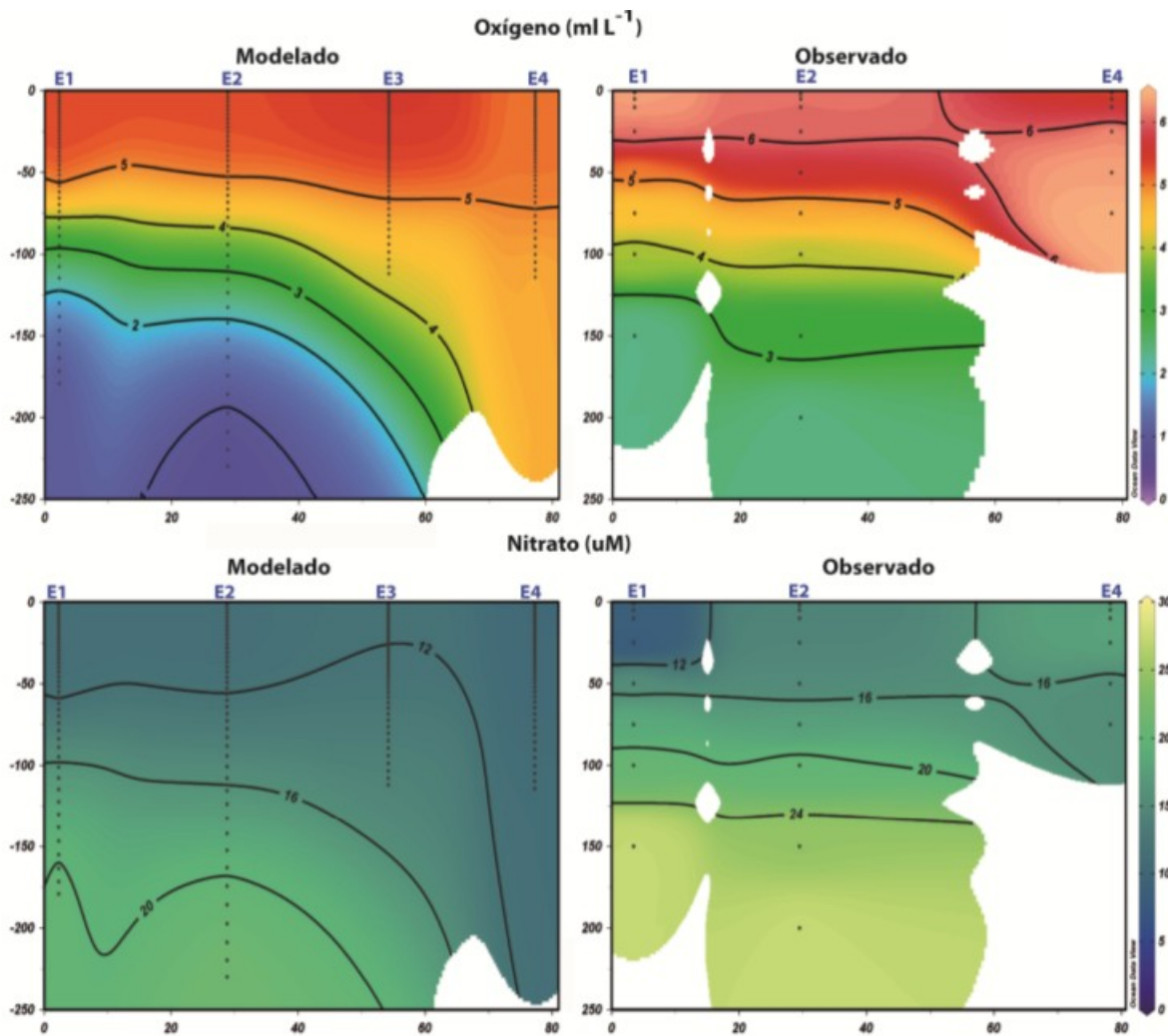


Figura 33: Oxígeno y Nitrato observado y modelado de un agosto promedio.

La climatología obtenida de agosto desde CIMAR-Fiordos y su correspondiente agosto simulado con NPZD muestran un patrón similar para la distribución del oxígeno disuelto. En ambos se observa una capa entre la superficie y los 50 m de profundidad con valores mayores a 6 ml/L. A su vez, en ambos se observan aguas menos oxigenadas bajo los 50 m de profundidad. La diferencia más notoria se observa en la modelación bajo los 150 m de profundidad, donde podemos notar el ingreso de aguas casi anóxicas (~ 1 ml/L), esto posiblemente se deba a problemas de las condiciones de borde utilizadas para la simulación y a la falta de tiempo de estabilización del modelo.

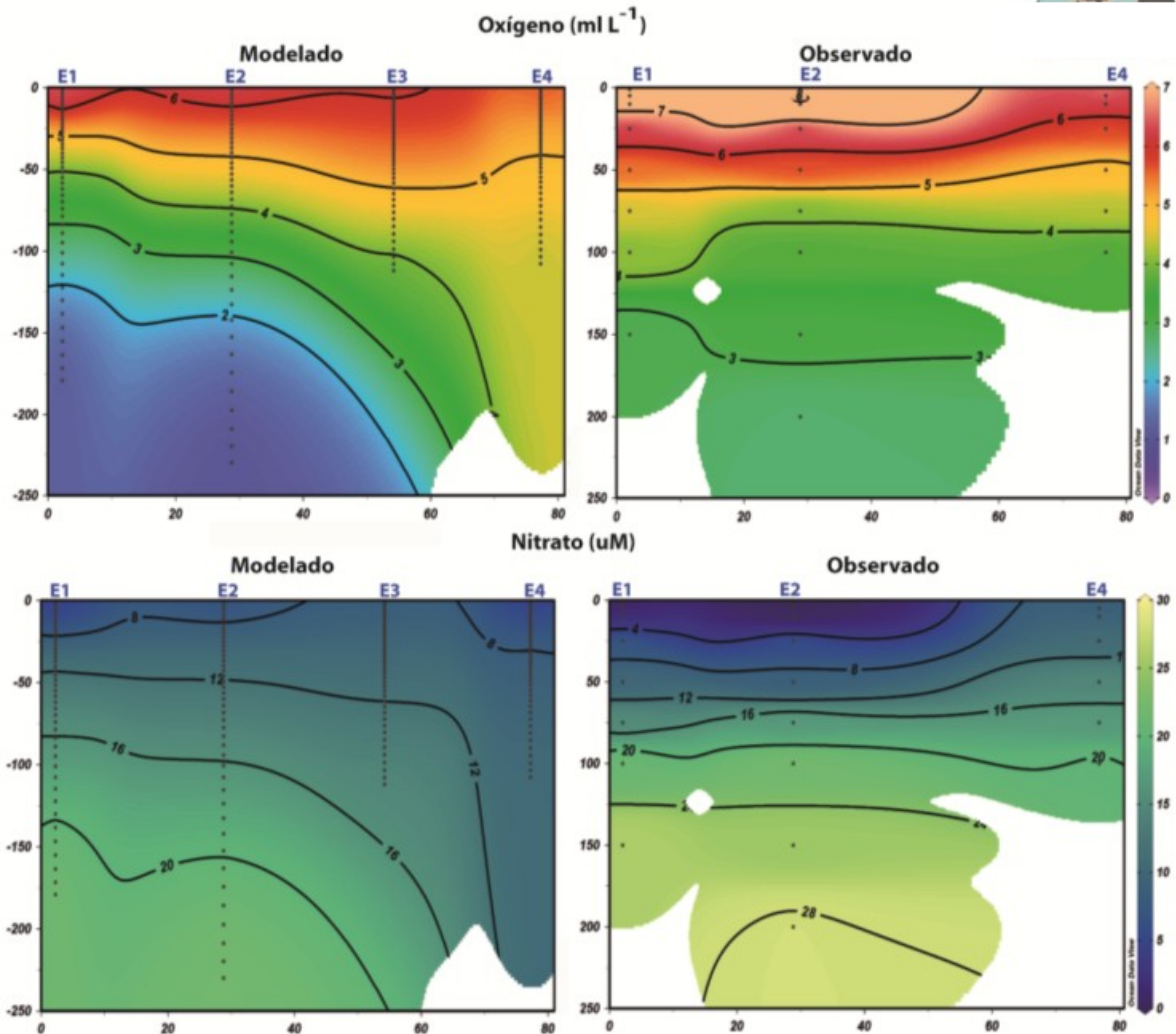


Figura 34: Oxígeno y Nitrato observado y modelado de un noviembre promedio.

Durante el mes de agosto, el nitrato modelado se encuentra bien mezclado en toda la columna de agua con un valor aproximado de 18 μM , mientras que el nitrato observado se encuentra más estratificado (Fig. 33). Se observan aguas con mayores niveles de nitrato en las observaciones de 150 a 200 m. En general, podemos decir que el nitrato modelado es igual al nitrato observado menos 4 μM en todos los puntos en profundidad y distancia.

Para el mes de noviembre se observan las mismas diferencias entre lo modelado y observado entre las variables de oxígeno y nitrato (Fig. 34). Podemos apreciar aguas levemente más oxigenadas en toda la columna de agua, tanto en las mediciones como en la modelación. Caso contrario, durante noviembre podemos observar aguas con menores valores de nitrato en comparación con el mes de agosto.

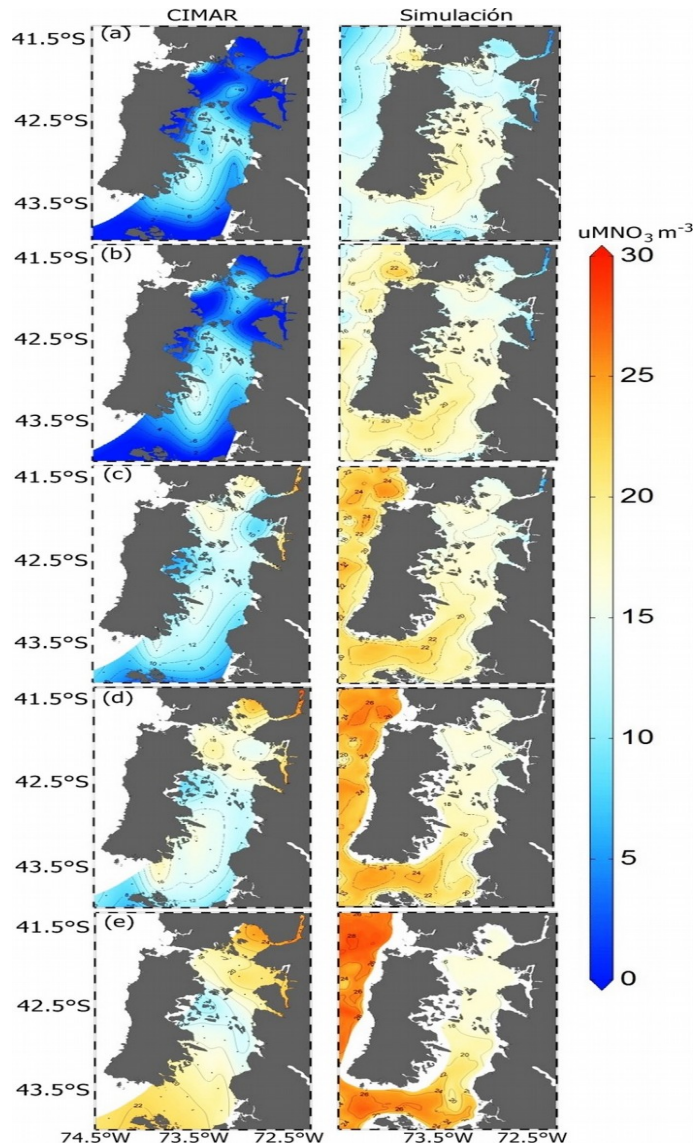


Figura 35: Comparación nitrato ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante noviembre. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.

Para evaluar el modelo biogeoquímico de baja resolución NChPZD también se utilizó la información oceanográfica recolectada en los cruceros CIMAR. Específicamente se compararon dos meses representativos de invierno (julio) y primavera (noviembre), correspondientes a los cruceros CIMAR 11-E1 del año 2005 y a CIMAR 07-E2 del año

2004, respectivamente. Se escogieron estos cruceros pues ambos presentaban las mismas estaciones oceanográficas cubriendo un área similar (41.5–43.82 °S; 72.5–74.4 °W).

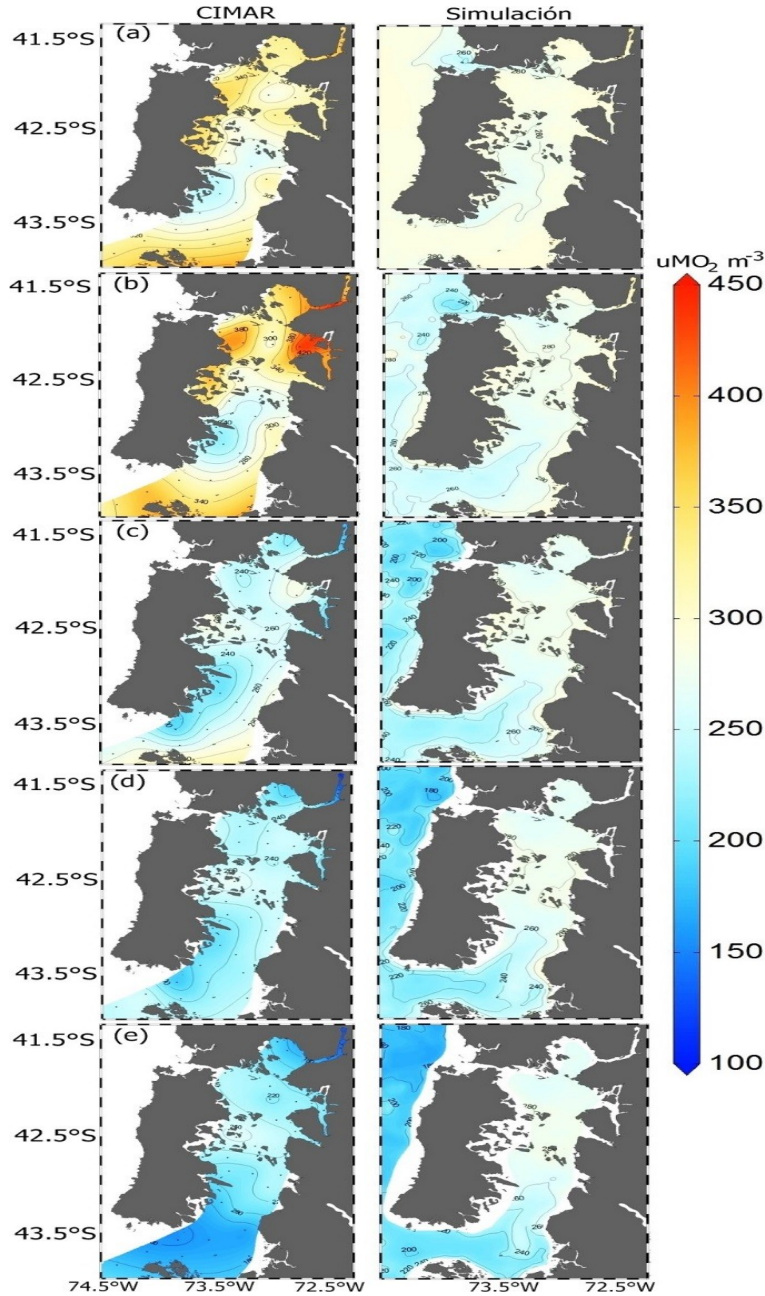


Figura 36: Comparación oxígeno ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante noviembre. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.

En los primeros metros (0-5 m, Figs. 35a y 35b) de la columna de agua, las concentraciones de nitrato ($\mu\text{M m}^{-3}$) en el crucero CIMAR son bastante similares durante noviembre no superando los $6 \mu\text{M m}^{-3}$ tanto en el golfo de Ancud como en el golfo de Corcovado. En el centro del mar interior, la concentración aumentó levemente, alcanzando valores de $12 \mu\text{M m}^{-3}$. La concentración de nitrato superficial simulada es mayor que las

observaciones *in situ*, oscilando entre 10 y 18 $\mu\text{M m}^{-3}$. Se detectó un patrón similar al crucero CIMAR, es decir, menores concentraciones hacia el norte y sur del mar interior de Chiloé y mayores concentraciones hacia el centro. En 25 y 50 m de profundidad (Figs. 35c y 35d), se observó que el nitrato presentó mayores concentración en el crucero CIMAR, sobre todo en la parte norte del mar interior, alcanzando valores de $\sim 18 \mu\text{M m}^{-3}$. La simulación en 25 y 50 m, presentó valores de nitrato que fluctuaron entre 16 y 24 $\mu\text{M m}^{-3}$ con máximos en la zona norte del mar interior. En 100 metros de profundidad el nitrato alcanzó similares concentraciones tanto en el crucero CIMAR como en la simulación, sobre todo en el golfo de Ancud con valores que superan los 20 $\mu\text{M m}^{-3}$ (Fig. 35e).

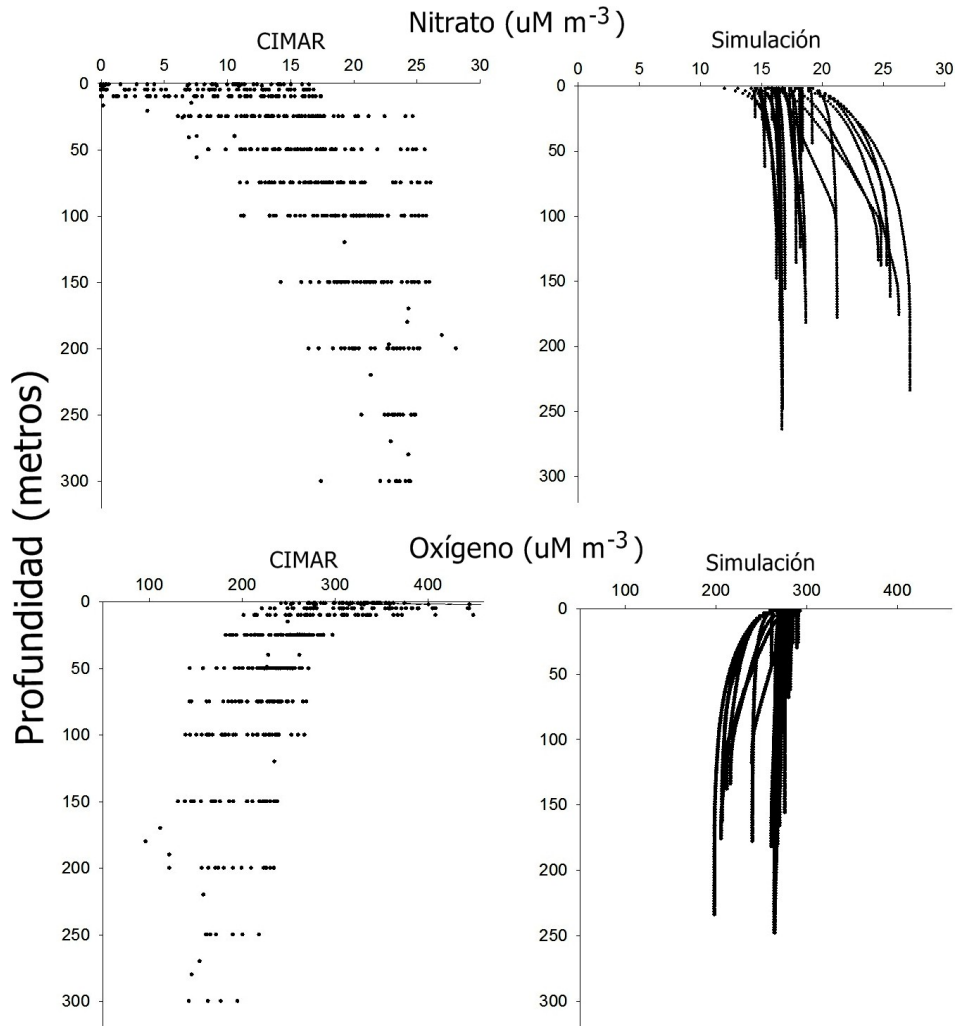


Figura 37: Comparación de perfiles observados y simulados de nitrato y oxígeno durante noviembre entre 41.5 - 43.82 °S, 72.5 - 74.4 °W.

El oxígeno del crucero CIMAR durante noviembre presentó altas concentraciones en los primeros metros de la columna de agua, tanto en los golfos de Ancud como Corcovado (Figs. 36a y 36b). Las mayores concentraciones de oxígeno se registraron en 5 m de profundidad con valores que superaron los 400 $\mu\text{M m}^{-3}$. El oxígeno simulado, tanto en

superficie como a 5 metros de profundidad presentó concentraciones similares, con valores máximos de 280 $\mu\text{M m}^{-3}$. El oxígeno simulado y observado disminuye su concentración desde los 25 hasta los 100 m (Figs. 36c, 36d y 36e), registrándose valores mínimos de $\sim 200 \mu\text{M m}^{-3}$ en el golfo de Ancud.

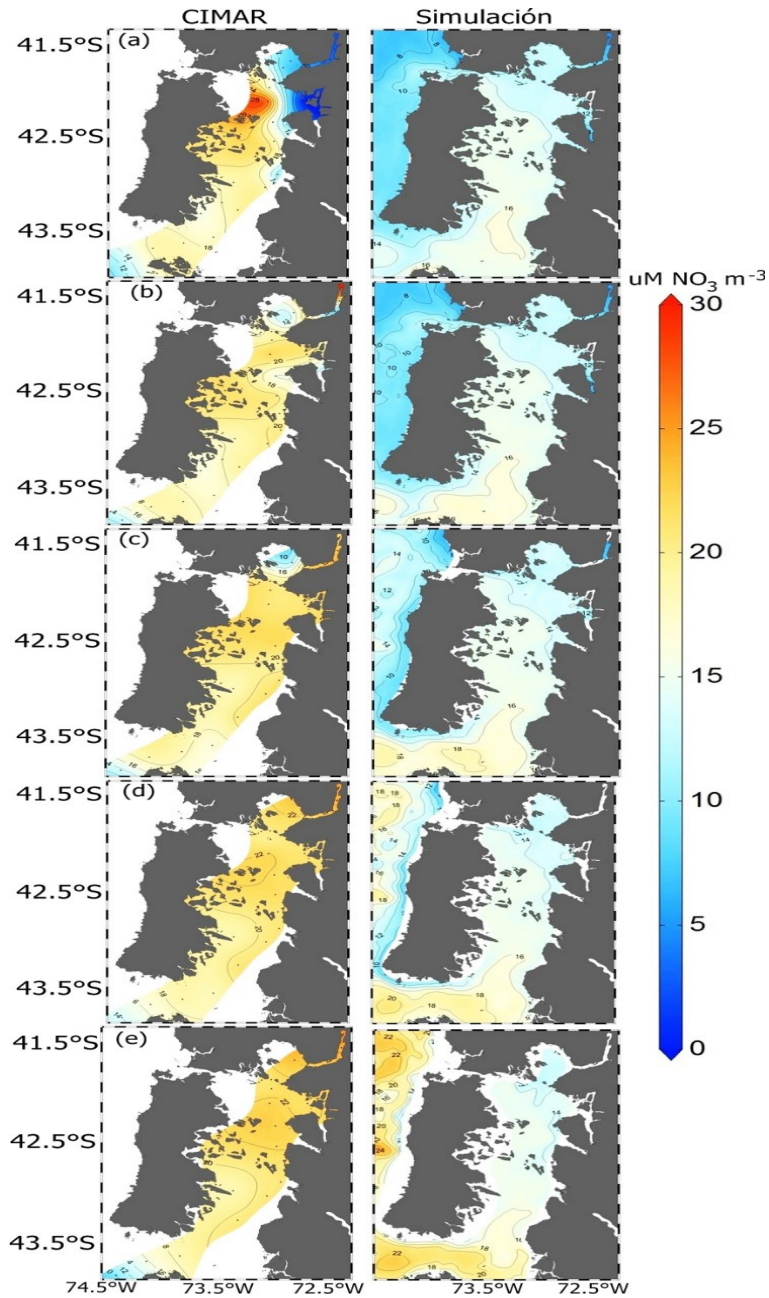


Figura 38: Comparación nitrato ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante julio. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.

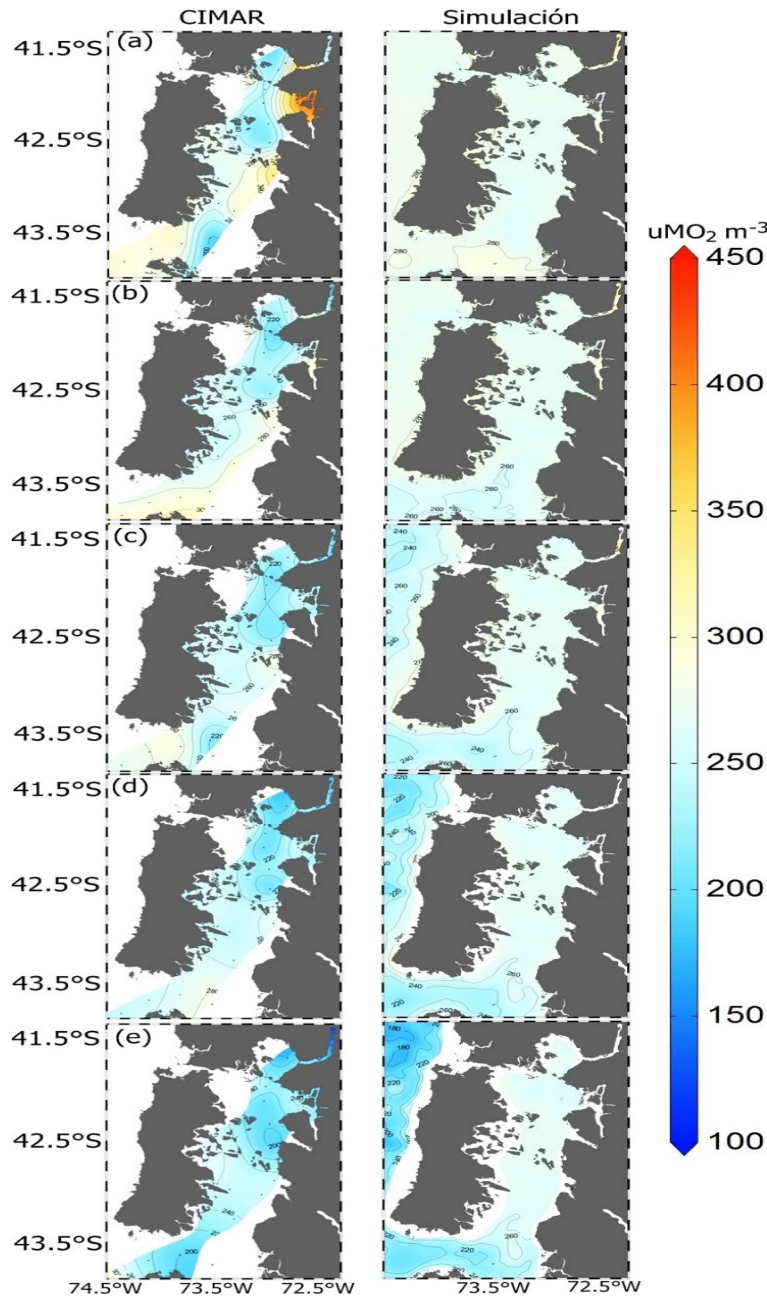


Figura 39: Comparaci3n oxigeno ($\mu\text{M m}^{-3}$) observado y simulado a distintas profundidades durante julio. (a) superficie (b) 5 m (c) 25 m (d) 50 m (e) 100 m.

El nitrato en el crucero CIMAR present3 concentraciones notablemente menores que la simulaci3n en los primeros metros de profundidad. Los valores de nitrato observados fluctuaron entre 0 y $15 \mu\text{M m}^{-3}$, mientras que el nitrato simulado registr3 valores entre ~ 12 y $15 \mu\text{M m}^{-3}$ (Fig. 37). Hacia mayores profundidades, los perfiles de nitrato son similares, alcanzado m3ximos de $\sim 25 \mu\text{M m}^{-3}$ entre 100 y 250 metros. El ox3geno del crucero CIMAR present3 altas concentraciones entre 0 y 5 metros, alcanzando incluso valores

mayores a $400 \mu\text{M m}^{-3}$. Esto no se observa en la simulación, donde los mayores valores de oxígeno alcanzan concentraciones de $\sim 300 \mu\text{M m}^{-3}$. Entre 50 y 100 m de profundidad los valores de oxígeno, tanto en CIMAR como en la simulación presentaron concentraciones similares, las cuales oscilaron entre 200 y $300 \mu\text{M m}^{-3}$. Bajo 100 m de profundidad, el oxígeno observado disminuyó notablemente, llegando a concentraciones menores de $100 \mu\text{M m}^{-3}$.

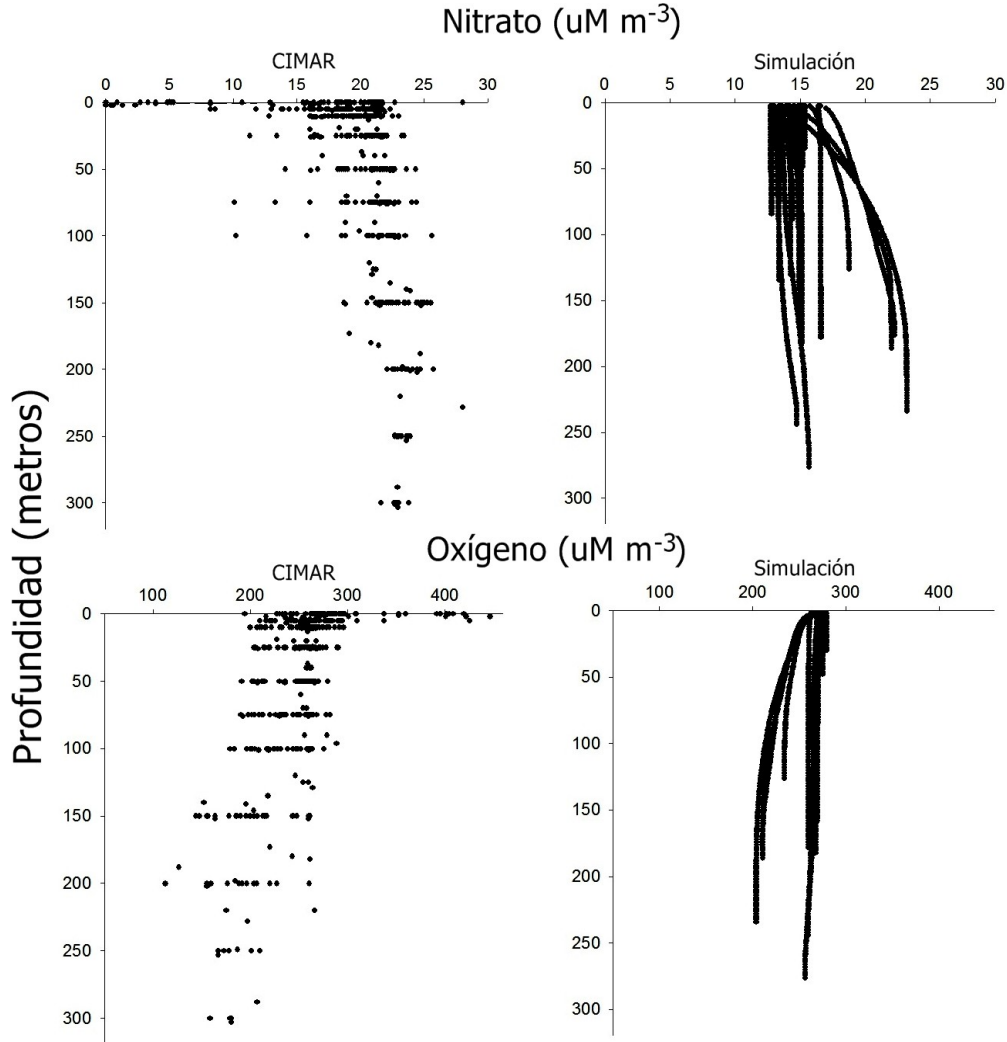


Figura 40: Comparación de perfiles observados y simulados de nitrato y oxígeno durante julio entre $41.5 - 43.82^\circ\text{S}$, $72.5 - 74.4^\circ\text{W}$.

Durante julio las concentraciones de nitrato del crucero CIMAR fueron mayores que durante noviembre. Los valores más altos se observaron especialmente en los primeros metros de profundidad (Fig. 38a) con máximos de $\sim 30 \mu\text{M m}^{-3}$ en el golfo de Ancud. En 5, 25, 50 y 100 m (Figs. 38b, 38c, 38d y 38e), el nitrato observado fluctuó entre 18 y $22 \mu\text{M m}^{-3}$. Los valores de nitrato simulados durante julio fueron menores que durante noviembre en todas las profundidades analizadas (Fig. 38) con concentraciones máximas de $\sim 20 \mu\text{M m}^{-3}$ en el golfo de Ancud.

La distribución espacial de oxígeno durante julio presentó valores que oscilaron entre 200 y 280 $\mu\text{M m}^{-3}$, tanto en el crucero CIMAR como en la simulación, esto se observó principalmente en 25, 50 y 100 metros de profundidad (Fig 39). Los primeros metros en cambio, presentaron diferencias más notables desde las islas Desertores hacia el norte, con valores mayores a 300 $\mu\text{M m}^{-3}$, lo cual no fue observado en la simulación (Figs. 39a y 39b).

Al igual que durante noviembre, el mes de julio presentó bajos valores de nitrato los primeros metros de la columna de agua en el crucero CIMAR (Fig. 40), los cuales fluctuaron entre 0 y 20 $\mu\text{M m}^{-3}$. Bajo los 100 m, la concentración osciló entre ~15 y 25 $\mu\text{M m}^{-3}$. El nitrato simulado en cambio, no registró bajos valores los primeros metros de la columna de agua con concentraciones que oscilaron entre 12 y 16 25 $\mu\text{M m}^{-3}$. Bajo los 50 m alcanzó valores máximos de 25 $\mu\text{M m}^{-3}$. A pesar de las diferencias exhibidas los primeros metros de la columna de agua, bajo 50 metros, los perfiles de nitrato observados y modelados presentaron patrones similares. Las concentraciones de oxígeno del crucero CIMAR entre 0 y 5 metros, oscilaron entre 200 y 400 $\mu\text{M m}^{-3}$, disminuyendo en profundidad hasta alcanzar valores de 100 $\mu\text{M m}^{-3}$. En los primeros metros el oxígeno simulado presentó valores promedio de ~260 $\mu\text{M m}^{-3}$ no alcanzando los máximos registrados por el crucero CIMAR. Hacia mayores profundidades, los perfiles de oxígeno tanto del crucero como de la simulación presentaron una distribución similar.

5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas en tiempo real.

5.2.1 Evaluación MOSA-WRF con información de estaciones meteorológicas en tiempo real.

Actualmente MOSA-WRF se encuentra operando desde el 20 de Julio del año 2018. Graficamos el rendimiento de MOSA-WRF hasta el 24 de julio del 2019 indicando con un número 1 si el pronóstico fue exitoso y con un 0 si el sistema se cayó por algún motivo (Fig. 41). De esto se desprende que el sistema en general ha sido estable, presentando un 97 % de efectividad, experimentando solo en 12 ocasiones pronósticos defectuosos o incompletos de un total de 370. Estos fracasos principalmente se atribuyen a problemas de estabilidad numérica, propios de un sistema de esta naturaleza y en ocasiones puntuales, a fallas relacionadas con los servidores internacionales de dónde se descargan las condiciones de borde atmosféricas, GFS. Considerando el constante desarrollo de MOSA-WRF, estos desperfectos serán estudiados detalladamente y trabajados con el propósito de ir reduciéndolos, entregando mayor estabilidad y confianza al pronóstico y junto a esto

apuntar a un nivel internacional, que esté a la altura de los grandes sistemas mundiales de pronósticos operativos.

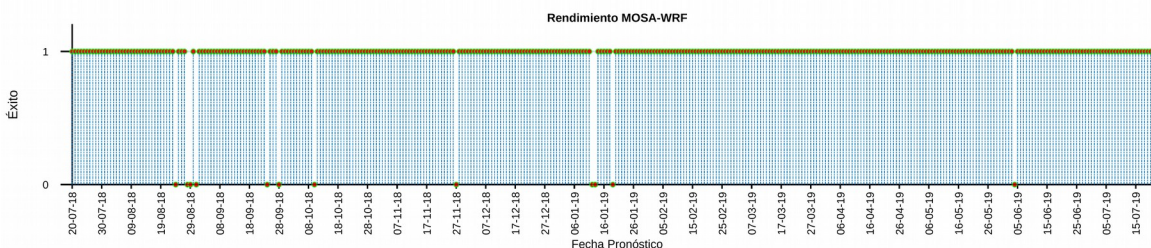


Figura 41: Rendimiento del sistema MOSA-WRF para el periodo 20/07/18 – 20/07/19.

El tiempo de cómputo promedio de cada pronóstico operacional es de aproximadamente 1 hora, almacenando 8.6 Gb entre salidas del modelo y condiciones de borde e iniciales todos los días. Los modelos diariamente son iniciados con información generada con el pronóstico del día anterior y en caso de no encontrarse, se busca en los resultados de hasta 3 días atrás. Luego de finalizar cada pronóstico, los archivos de salida son trabajados para ser incorporados como forzante atmosférico en MOSA-ROMS. Este procedimiento consiste en extraer solo los campos superficiales del modelo WRF y transformarlas a las variables que necesita el modelo ROMS. Estos son: los flujos de calor, humedad y radiación, necesarios para el balance de energía dentro del sistema acoplado océano-atmósfera. Por otro lado, las componentes horizontales del viento y campos de presión atmosférica y presión de la columna de aire reducida al nivel del mar, factores clave en la circulación hidrodinámica. También es necesario obtener información de precipitación, ya que esta juega un rol fundamental en la estratificación de la columna de agua. Por último, también se consideraron 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.

La evaluación de MOSA-WRF se llevó a cabo para la estación de Cucao durante 20/07/18 – 20/07/19 (Fig. 42). En el caso de los vientos, se obtuvieron correlaciones significativas de 0.799, 0.866 y 0.813 para la componente zonal, meridional e intensidad del viento, respectivamente. El error de sesgo fue entre -1 y 1 m/s, pudiendo resolver de buena manera el promedio de las series. La amplitud por su parte se sobrestimó levemente en la componente U, para V y la intensidad del viento se experimentó una subestimación entre el 15 y 25%. Finalmente el error medio absoluto fue mayor para la componente V, con 2.121 m/s, U y la intensidad del viento arrojaron valores de 1.815 y 1.786 m/s, respectivamente.

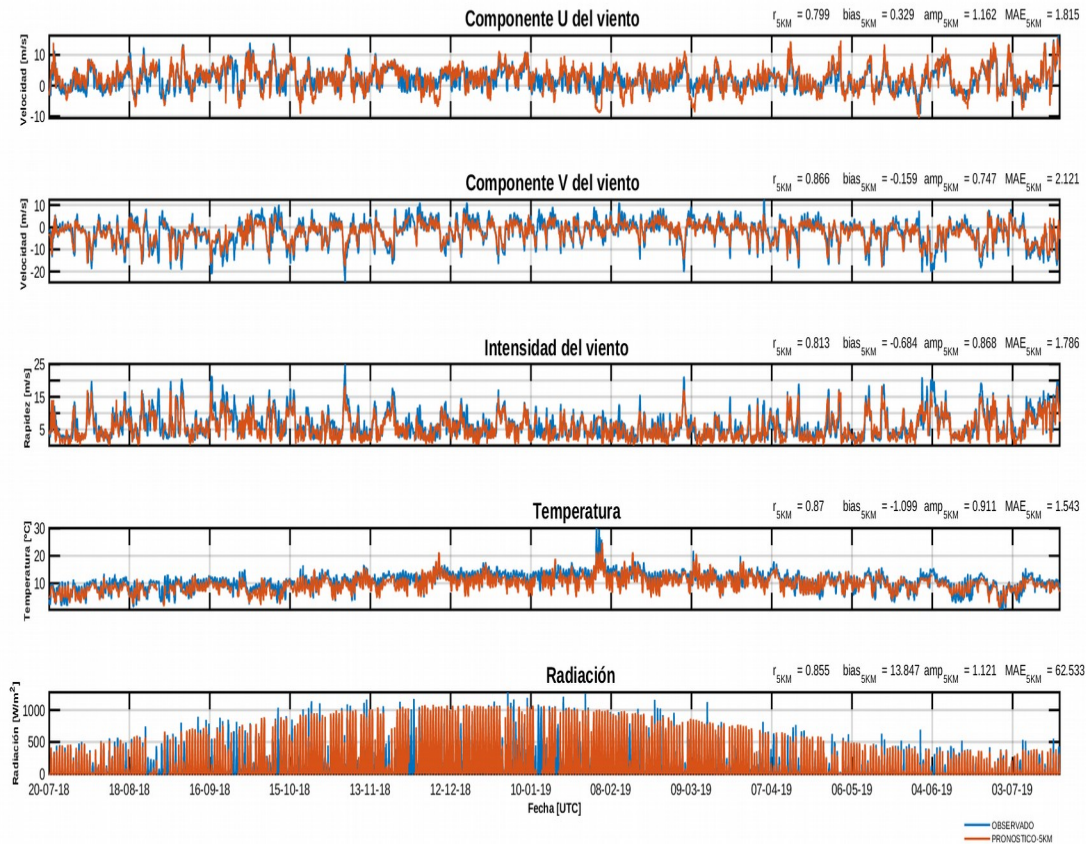


Figura 42: Serie de tiempo para las componentes U y V, intensidad del viento, temperatura y radiación solar para la estación de Cucao durante 20/07/18 – 20/07/19.

La temperatura modelada mostró un buen ajuste con los datos observados con un valor de correlación de 0.87, evidenciando una buena reproducción de la fase. El modelo registró una subestimación del promedio de -1.099 °C. La desviación estándar de MOSA-WRF se ajustó favorablemente, obteniendo un valor cercano a uno, entre el cociente de lo modelado contra lo observado. Por último, esta variable obtuvo un error absoluto medio de 1.543 °C.

La radiación solar modelada también se ajustó adecuadamente con los datos observados. Se obtuvo un valor de correlación de 0.855 y se observó que las señales oscilan en fase. La radiación solar modelada promedio fue sobrestimada en 13.847 W/m² y el cociente entre las desviaciones estándar fue cercano a uno. Finalmente se obtuvo un error medio absoluto de 62.533 W/m².

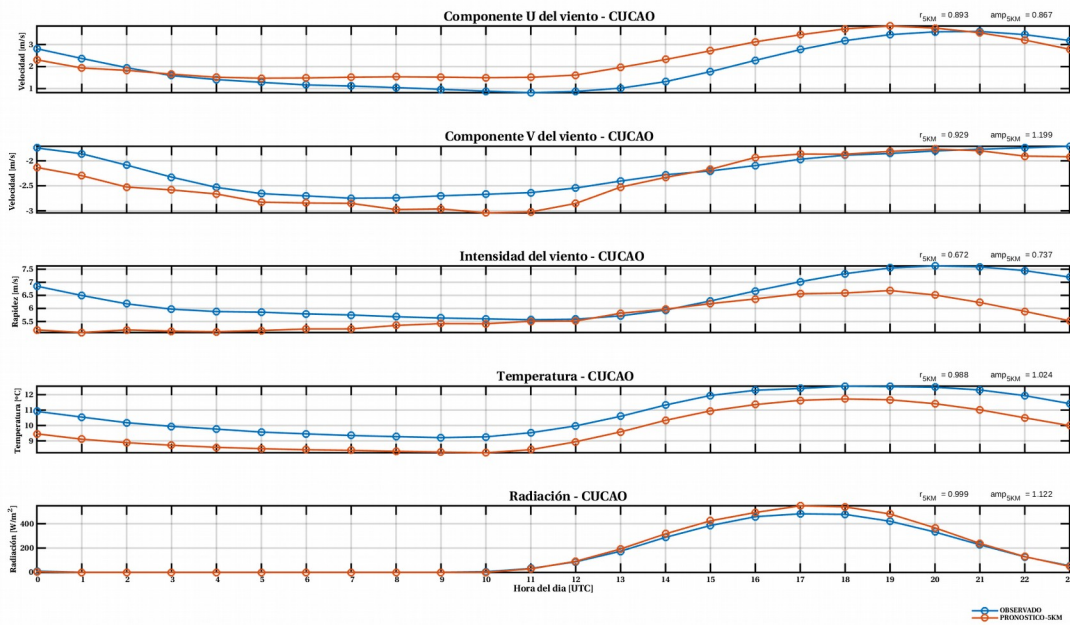


Figura 43: Ciclo diario de las componentes zonales y meridionales del viento U y V, intensidad del viento, temperatura y radiación solar modelados y observados en la estación de Cucao durante el periodo 20/07/18 – 20/07/19.

Finalmente se presentó el comportamiento del ciclo diario para las mismas variables analizadas previamente (Fig. 43), demostrando un buen ajuste de todas ellas en términos de amplitud y fase. Se obtuvieron valores de correlaciones de 0.999 y 0.988 para la radiación solar y la temperatura, respectivamente. La componente meridional del viento V también presentó una correlación significativa de 0.929. Un valor poco menor de 0.893 se obtuvo para la componente zonal del viento U (0.893). La menor correlación se obtuvo para la intensidad del viento con un coeficiente de 0.672.

Para los cocientes entre las desviaciones estándar se presentaron los mayores ajustes en la temperatura y radiación solar con valores de 1.024 y 1.122, mientras que la intensidad y la componente zonal del viento presentaron una subestimación de 0.737 y 0.867, respectivamente. Finalmente para la componente V del viento se obtuvo una sobrestimación cercana al 20%.

5.2.2 Evaluación MOSA-ROMS con información satelital y campañas oceanográficas.

Como se ha mencionado anteriormente, salvo la boya oceanográfica en el Seno Reloncaví perteneciente al I-MAR (Universidad de Los Lagos), no existen fuentes de información confiable en tiempo real para la zona de estudio que permitan evaluar de manera directa el desempeño del modelo para las variables de temperatura, salinidad y corrientes oceánicas. Sin embargo, existen productos satelitales que nos permiten evaluar el

comportamiento superficial de estas variables tanto temporal como especialmente. En nuestro caso utilizaremos 2 productos para TSM, AVHRR y VIIRS y datos de SMOS para SSM.

La figura 44 presenta el promedio diario de TSM de todo el dominio de MOSA-ROMS para datos satelitales AVHRR y del pronóstico (día 1). Estas series comprenden el periodo entre julio de 2016 y julio de 2019. En la figura apreciamos un notable ajuste entre ambas series, las que presentan una correlación de 0.94. Esto refleja la capacidad del modelo de reproducir de manera apropiada la variabilidad estacional, tanto en fase como en amplitud. También podemos notar que el error ha ido disminuyendo con el tiempo, destacándose un mayor ajuste entre las series a partir de septiembre de 2017, disminuyendo el sesgo más de 1 °C entre ambas. Esto coincide con profundos cambios en la configuración de MOSA-ROMS, entre ellas el aumento y cambio de configuración de los niveles verticales tipo sigma, pasando de 32 a 42 niveles, ajustes a la malla, máscara y batimetría, y también a la constante incorporación de nuevas fuentes de agua dulce.

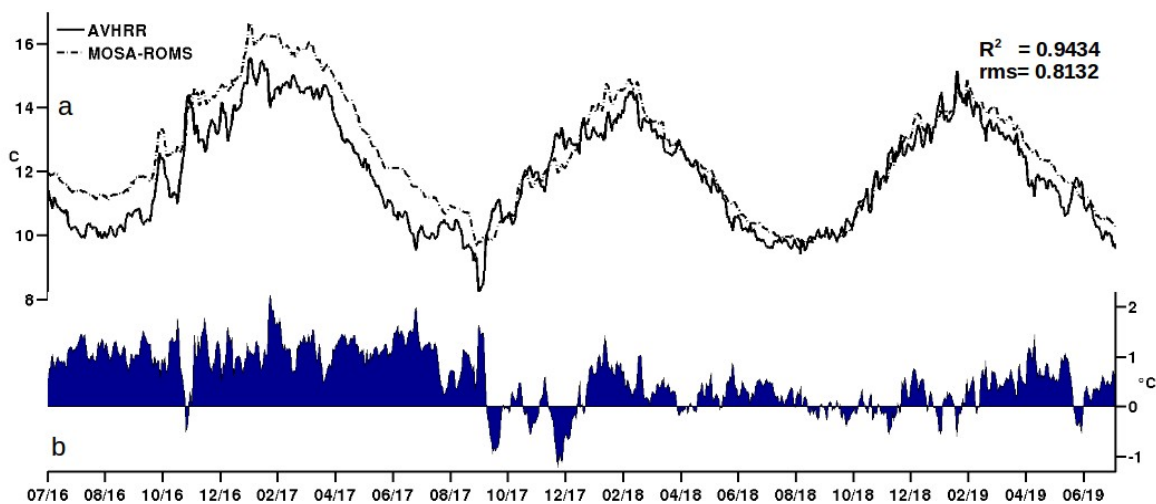


Figura 44: Series de tiempo del promedio diario de TSM para todo el dominio en MOSA-ROMS y datos satelitales AVHRR entre julio 2016 y julio 2019. (b) Diferencia entre ambas series. Notar que la correlación entre ambas series es de 0.9434, con un error cuadrático medio de 0.81 °C.

Usando datos mensuales de AVHRR y promedios mensuales contruidos con valores diarios de MOSA-ROMS, se estimó la distribución espacial de la correlación (R^2), el error cuadrático medio (rmse), y el sesgo (bias) entre ambas series (Fig. 45). Como es de esperar, la calidad de los pronósticos disminuye a medida que fijamos la mirada hacia las zonas de mares interiores. Las menores correlaciones se presentan en la zona de mar interior de Chiloé, oscilando entre 0.7 y 0.8, sin embargo, a esa resolución en esa zona las imágenes satelitales también presentan un grado de error considerable. No obstante se puede asumir que las correlaciones son suficientemente satisfactorias en la mayor parte de la zona de mares

interiores de Chiloé-Aysén, logrando reproducir la variabilidad estacional de la temperatura. Por otra parte, el error cuadrático medio calculado entre los mismos grupos de datos (VIIRS y MOSA-ROMS) alcanza máximos de 1.4 °C en algunas zonas puntuales, mientras que el sesgo no sobrepasa los 0.8 °C. Por su parte la zona de océano abierto muestra una mayor correlación y menor sesgo y error.

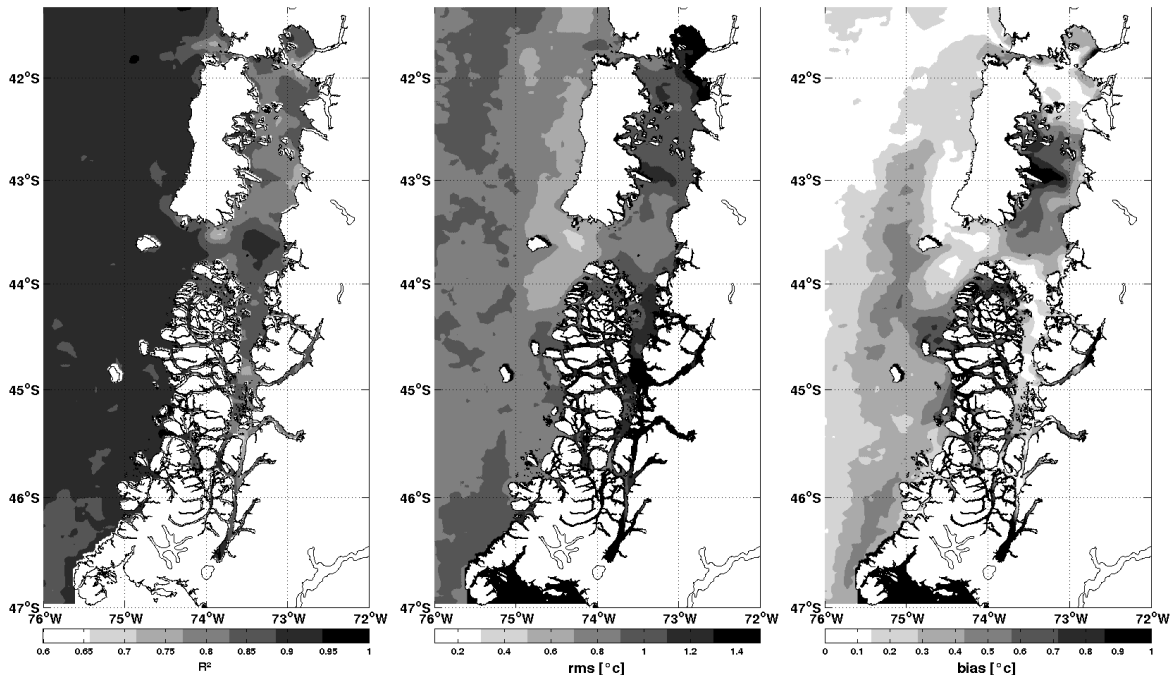


Figura 45: Distribución espacial de estadísticas, correlación (R^2), error cuadrático medio (*rmse*) y sesgo (*bias*) obtenidas a partir de datos mensuales de VIIRS y MOSA-ROMS entre julio de 2016 y julio de 2019.

Con los datos mensuales de VIIRS se realizó un análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF). Los primeros 2 modos de variabilidad se encontraron significativos. El modo 1 de variabilidad explicó el 89.6% de la varianza en los datos satelitales y el 83.8 % en los datos de MOSA-ROMS, asociado con el ciclo anual (Fig. 46). El segundo modo de variabilidad (no mostrado aquí) explicó el 5.2 y el 12.8 % de la varianza en los datos satelitales VIIRS y de MOSA, respectivamente. Se destaca que ambas series presentan una buena correlación (0.9), indicando un buen ajuste de TSM entre satélite y modelo.

Por otra parte, se usaron datos mensuales para el año 2018 de imágenes satelitales de salinidad de la misión SMOS, las cuales tienen una resolución ~ 25 km. Cabe notar que estos datos no cubren la zona de los mares interiores de Chiloé-Aysén. Por esta razón, podemos apreciar un mayor error en zonas costeras, donde se presentan valores de salinidad significativamente bajos para lo esperado en la zona (valores menores a 33 PSU). Estos datos fueron removidos de los análisis por ser poco confiables. Notamos que el error promedio de las observaciones cerca de la costa supera los 0.5 PSU (después de eliminar valores con

PSU<30), mientras que la desviaci3n estandar de ellos tiene un rango de oscilaci3n que llega a los 3 PSU, resultando en valores con un alto grado de incertidumbre para la evaluaci3n de la calidad del modelo (Fig. 47). No obstante lo anterior, estos datos pueden permitir obtener una mirada sobre la distribuci3n de salinidad superficial estacional en la zona oceánica del modelo, donde es más complejo tener datos *in situ*.

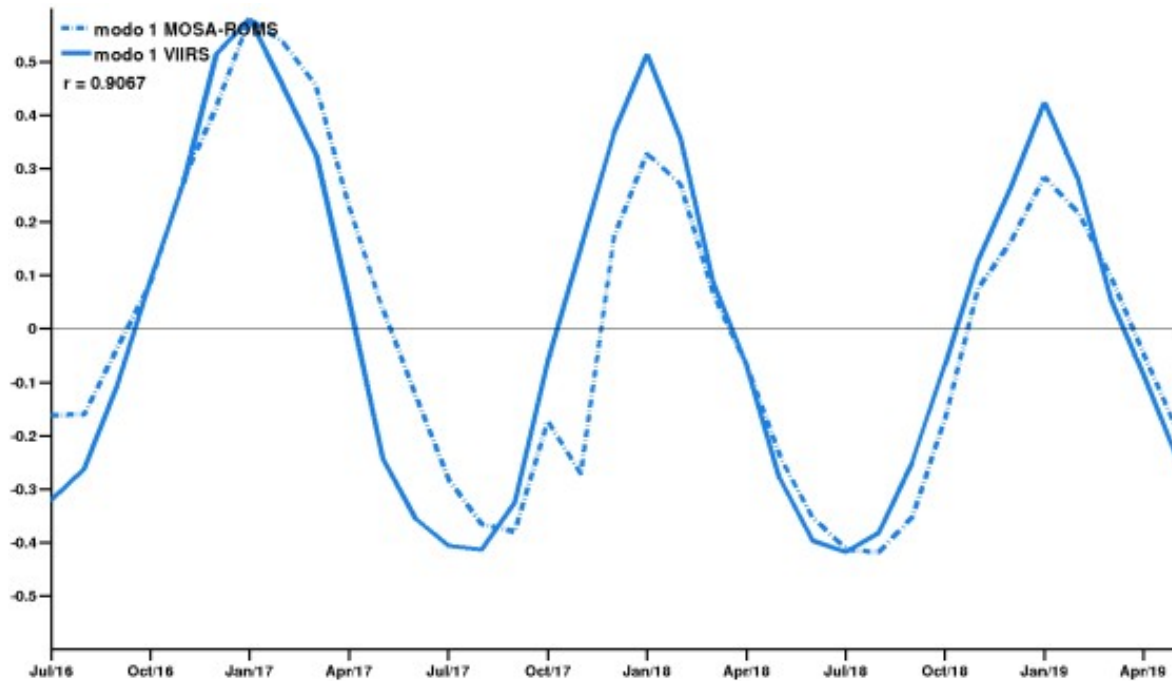


Figura 46: Series de tiempo del primer modo de variabilidad de los datos satelitales de TSM obtenidos con VIIRS (línea continua) y con MOSA-ROMS (línea intermitente).

Para hacer comparativos estos datos satelitales con los de MOSA-ROMS se calcularon promedios estacionales para el año 2018 para ambos productos y se realizaron diagramas de regresión. Al observar estos diagramas estacionales podemos notar que existe un buen ajuste entre ambos productos, considerando que los datos satelitales presentan un error promedio considerable (~ 1 PSU) y una alta desviaci3n estandar (Fig. 48). La mayor correlaci3n se alcanza en primavera con un valor de 0.63, mientras que la menor correlaci3n se obtuvo en verano (0.42), no variando demasiado entre estaciones. También apreciamos que las correlaciones caen en parte debido a la presencia de valores “escapados” en las observaciones, donde como se ha mencionado anteriormente, en ellas hay valores inusualmente bajos de salinidad en la zona oceánica del dominio. No obstante, el grueso de los datos presenta una buena correlaci3n, dando cuenta de que el modelo responde a la variabilidad de la salinidad en superficie en la zona oceánica.

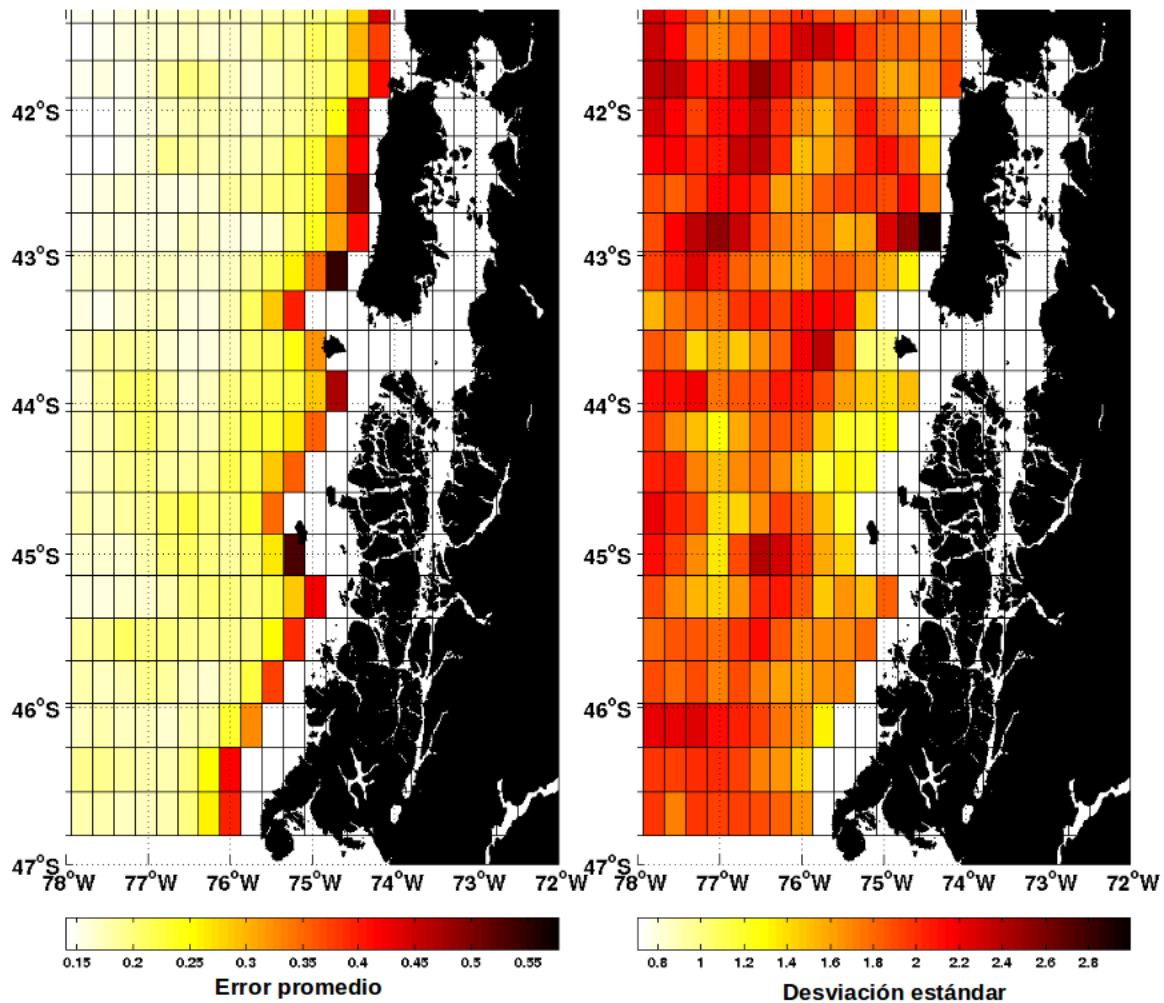


Figura 47: Distribuci3n espacial del error promedio (izquierda) y de la desviaci3n estandar (derecha) entre MOSA-ROMS e im3genes satelitales de salinidad superficial del mar de SMOS para el a1o 2018

Usando datos de CTD de las campa1as oceanogr3ficas de IFOP en Chilo3 durante 2017-2018 y en Ays3n durante 2018-2019 se evalu3 la distribuci3n del campo de masas en la zona de los mares interiores del dominio de MOSA-ROMS en cada estaci3n del a1o (cada campa1a realiza 4 cruceros por a1o). A partir de estos lances se elaboraron diagramas TS, combinando ambas campa1as, de modo de tener una mirada estacional completa de la zona de estudio. Estos diagramas son 3tiles para identificar y distinguir la presencia de diferentes masas de agua en una zona, por lo que nos permite reconocer si el modelo es capaz de reproducir las din3micas de gran escala que gobiernan las estructuras termohalinas de la zona.

Podemos notar que el modelo es capaz de reproducir en t3rminos generales las estructuras termohalinas observadas en los lances de CTD, principalmente en las estaci3nes de primavera y verano (Fig. 49). Las mayores diferencias entre lo observado y lo modelado se

observan en otoño. También observamos que el modelo carece de valores de baja salinidad en superficie, uno de los mayores desafíos que tiene realizar este tipo de modelos.

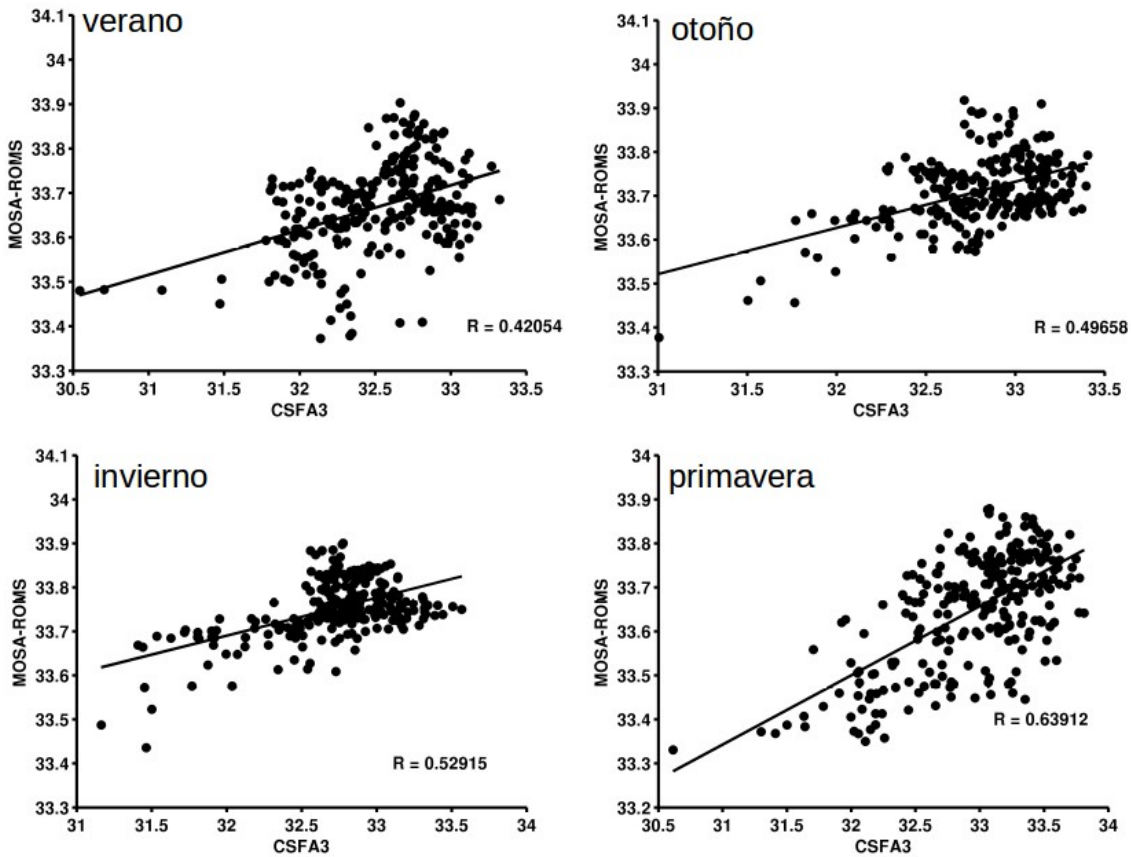


Figura 48: Correlaciones entre valores estacionales de salinidad superficial del mar (SSM) de MOSA-ROMS y SMOS. Los puntos no incluye la zona interior de Chiloé-Aysén

Usando los mismos datos anteriormente mencionados, se calcularon histogramas de frecuencia de temperatura y salinidad, los cuales permiten visualizar el grado de distribución de cada variable individualmente. En las frecuencias se observa que si bien la salinidad responde a los patrones de distribución estacional (concentrados en pocos valores durante verano y primavera, y siendo distribuidos en un rango más amplio de valores en otoño e invierno), estos generalmente son mas salinos en el modelo, denotando una diferencia promedio de +1 PSU en MOSA-ROMS con respecto a los datos observados (Fig. 50). Por su parte, la temperatura muestra un ajuste más uniforme con los datos a lo largo de las estaciones, distribuyéndose en rangos más acotados, donde el modelo mejora en otoño y primavera especialmente.

Para evaluar corrientes se utilizó un ADCP de las campañas oceanográficas de IFOP en la zona, anclado a media agua en el canal Moraleda, donde el instrumento midió los primeros 65 metros de profundidad, en un periodo comprendido entre agosto y diciembre de 2018. Los datos se descompusieron en componentes ortogonales y llevados a promedios horarios y

posteriormente integrados en la columna, reduciendo los datos a un valor diario de corriente. Estos datos fueron comparados con la componente barotrópica de la velocidad extraída de MOSA-ROMS.

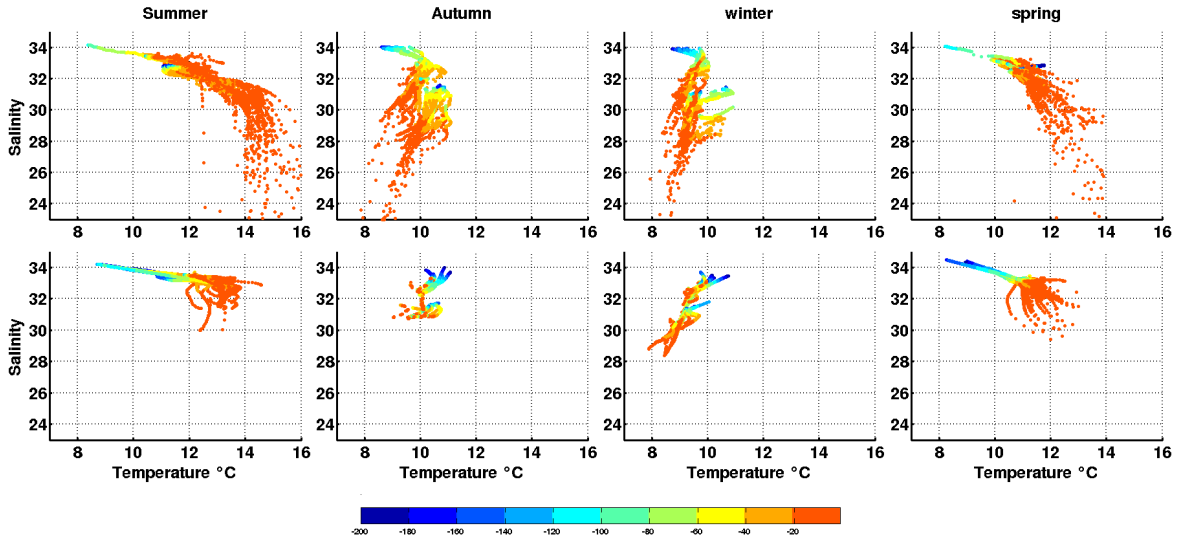


Figura 49: (arriba) Diagramas T/S elaborados a partir de lances de CTD de campañas oceanográficas de IFOP en Chiloé y Aysén durante 2017-2019. (abajo) Diagramas T/S elaborados con perfiles de temperatura y salinidad extraídos de MOSA-ROMS para las mismas fechas de los lances de CTD. La barra de colores de la zona inferior indica la profundidad.

Con las componentes ortogonales se elaboraron diagramas de dispersión de las corrientes y se compararon con resultados de MOSA-ROMS. Notamos que el eje de máxima varianza en los resultados del modelo presentan una desviación de unos 8° hacia el este con respecto a las mediciones del ADCP. En una zona donde predomina una corriente orientada en un eje norte-sur, se aprecia que el modelo tiende a sobrestimar las intensidades de los flujos hacia el norte, mientras que en los flujos hacia el sur tienden a ajustarse levemente (Fig. 51a). Con estos datos también se calculó la densidad espectral de potencia del ADCP y de los datos de MOSA-ROMS donde podemos observar máximos espectrales bien definidos en las bandas diurnas y semi-diurnas, como también algunas frecuencias mayores, cercanas a los 6 y 8 horas (Fig. 51b). Estos máximos también están presentes en los datos del modelo, resaltando la importancia que tiene la marea en esta zona, y la capacidad de MOSA-ROMS de reproducir este fenómeno de manera apropiada.

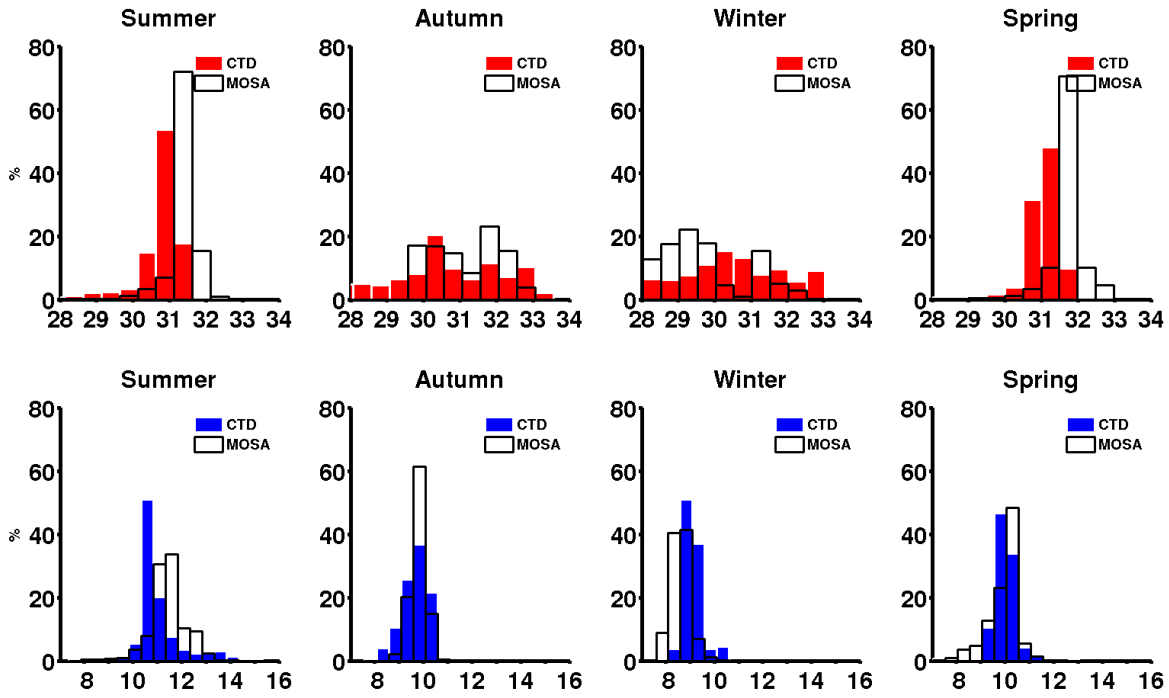


Figura 50: Histogramas de frecuencia de salinidad (arriba) y temperatura (abajo) construidos con datos de CTD de campañas de Chiloé y Aysén (2017/2019) y MOSA-ROMS para los mismos periodos.

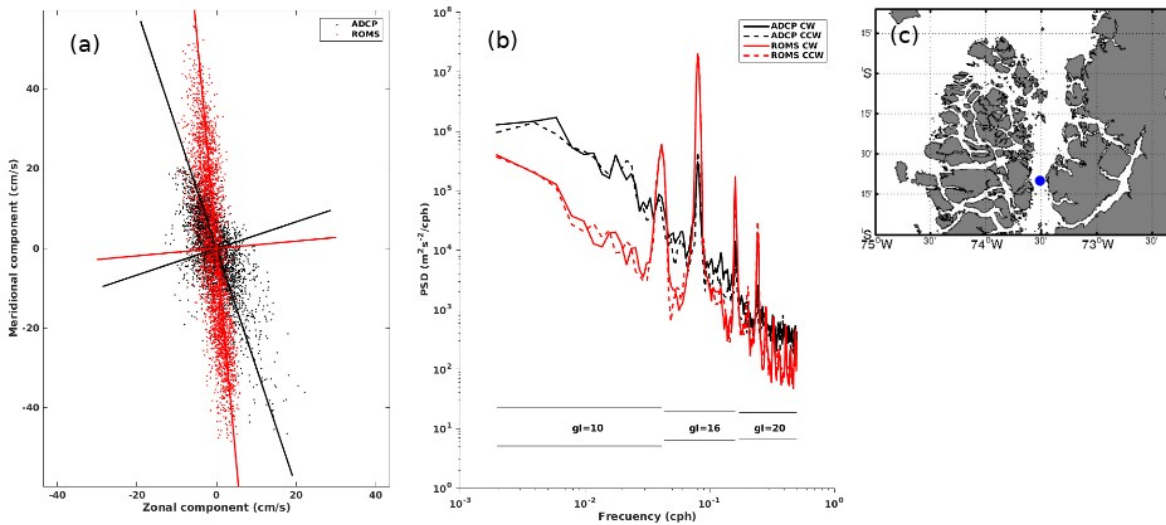


Figura 51: (a) Diagrama de dispersión de las componentes ortogonales de la corriente. (b) Espectros de energía de la corriente para datos de ADCP y de MOSA-ROMS, en el periodo entre agosto 2018 y marzo 2019. (c) Posición del anclaje del ADCP.

5.3 Resultados objetivo específico 3: Perfeccionar la plataforma de visualización de resultados y aplicaciones.



AREA USUARIOS

CHONOS

Sistema de Información Oceanográfica

Chonos es un sistema de información oceanográfica resultado de estudios ambientales diseñados para el desarrollo de modelación numérica en la Patagonia chilena. Chonos, a través de sus productos, permitirá mejorar la gestión y planificación del territorio, así como también, el manejo de contingencias ambientales o sanitarias. [Más información...](#)



Figura 52: Pagina de inicio del portal web del sistema de información oceanográfica, CHONOS (www.ifop.cl/chonos).

En el ultimo periodo se ha puesto especial énfasis en los productos derivados de la modelación hidrodinámica. Un hito en este aspecto fue la puesta en marcha del sitio CHONOS (Fig. 52), el cual es un sistema de información oceanográfico diseñado por IFOP en colaboración con asesor externo Meteodata (<https://www.meteodata.cl/>). Este portal esta enfocado en la libertad de los usuarios par navegar a través de los datos de las herramientas presentes. Actualmente contiene resultados de MOSA-ROMS, MOSA-WRF, CLIC y Parti-MOSA, ATLAS y Tiempo Real. CLIC es un conjunto de resultados de estadísticas de conectividad bajo escenarios climatológicos. Parti-MOSA es un modulo desacoplado para simular la trayectoria de partículas usando los resultados de MOSA-ROMS. ATLAS corresponde a una base de datos de simulación climatológicas y Tiempo Real son observaciones meteorológicas en tiempo real. El portal web se encuentra operativo y se puede ingresar a él en la pagina www.ifop.cl/chonos. Esta pagina ademas contiene contenidos y manuales de uso para los usuarios de todas estas herramientas. En este informe solo nos referiremos a la visualización de las salidas de MOSA-ROMS y MOSA-WRF y a la

herramienta de dispersión de partículas Parti-MOSA la cual es alimentada por las salidas del modelo MOSA-ROMS.

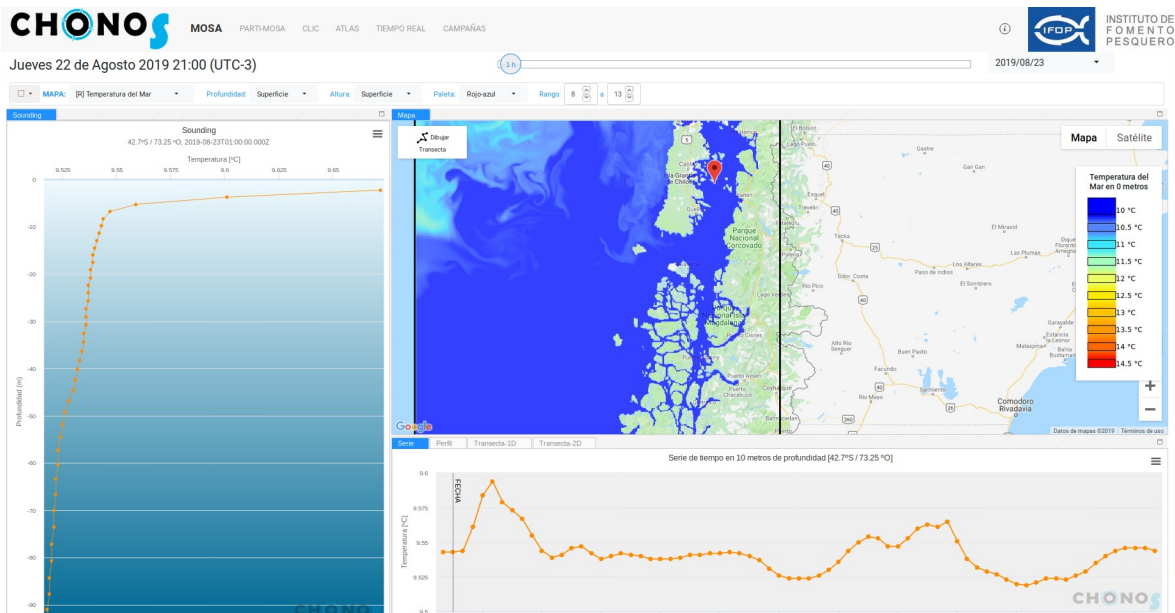


Figura 53: Ejemplo de visualización de los resultados de MOSA-ROMS y MOSA-WRF en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos)

MOSA-ROMS ha mejorado la visualización de resultados, permitiendo exportar datos y generar transectas de forma mucho más amigable (Fig. 53). Estas nuevas características se encuentran disponibles desde el 10 de Junio del 2019. Las variables pronosticadas que pueden ser consultadas son temperatura del mar, salinidad, velocidad zonales y meridionales de la corriente y nivel del mar. El sitio web permite consultar los pronósticos oceanográficos a 72 horas de los últimos 7 días.

Por otra parte, ahora también se pueden visualizar las salidas del pronóstico operacional atmosférico MOSA-WRF, el cual servirá de forzante para el propio pronóstico oceanográfico. MOSA-WRF ofrece un amplio espectro de variables atmosféricas en 3D para la consulta, tal como velocidad de vientos, temperatura del aire, humedad y precipitación.

En el caso de dispersión de partículas Parti-MOSA, un resultado relevante fue la implementación del módulo OpenDRIFT. Con este cambio se logró una mayor flexibilidad en la definición de la liberación de las partículas. La interfaz actual permite definir cuantas partículas se liberan cada hora (considerando que las salidas del modelo están almacenadas cada hora), se permite definir la hora de inicio de la simulación (que en el caso anterior de Parti-MOSA era siempre la hora 00 del pronóstico), y también cada cuanto son liberadas las partículas. La salida gráfica de los resultados puede ser mediante una figura o como una animación gráfica (formato GIF), que es la opción por defecto en el sitio web a este momento.

OceanDrift 2018-08-01 00:00 to 2018-08-04 00:00 (73 steps)

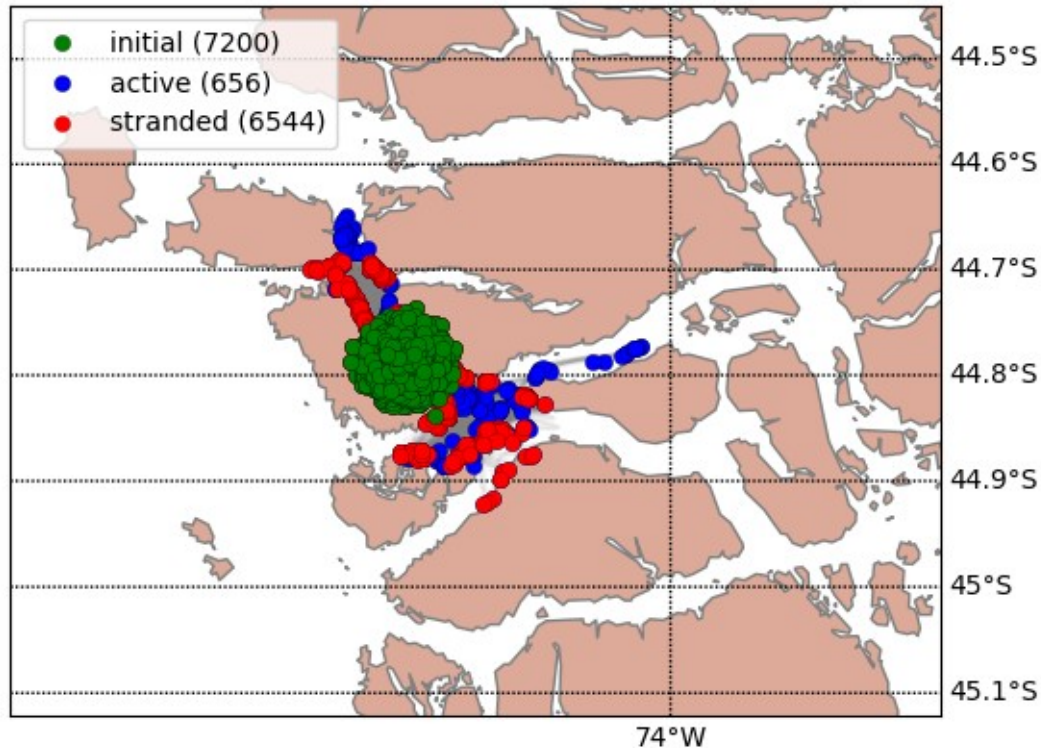


Figura 54: Ejemplo simulación de Parti-MOSA para estudiar el potencial efecto de un contagio de virus ISAv en el centro Rowlet 750.

Esta flexibilidad permite, por ejemplo, con una sola simulación, estudiar el efecto de la marea en la trayectoria. Para esto bastaría seleccionar hora inicial 0, y dt de liberación 1. De esta forma, desde el inicio de la simulación, se liberarían n partículas cada hora. Dado que las trayectorias del modelo están ya calculadas, el módulo OpenDRIFT permite liberar las n partículas dentro de un cierto radio de dispersión, lo cual ayuda a sembrar de semillas las celdas del modelo aledañas al punto seleccionado. Como ejemplo de la aplicación de esta versión de Parti-MOSA, una serie de simulaciones que se hicieron para estudiar el potencial efecto de contagio de la sospecha de infección con ISAv en el centro Rowlet 750, a fines de Julio 2018 (Fig. 54). Este estudio fue entregado por el IFOP a la autoridad correspondiente con una alta rapidez, y podría haber sido hecho directamente por los actores interesados a través de las versiones de Parti-MOSA señaladas.

A su vez, esta herramienta de dispersión de partículas ha experimentado 2 cambios sustanciales. Por una parte, el usuario ahora tiene la posibilidad de definir el número y frecuencia de liberación de partículas y, por otra parte, puede escoger entre pronósticos a corto plazo de 3 días o a largo plazo de 10 días (Fig. 55).

En resumen, se dispone de una herramienta web operacional interactiva que permite a los usuarios interactuar con los resultados del pronóstico MOSA-ROMS de forma fácil. Este sistema se puede perfeccionar y volver más complejo, al estar basado en el lenguaje de programación python. Las líneas de desarrollo y la complejidad futura de Parti-MOSA puede ser definida entonces en base a las recomendaciones de los usuarios finales, pudiéndose también desarrollar versiones anexas para un uso científico mas complejo.

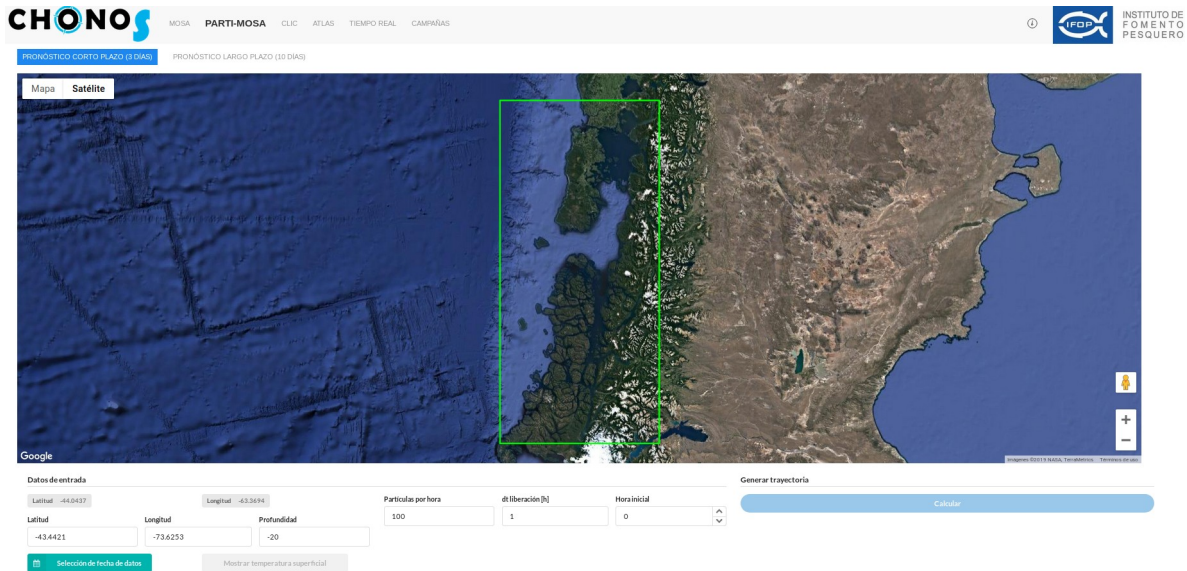


Figura 55: Ejemplo de visualización de la herramienta de dispersión de partículas Parti-MOSA en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos)

6. DISCUSIÓN

6.1 Implementación de un modelo numérico de predicción sinóptico para el sur de Chile (MOSA-ROMS).

Durante el presente proyecto, el objetivo principal recae en el desarrollo de un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS AGRIF, es decir, en la implementación de un modelo capaz de realizar pronósticos de las condiciones oceanográficas en la zona sur de Chile. Para ello, en conjunto con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción (DGEO), se implementó el Modelo Operacional Sur Austral (MOSA-ROMS). El modelo cubre las regiones de Los Lagos y de Aysén a una resolución aproximada de 1 kilómetro. La resolución alcanzada tiene como limitante resolver la circulación en canales de anchos menores al kilómetro.

En este sentido, MOSA-ROMS recoge la idea de Noruega, que tiene implementado desde 2011 el sistema NorKyst-800, desarrollado en colaboración entre el Instituto de Investigación Marina, el Instituto Meteorológico Noruego y el Instituto Hidrológico Noruego (Albretsen, 2011). Este sistema basado en el modelo numérico oceánico ROMS cubre la totalidad de la costa noruega desde las aguas profundas hasta el interior de los fiordos, con una grilla de resolución horizontal de 800 metros y 35 niveles sigma, pudiendo realizar modelaciones sobre todo el dominio o zonas arbitrarias de él. El objetivo de este sistema está pensado para servir de nexo entre modelos oceánicos de baja resolución (4 kilómetros) y modelos costeros de alta resolución (150 – 200 metros en la horizontal). NorKyst-800 es capaz de proporcionar información detallada en relación a corrientes y variables ambientales a lo largo de la costa y en los principales sistemas de fiordos. Los pronósticos tienen un horizonte de una semana. NorKyst-800 también se puede utilizar para cuantificar las consecuencias de las medidas reglamentarias relativas a los sistemas de energía hidroeléctrica o el impacto de las actividades comerciales, tales como el uso de fertilizantes y la propagación de enfermedades por la industria de la acuicultura (Asplin et al., 2004).

En términos de operación, MOSA-ROMS es capaz de entregar resultados de pronósticos de variables oceanográficas con un horizonte de 72 horas, esto quiere decir que simula 3 días hacia adelante, siendo el mismo día que comienza la simulación parte del pronóstico. Este proceso demora cerca de 4 horas, entre las descargas de las condiciones de borde necesarias para alimentar el modelo y la ejecución del modelo propiamente tal. Una vez terminada la simulación diaria, se envían las salidas al servidor web del portal CHONOS, que contiene una interfaz que permite a los usuarios navegar a través de los resultados, además de contener diversas herramientas derivadas de la modelación numérica (www.ifop.cl/chonos). Todo el sistema, los nodos de cómputo y el servidor web, están localizados en un Datacenter de IFOP en Viña del Mar, otorgándole robustez y estabilidad

al sistema, y al mismo tiempo permite reducir los tiempos de cálculo y mejorar la conectividad del portal CHONOS.

Con respecto a la calidad de los pronósticos oceanográficos (nivel del mar, corrientes, temperatura y salinidad), las evaluaciones que se han realizado a través de las distintas etapas de desarrollo del proyecto han mostrado en general una mejora continua en la calidad de estos. Inicialmente, en las primeras etapas se realizaron evaluaciones satisfactorias del nivel del mar, lo cual generó un modelo base estable para seguir calibrando y poner la atención en mejorar el campo de masa y de corrientes. Sin embargo, estos dos últimos campos son los más complejos de reproducir en la modelación, en parte debido a la geografía de la zona, la cual está llena de canales, angosturas y cuerpos de aguas discontinuos, y también a la batimetría, que se presenta bastante irregular, con los típicos rasgos de las zonas de fiordos, tales como umbrales, cuencas, constricciones y cambios abruptos de profundidad. Esto se reduce en un dominio altamente complejo para la simulación, donde los rasgos mencionados pueden generar fácilmente inestabilidades numéricas en el modelo. Esto puede ser bastante sensible en el caso de las corrientes, donde una representación incorrecta o deficiente de la batimetría podría dar lugar al desarrollo de flujos poco representativos de la zona. La evaluación en el presente informe muestra que en una zona como el canal Moraleda, en la región de Aysén, la corriente se ajusta de manera adecuada, aunque tiende a sobrestimar las magnitudes en flujos hacia el norte, presenta una buena distribución de la energía en el dominio de las frecuencias, lo que indica que esta responde a los procesos principales.

Por otra parte, es necesario considerar que la zona de fiordos y canales del sur de Chile se caracteriza por ser una zona estuarina de gran escala, donde convergen aguas de origen oceánico con aguas de origen continental, las que se distinguen por su baja salinidad, lo que al mezclarse modifica la estructura vertical de la circulación, derivando en un patrón de circulación gravitacional o estuarina, (agua de baja densidad fluyendo sobre aguas más densas a través de un gradiente de presión). Para lograr que el modelo desarrolle estos patrones, es necesario ingresar los flujos de los ríos presentes en la zona, como también el agua producto de los deshielos y una correcta pluviometría. Hay varios desafíos en esta tarea, una de ellas es la falta de datos de los caudales de los ríos que desembocan en la zona, puesto que las mediciones disponibles (Dirección General de Aguas), en la gran mayoría de los casos mide los caudales en las partes altas de los ríos y no en las bocas de estos, donde puede haber diferencias considerables entre un punto y otro. En el caso de los deshielos, la falta de información es más crítica aún, ya que existe una alta incertidumbre sobre el real aporte de agua de estos cuerpos, y como es su variabilidad estacional e interanual, siendo la mayor parte del tiempo valores altamente subestimados en los modelos.

Aún resolviendo parcialmente la falta de datos hidrológicos, usando modelos, interpolaciones y/o aproximaciones, se debe tener precaución con introducir cambios bruscos en los aportes de agua dulce para evitar inestabilidades numéricas que hagan fallar la operatividad de MOSA-ROMS. Debido al carácter operacional del modelo, se debe mantener un equilibrio entre la calidad de las simulaciones y la estabilidad propiamente tal, donde se prioriza que el modelo “siempre esté operativo”. Esto lleva a ser bastante rigurosos con los cambios a realizar, es por esto que se ha optado por un ingreso gradual de datos de ríos, a medida que se tiene información disponible. Actualmente el modelo funciona con 33 fuentes de agua dulce que representan los principales ríos en el dominio, además del ingreso por deshielo de Campo de Hielo Norte, en la Laguna San Rafael, aunque se hace evidente que son insuficientes para lograr representar las estructuras termohalinas con mayor precisión, han logrado resolver patrones estacionales y en buena parte se ha observado una buena distribución espacial del campo de masa, lo que da cuenta que el modelo es capaz de representar los procesos de gran escala presentes en las zonas interiores.

En el caso de la implementación del sistema operacional atmosférico MOSA-WRF, podemos evidenciar que el modelo ha logrado un alto grado de estabilidad implicando su pronta acople al modelo operacional oceanográfico MOSA-ROMS. El modelo MOSA-WRF ha estado operativo durante más de un año y solo en 12 ocasiones el pronóstico falló no pudiendo ejecutarse. Estos fallos se debieron principalmente a problemas relacionados de los servidores desde donde se descarga la información global que alimenta las condiciones de borde del modelo. En ocasiones puntuales también el sistema se vio interrumpido producto de fallas en la red interna de IFOP-Putemún. Estos problemas fueron mitigados al migrar el sistema al nuevo DataCenter de IFOP ubicado en la ciudad de Viña del mar, el cual nos entrega mayor estabilidad y eficiencia a la hora de procesar y enviar información a los servidores en donde se aloja la plataforma interactiva de visualización CHONOS.

MOSA-WRF logró resolver de manera aceptable la variabilidad de diferentes variables físicas-meteorológicas en la estación de Cucao. La evaluación del sistema operacional mostraron altas correlaciones en las componentes del viento, así como en su intensidad, e incluso logrando representar los “*peaks*” de fuertes vientos asociados principalmente al ingreso de sistemas frontales. Además, la temperatura a 2 m de altura fue bastante bien representada en términos de su fase, no obstante hay ciertos momentos en los cuales su valores fueron subestimados, principalmente cuando se experimentaron temperaturas mayores al promedio durante el mes de febrero. Por último, la radiación solar también siguió un patrón que hace referencia a un ciclo anual, concentrando la mayor radiación en verano y menor radiación en invierno, concordante con las observaciones. Los ciclos diarios de las variables estudiadas igual fueron resueltos de buena manera con correlaciones muy altas y amplitudes cercanas a la realidad.

Paralelamente con el fin de resolver de manera más realista las características del terreno presente en los sectores de fiordos y aquellos fuertemente influenciados por esta topografía irregular, se desarrolló un dominio de mayor resolución espacial (MOSA-WRF de 3 km). Con esto se pretende mejorar la circulación atmosférica de MOSA-WRF, la cual está altamente regulada por estas características. Luego de evaluar el sistema MOSA-WRF contra las salidas de la DMC, facilitadas hasta el momento para forzar MOSA-ROMS y MOSA-WRF3km como modo de prueba, se puede afirmar que se obtuvieron buenos resultados para el sistema de mayor resolución MOSA-WRF3km, ya que este logró afirmar la hipótesis sostenida. Por ejemplo en la estación de Huinay, ubicada en la boca de un valle cordillerano, MOSA-WRF3km logró representar una circulación orientada en el mismo sentido de este valle, que los productos numéricos MOSA-WRF y DMC no lograron resolver. Por otro lado el ciclo diario de la radiación solar estuvo mejor representado por el modelo MOSA-WRF3km que con MOSA-WRF y DMC.

Por lo anterior, se puede concluir que con un modelo de mayor resolución en este caso MOSA-WRF3km se puede resolver de mejor manera ciertos patrones atmosféricos en sectores de topografía compleja que otros modelos de menor resolución como lo son MOSA-WRF y DMC con 5 y 12 km respectivamente no pudieron resolver, por lo tanto el siguiente paso será, luego de demostrar estabilidad en el tiempo, implementar el pronóstico operativo MOSA-WRF3km como el oficial, para ser exhibido en la plataforma CHONOS y además como forzante atmosférico de MOSA-ROMS.

6.2 Desarrollos actuales y perspectivas de MOSA

Desde el comienzo del programa de “Desarrollo de sistema de predicción Sinóptico”, se ha puesto esfuerzo en su constante mejora, evolucionando hacia un modelo estable y confiable en el tiempo. En este camino se ha trabajado en diversos aspectos del modelo a modo de mejorar su calidad y precisión, disminuyendo sus rangos de errores en diversas variables oceanográficas. Inicialmente el foco estuvo puesto en crear un modelo que sea altamente estable, sacrificando en parte su calidad, pero a medida que ha pasado el tiempo, y los recursos humanos y computacionales detrás del proyecto han ido en aumento, se ha podido trabajar en aspectos más amplios para mejorar su calidad. En esta etapa, junto con la implementación de un modelo atmosférico de alta resolución para forzar MOSA-ROMS, también se ha comenzado la construcción de un dominio nuevo, que sea capaz de mejorar la calidad de los pronósticos oceanográficos en una zona donde la topografía y la batimetría juegan un rol importante en el desarrollo de patrones de circulación y estructuras termohalinas.

Para construir este nuevo dominio se han evaluado algunas grillas, las que contienen una batimetría que ha corregido en algunas zonas, perfiles de fondo poco realistas, y que

podrían ser sensibles en la calidad de los resultados. Estos cambios fueron acompañados con procesos de suavizamiento necesarios para hacer funcional las grillas en ROMS, y que le otorgan estabilidad numérica a las simulaciones. Se diseñaron diversas grillas, finalmente se decidió probar 2 de ellas, denominadas MOSA v4a y MOSA v4b, las cuales difieren en los parámetros de suavizado. Los mayores cambios se realizaron en la zona del Fiordo Reloncaví (sector de la boca), fiordo Comau, paso Queullin, archipiélagos de Guaitecas, Chonos, Huichas, canales Moraleda, Errázuriz, Costa y Estero Elefantes. En el caso de las zonas continentales de la región de Aysén, los procesos de suavizado tendieron a modificar levemente la batimetría original, por lo que se deberá revisar el impacto de estos cambios. Las grillas fueron testeadas en simulaciones de 3 días donde mostraron ser estables, mientras que se evaluó el nivel del mar con datos de mareógrafos para identificar si inducían errores en una variable que la grilla actual resuelve de manera exitosa. Los resultados indican que además de estables, resultaron estar en fase con los mareógrafos.

También evaluamos la modificación de la distribución de los niveles verticales, a modo de buscar una configuración que busque disminuir su separación en superficie, para aumentar la resolución en esta zona de la columna de agua, que es donde ocurren los procesos más relevantes en las zonas estuarinas. Para lo anterior se debe considerar que al aumentar la batimetría, los niveles tienden a separarse, ya que se debe mantener su grado de distribución, esto puede causar en la pérdida de resolución en superficie, y en la consiguiente pérdida de calidad de los resultados. Es por ello que se ensayan diversas configuraciones, de modo de mantener la estructura deseada, aun realizando cambios en la profundidad.

Con la grilla ya estable y la configuración de niveles verticales deseada implementada, podemos comenzar la implementación del dominio en modo operacional. Esto se espera realizar en el próximo mes, aunque solo a modo de prueba, el cual suele durar a lo menos un mes. Una vez pasado ese tiempo, y si no se presentan inestabilidades ni errores, se pasará a la implementación definitiva.

Por otra parte, la calidad de cualquier pronóstico está estrechamente ligada a la calidad de las condiciones iniciales con las cuales se arranca el modelo, es por esto que se debe trabajar en disminuir los rangos errores asociados a la interpolación de productos de más bajas resoluciones. Aún cuando MOSA-ROMS se inicia diariamente sobre las condiciones iniciales que pronostica (lo que permite mantener la mezcla alcanzada, especialmente en las zonas interiores), se hace necesario poder ajustar los errores espaciales que puede haber en la formación de estructuras o patrones. Para ello se pueden emplear técnicas que permitan utilizar datos *in situ* de ciertas variables e integrarlos a los datos iniciales, a modo de obtener una condición inicial mejorada. Este proceso requiere que los datos *in situ* estén disponibles al momento de iniciar el modelo, y que a su vez tengan una cobertura significativa, para que el proceso de interpolación tenga un impacto real en los datos. A

estas técnicas se les denomina asimilación de datos, de las cuales existen una gran variedad de técnicas y enfoques. Estas técnicas demandan una alta capacidad de cómputo, puesto que están formuladas en base a complejas expresiones matemáticas, que realizan cálculos en cada punto de la grilla, lo que puede demandar un gran esfuerzo trabajarlas. Además, uno de los problemas de emplear asimilación de datos en el sur de Chile es la falta de datos disponibles en tiempo real o “casi real”, limitando sus aplicaciones a productos satelitales, los cuales, generalmente no poseen una buena cobertura de los mares interiores. En el caso de variables oceánicas, se dispone de manera operacional datos de temperatura superficial del mar.

La construcción de campos iniciales utilizando datos de campañas oceanográficas realizadas por IFOP ha resultado complejo, en parte, debido a la disponibilidad de datos, los cuales, no necesariamente cubren todo el dominio modelado ni en los mismos períodos de medición. No obstante, la velocidad de los procesos oceánicos en comparación a los atmosféricos permiten relajar en cierto modo las necesidades de data en tiempo real, haciendo de las imágenes satelitales un producto útil para su implementación. A modo de evaluar el impacto de los métodos de interpolación que se pueden realizar sobre los datos, y basados en el hecho de que solo se dispone de datos satelitales (por el momento) de manera operacional, es decir, datos casi en tiempo real, se realizó una prueba basada en un método simple de asimilación denominado Ocen Observation Simulation Experiment, cuyo énfasis radica en estimar la importancia de los datos asimilados en las simulaciones y también en el diseño de redes de observación.

Si bien los resultados pueden ser relevantes para diagnosticar el impacto de estas técnicas en la mejora de las condiciones iniciales del modelo, por el momento, y en base a las capacidades actuales presentes en el proyecto, resulta costoso llevar estas pruebas a modo operacional. Al mismo tiempo, considerando que los datos disponibles, que se reducen a las imágenes satelitales, aún no logran una buena cobertura de los mares interiores, parece sensato poner la atención en otras necesidades del proyecto por el momento. Es de esperar en un futuro que la implementación de una red observacional de datos oceanográficos y atmosféricos en el sur de Chile, requerida por la Ley de Pesca, pueda proporcionar una cobertura suficiente de información disponible, de modo tal que técnicas de asimilación de datos produzcan un impacto considerable en la calidad de los pronósticos.

Finalmente, se comenzó a trabajar en la implementación de un modelo biogeoquímico (NChIPZD) acoplado al modelo hidrodinámico ROMS. En esta etapa del proyecto realizamos 2 simulaciones de 1 año de duración. El primero consistió en utilizar el mismo dominio de MOSA-ROMS, es decir, un modelo de alta resolución espacial (~ 1 km) y el segundo en utilizar un modelo de más baja resolución (2.7 km), pero que abarca una zona mayor de simulación tanto hacia el norte como hacia el sur. La otra diferencia importante

fue que al modelo de baja resolución se le agregó aportes de nutrientes provenientes de los ríos considerados en el dominio.

De acuerdo a los resultados del modelo NChPZD, se observó que durante el mes de noviembre hay una sobre estimación de las concentraciones de Nitrato ($> 15 \mu\text{M m}^{-3}$) (Fig. 35), sobre todo en los estratos localizados entre 0 y 50 metros de profundidad. De acuerdo al crucero CIMAR-7-E2, durante esta época (primavera) las concentraciones de nitrato en los primeros metros de la columna de agua fueron inferiores a $10 \mu\text{M m}^{-3}$. Hacia aguas más profundas, tanto la simulación como los datos *in situ* presentan un patrón similar (Fig. 37). En julio, el modelo NChPZD, subestimó la concentración de nitrato, sobre todo en la zona del golfo de Corcovado (Fig. 38). El crucero CIMAR 11-E1 durante este mes, presenta altas concentraciones, las cuales incluso en superficie alcanzan $\sim 30 \mu\text{M m}^{-3}$ en el golfo de Ancud. Al igual que durante noviembre, hacia aguas más profundas, tanto la simulación como los datos *in situ* presentan un patrón similar (Fig. 40). Al respecto, durante ambas épocas del año analizadas (primavera e invierno), es posible inferir que nitrato debe ser ajustado, particularmente los primeros metros de la columna de agua.

El oxígeno simulado durante noviembre presenta bajas concentraciones en comparación a las observaciones *in situ*, sobre todo entre 0 y 5 metros de profundidad (Fig. 36), hacia zonas más profundas las concentraciones son similares (Fig. 37). Durante julio, el oxígeno presenta diferencias principalmente entre 0 y 5 metros de profundidad (Fig. 39), donde las observaciones CIMAR registraron concentraciones máximas de $400 \mu\text{M m}^{-3}$. Bajo 5 metros, tanto la simulación como los datos *in situ*, presentan un patrón similar (Fig. 40). En concordancia a lo observado con nitrato, durante ambos meses analizados, el oxígeno presenta las mayores diferencias en los primeros metros de la columna de agua.

La calibración, tanto de nitrato como de oxígeno, implica el ajuste de otros elementos, entre estos, fitoplancton, amonio, fosfato, silicato, zooplancton y parámetros como la remineralización de la materia orgánica y la nitrificación, entre otros. Es decir, la modelación de cualquier nutriente o elemento biológico presente en la columna de agua, involucra múltiples interacciones. Una alternativa de simulación altamente eficaz para problemáticas asociadas a biogeoquímica en distintos ambientes es la utilización del modelo biogeoquímico PISCES (Pelagic Interactive Scheme for Carbon and Ecosystem Studies, Aumont et al., 2015). Las ventajas de utilizar PISCES, es que simula los ciclos de carbono, oxígeno y los principales nutrientes que controlan el crecimiento del fitoplancton (PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , Si, Fe). PISCES cuenta con 24 compartimento y más de 60 parámetros (Aumont y Bopp, 2006), los cuales están especialmente configurados para ser utilizado junto con el modelo ROMS. Cabe destacar que la nueva versión de ROMS, CROCO (<https://www.croco-ocean.org>) contiene la versión actual de PISCES (Aumont et al., 2015) en la cual han aumentado el número de parámetros e incorporado cambios a los nutrientes modelados, a los compartimentos de fito y zooplancton y a la materia orgánica

disuelta y particulada, entre otros. La implementación de PISCES en la zona sur-austral de Chile, podría ayudar a resolver problemáticas tan relevantes como aquellas relacionadas con la marea roja, la eutrofización, la disponibilidad de nutrientes y luz para el crecimiento del fitoplancton y la alcalinidad de la columna de agua, entre otras.

6.3 Sistema de información oceanográfica CHONOS

Sin duda uno de los hitos más relevantes de este proyecto ha sido la implementación del portal CHONOS (www.ifop.cl/chonos), el cual es fruto de un largo trabajo cooperativo entre IFOP, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, y el desarrollador de la página, Meteodata. Se destaca que esta iniciativa es la única en su tipo en Chile, posicionándose como pionera en oceanografía operacional.

El portal está enfocado en las necesidades recogidas de un amplio rango de usuarios, que buscan poder contar con información ambiental relevante de manera oportuna y confiable, de modo que permita gestionar emergencias sanitarias y ambientales, ayude a la planificación y gestión del territorio. Por otra parte, también busca contribuir a ampliar el conocimiento de los diversos procesos físicos presentes en la Patagonia, uno de los grandes desafíos de la comunidad científica en Chile.

CHONOS es básicamente un sistema de información oceanográfica basado en datos obtenidos de modelos numéricos, los cuales para funcionar se alimentan de datos recogidos de modelos globales, los cuales son ajustados con observaciones. El uso de modelos numéricos para resolver los procesos oceanográficos es una tarea que se viene implementando durante los últimos 20 años en países desarrollados, en parte, gracias al impulso que ha tenido el desarrollo de computadores de alto rendimiento, así como también a la mejora en los sensores satelitales.

En el caso de la Patagonia chilena, su configuración topográfica y batimétrica, la torna en una zona de difícil acceso, donde los estudios oceanográficos pueden ser costosos de realizar, sin mencionar que su particular geografía con cientos de canales y fiordos generalmente dan lugar a procesos oceanográficos locales, obligando a desarrollar enfoques muy acotados en los estudios. Esto último impulsa con fuerza la idea de desarrollar técnicas que permitan obtener información oceanográfica, de una forma tal que pueda abarcar toda la zona de canales y fiordos. En este punto, las imágenes satelitales suelen ser una herramienta útil, ya que permiten observar y seguir procesos en el tiempo. No obstante, cuentan con dos grandes desventajas: solo presentan datos superficiales, y su cobertura es limitada, puesto que no logran abarcar todas las zonas interiores y que la presencia de nubosidad puede estropear la imagen. Se vuelve relevante mantener un sistema de modelación operacional para conocer el estado actual de las principales variables

oceanográficas, y también que otorgue una proyección sinóptica de su evolución en el tiempo

No obstante, el uso de modelos numéricos no solo se limita a los pronósticos. CHONOS sirve como plataforma para dejar disponible a los usuarios otras herramientas derivadas de la modelación numérica, que no son parte de este proyecto, pero que también han sido desarrolladas por el Departamento de Medio ambiente, perteneciente a División de Acuicultura del Instituto.

CHONOS contiene 5 aplicaciones actualmente disponibles:

1. MOSA: Modelo en el cual se basta el actual proyecto, el cual entrega pronósticos oceanográficos y atmosféricos.
2. CLIC: Explorador de conectividad hidrodinámica que permite conocer la dispersión de organismos, basado en modelos biofísicos (actualmente implementado para Caligus).
3. Parti-MOSA: Mmodulo desacoplado para la simulación de trayectoria de partículas en base de los resultados de MOSA-ROMS.
4. Atlas Oceanográfico: Es una base de datos de simulaciones históricas oceanográficas y atmosféricas. Actualmente disponible para la región de los Lagos, año 2017.
5. Tiempo Real: Interfaz que permite visualizar y descargar datos de la red de estaciones meteorológicas implementadas por el Instituto en las regiones de los Lagos y de Aysén.

A su vez, el portal cuenta con contenidos y guías de usuario que ayudan al uso óptimo de las herramientas. Si bien existe una amplia gama de posibilidades en el portal, aun no se ha activado la opción de descarga de datos producidos por los modelos. Esto básicamente porque aún es una herramienta a modo de prueba, en donde se está evaluando constantemente los aspectos informáticos implicados en ella, y la opción de liberar grandes volúmenes de datos requiere un mayor desarrollo.

Como perspectiva, CHONOS pretende aumentar la cantidad de herramientas presentes, donde se pretende aumentar la cantidad de estaciones meteorológicas de IFOP, también se está trabajando en la construcción de una base de datos georeferenciada con todas las campañas oceanográficas realizadas por IFOP en la Patagonia (desde el 2011 hasta la actualidad), incorporar datos de la boyas oceanográficas en la Patagonia instaladas por diferentes instituciones académicas, y el incremento de modelos históricos para el atlas oceanográfico, construido con datos de modelaciones de alta resolución basadas en observaciones en la Patagonia durante los últimos 8 años.

7. CONCLUSIONES

El presente informe entrega los resultados de la implementación de un modelo sinóptico de pronósticos oceanográficos y atmosféricos para la Patagonia de Chile. Este proyecto se inicia el 2015 manteniéndose operativo hasta la actualidad. A este modelo se le han efectuado mejoras y calibraciones constantes.

Específicamente en esta etapa se trabajó en la mejora del forzante atmosférico, para lo cual se implementó un modelo atmosféricos operacional de alta resolución (5 km) basado en el modelo WRF. Actualmente, este modelo está siendo utilizado para forzar la superficie del modelo oceánico MOSA-ROMS . Se espera aumentar esta resolución a 3 km en etapas futuras.

También se ha trabajado en la mejora de la batimetría. Se modificó la batimetría en zonas altamente sensibles para la calidad de los resultados, donde generalmente se ha aumentado la profundidad, ya que por motivos de estabilidad el modelo tiende a suavizarlas. Estas nuevas grillas han sido probadas con éxito, por lo que se espera una implementación operacional en el próximo mes.

Se aumentaron el numero de fuentes de agua dulce del modelo. Esto permite mejorar la capacidad representación de los procesos de mezcla y estratificación de la columna de agua, lo cual es un tema altamente sensible en modelos hidrodinámicos implementados en zonas estuarinas.

Para evaluar métodos que permitan mejorar la condición inicial del modelo, se realizaron pruebas con una técnica simple de asimilación de datos, de la cual se desprende que aun es necesario contar con una cantidad (y calidad) de datos mayor a la disponible actualmente por imágenes satelitales. También queda de manifiesto que las capacidades computacionales requeridas para emplear estas técnicas son mayores a las disponibles. No obstante, se espera que una futura implementación de una red observacional en la Patagonia, producto de la Ley de Pesca, podría generar una cobertura de datos suficiente, la que podría impulsar nuevas pruebas de asimilación de datos.

A modo de expandir los resultados del modelo, se comenzó con pruebas de un modulo biogeoquímico NChPZD acoplado al modelo hidrodinámico ROMS. Se compararon 2 dominios de diferentes resoluciones (~ 1km y 2.7 km) con datos del crucero CIMAR. El oxígeno y el nitrato simulado presentó mayores diferencias en los primeros metros de la columna de agua, mejorando su desempeño al descender en profundidad. Ya que la calibración de estas variables depende de otros procesos como por ejemplo la remineralización de la materia orgánica y la nitrificación, evaluaremos en la próxima etapa el modelo biogeoquímico PISCES. La principal ventaja de utilizar PISCES, es que simula

los ciclos de carbono, oxígeno y los principales nutrientes que controlan el crecimiento del fitoplancton (PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , Si, Fe).

Finalmente, y no menos importante, se destaca la implementación de un renovado portal web oceanográfico CHONOS (www.ifop.cl/chonos), el cual cuenta con diversas mejoras respecto a su predecesor, contando entre sus novedades, con una interfaz gráfica mejorada, la incorporación de pronósticos atmosféricos, una nueva versión de la herramienta de conectividad hidrodinámica CLIC, un atlas oceanográfico basado en simulaciones históricas y un visualizador de estaciones meteorológicas en tiempo real.

ANEXO A: COMPONENTES DE UN SISTEMA OPERACIONAL

Un sistema de predicción oceanográfico operacional consta básicamente de 3 componentes: un sistema de observaciones (datos recopilados en tiempo real o cerca de lo real), los modelos numéricos y la asimilación de datos. Los datos registrados por mediciones forman la base de un modelo preciso y fiable. La calidad de un modelo de predicción depende de la fiabilidad con la que el modelo numérico representa la física y dinámicas del sistema. La modelación por su parte genera productos, ya sean estos, resultados directos de las simulaciones (corrientes, temperatura, salinidad, etc.) o bien, post-procesos que generen subproductos que sirvan para la toma de decisiones de las autoridades. El diagrama basado en un sistema operacional conceptual de Trenberth (2008), lo ilustra de manera más gráfica (Fig. 1). Este sistema comienza con las observaciones, la investigación científica, el análisis y los resultados de la información requerida por los tomadores de decisiones. Las decisiones sobre las prioridades y la coordinación entre los componentes del sistema es generada por la necesidad de una comprensión científica junto con el tipo de información oceanográfica requerida por los tomadores de decisiones.

A.1 Modelos numéricos

Un modelo se definirá por su capacidad de poder resolver los fenómenos físicos mediante las ecuaciones matemáticas y de la parametrización de ecuaciones no resueltas aún (Chassignet & Verron, 1998). Las fuentes de error vendrán dadas por estas aproximaciones numéricas, por la resolución espacial y temporal escogida en el modelo, y por como se resuelven los procesos de diferentes escalas de variabilidad.

La reproducción de diferentes procesos oceanográficos en los modelos numéricos dependen de la escala espacial y temporal utilizada. La oceanografía operacional de alta resolución necesita ser alimentada por información global que pueda reproducir la variabilidad de meso-escala (remolinos, frentes, estructuras superficiales, etc). Esto exige que la grilla del dominio sea de una resolución tal que permita resolver los procesos barotrópicos y baroclínicos. A su vez, la modelación costera debe ser precisa en la obtención de un nivel del mar bien estimado por sus forzantes de marea, viento y presión atmosférica. Finalmente, el campo de masa de la capa superficial oceánica y su interacción con la atmósfera deben estar bien definidas, ya que es la zona donde se presentan la mayor cantidad de procesos.

El uso de altas resoluciones espaciales y/o temporales reduce errores locales de truncamiento en esquemas numéricos discretos. Permite una mejor representación de procesos locales de pequeña escala de variabilidad. A su vez, permite tener un mayor detalle de las características topográficas y así poder evitar errores numéricos en el gradiente de presión (Shchepetkin & McWilliams, 2003). Sin embargo, hay que tener en

cuenta que el uso de modelos de alta resolución espacial implica un mayor costo computacional (Debreu et al., 2012).

Los modelos oceanográficos de circulación global difieren entre sí en su configuración y en la manera en que son implementados. En un modelo se podrán escoger diferentes parametrizaciones tales como: tipo de coordenada vertical, esquema de mezcla vertical, capa límite, aproximación de turbulencia, superficie libre o tipo de advección. Los códigos deben ser implementados en configuraciones realistas, lo que hace necesario disponer de batimetrías de calidad. También deben ser eficientes en términos de computación (paralelización explícita y descomposición del dominio) para poder reducir el tiempo de retraso entre el ingreso de los datos al modelo y la salida de los resultados al usuario.

A.2 Observaciones

Una limitación en la implementación de estos tipos de sistema en Chile, es la falta de datos de terreno disponibles en tiempo real o casi real. Contar con una red de equipos capaces de entregar datos en tiempo real permite mejorar los pronósticos mediante técnicas de asimilación de datos. Este tipo de técnica permite obtener una condición inicial más ajustada a la realidad observada, aunque asume un grado de complejidad elevado, que requiere mayores capacidades humanas, técnicas e instrumentales. A su vez, esta información junto con datos satelitales también permite validar las simulaciones numéricas, cuantificando el error y desempeño de distintas zonas dentro del modelo oceanográfico operacional.

Dentro de las observaciones y mediciones que se deben integrar a los modelos numéricos a través de la asimilación de datos, cobran especial importancia las mediciones satelitales debido al carácter global de los modelos numéricos y la cobertura que proporcionan estas mediciones. Con satélites es posible medir altimetría del nivel del mar (SSH), temperatura superficial del mar (SST), salinidad superficial del mar (SSS), color del mar, campos de olas y viento, dispersión de contaminantes y cobertura de hielo marino

Además de los productos derivados de técnicas satelitales, la oceanografía operacional sigue necesitando mediciones en terreno, tanto para calibración de los sensores satelitales, como para medición de parámetros en la columna de agua (Ravichandran, 2011). Las mediciones pueden ser eulerianas (emplazamiento fijo, asigna propiedades a un punto del espacio para cada instante) o lagrangianas (miden en distintos puntos, seguimiento de las partículas en su posición y propiedades en cada instante).

Como ya se indicó, los modelos son alimentados no sólo por forzantes oceánicos, sino también por forzantes atmosféricos: viento (dirección y velocidad), radiación solar, temperatura, presión atmosférica, balance neto precipitación- evaporación sobre el océano y

aportes fluviales (dependientes de la precipitación/evaporación terrestre). Los datos, una vez registrados deben ser sometidos a controles de calidad para establecer si se encuentran dentro de los rangos apropiados y de esta manera eliminar los datos erróneos. En el desarrollo de un sistema de pronósticos, el control de calidad de los datos es el paso previo a la asimilación de datos.

A.3 Asimilación de Datos

Uno de los pilares principales de los sistemas operacionales son las mediciones, con ellas podemos establecer el nivel de incertidumbre del modelo, y nos permite orientar los métodos de ajuste y calibración del mismo. Esta funciona a través de un análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo (Fig. 2). También establece una base para que en etapas posteriores del proyecto se comience el desarrollo de técnicas de asimilación de datos, las cuales suponen un desafío mayor, debido a las pocas experiencias nacionales en este ámbito y el carácter experimental que posee actualmente.

La asimilación de datos se ha desarrollado en distintas direcciones, donde cada camino ha conducido a un énfasis diferente. La literatura en general es diversa y la nomenclatura a veces dispar, lo cual a veces puede oscurecer los temas comunes y los enfoques metodológicos. Aun así los principales objetivos de la asimilación de datos pueden resumirse en:

- *Interpolación, extrapolación y filtrado:* En este enfoque el propósito de la asimilación de datos es estimar el estado del océano utilizando toda la información disponible para generar un análisis que desemboque en una estimación de los campos dinámicos, que sean consistentes con las consideraciones físicas previas. Esta es la visión que albergan la mayor parte de los trabajos oceánicos de asimilación de datos (Oke et al., 2002; Moore et al., 2004; Paduan & Shulman, 2004). Varios grupos actualmente están trabajando en la incorporación de datos reales a través de asimilación de datos en modelos globales y regionales bajo este enfoque, incorporando datos de distintas fuentes (i.e boyas perfiladoras ARGO, datos XBT, SST, etc). Generalmente son instituciones que trabajan en el análisis de datos globales en tiempo real y en la generación de pronósticos, entre ellos, el European Center for Medium Range Forecast (ECMRF), el Australian Bureau of Meteorology, y el U.S National Center for Environment Prediction (NCEP).
- *Calibración de parámetros:* Acá el propósito de la asimilación de datos es aumentar la precisión del modelo oceánico a través de ajustes sistemáticos de parámetros de los cuales no se tiene información o presentan una considerable incertidumbre. El énfasis está en el ajuste de lo que es incierto y muy difícil de medir, por ejemplo, parámetros de turbulencia o la topografía del fondo marino. Sin embargo, este

enfoque exige una estimación de parámetros que generalmente implica problemas altamente no lineales que son más complejos.

- *Prueba de Hipótesis:* El propósito de la asimilación de datos en este enfoque es poner a prueba un sistema de predicciones del océano, el cual incluye como componentes del modelo, dinámicas hipotéticas del océano, un modelo de error y un modelo de error para validación de datos, buscándose finalmente un análisis de los defectos primarios en el modelo dinámico o de la observación del sistema. Una vez que un sistema de predicción se ha validado por la prueba de hipótesis formal u otros medios, el sistema de asimilación de datos puede utilizarse para diseñar y predecir el rendimiento de los futuros sistemas de observación. Para este propósito se puede realizar una simulación de un sistema de observación experimental, utilizando la llamada prueba del gemelo idéntico, y así evaluar el impacto de las observaciones presentes y futuras pueden tener en la modelación (Zhang et al., 2007).

ANEXO B: RECURSOS COMPUTACIONALES

Se dispone de un conjunto de ordenadores interconectados entre sí mediante una red de alta velocidad para distribuir el trabajo de cómputo. Este tipo de configuración recibe el nombre de clúster. La principal característica de estos, es que aunque sean varios computadores el sistema completo se comporta como uno solo. El clúster donde actualmente se encuentra implementado MOSA-ROMS está ubicado en el instituto de Fomento Pesquero en Castro, consta de 5 nodos en total, 1 nodo líder y 4 nodos de calculo (Fig. 56). El nodo líder es el computador en el cual el usuario interactúa con el sistema. En este nodo se realizan las configuraciones para el procesamiento de los datos, el almacenaje temporal de estos datos y se ejecutan los diferentes procesos del sistema operacional. Mediante un software especializado (encolador) se distribuyen estos procesos en los nodos de calculo. Las características del nodo líder y de los nodos de computo son descritas en la Tabla 10.

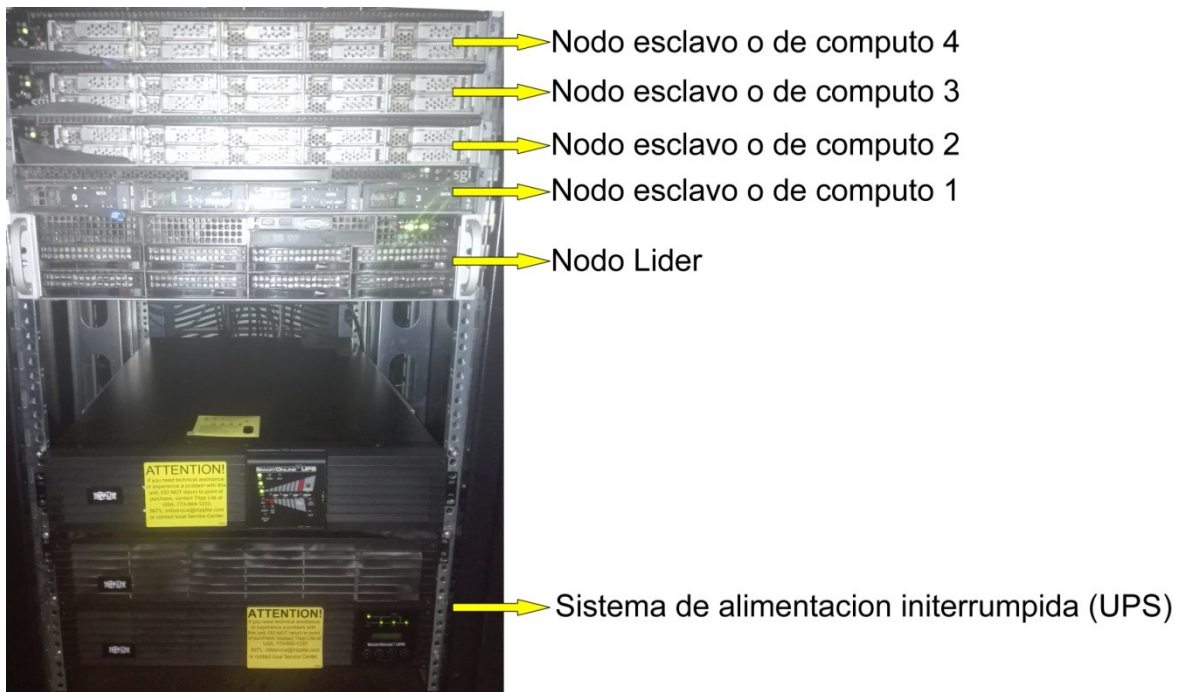


Figura 56: Clúster utilizado para las simulaciones de los pronósticos del modelo operacional MOSA-ROMS y MOSA-WRF.

Tabla 10: Especificaciones técnicas servidor para MOSA-ROMS ubicado en Castro.

Nodo líder – Modelo SGI C1110–RP6.	Nodos computo (4 unidades) – SGI C1110–RP6 .	Hardware	
2 procesadores Intel Xeon E5-2620 de 6	2 procesadores Intel Xeon E5-2620 de 6	Switch	Infiniband
		Voltaire 4036	VLT-30111

núcleos de 2.0 ghz	núcleos de 2.0 ghz	de 36 para red de paso de mensajes (MPI)
64GB memoria RAM (8x 8GB)	64GB memoria RAM (8x 8GB)	Switch Gigabit Ethernet Administrable para red de administración de clúster
10 Discos duros de 1TB en RAID 5 (8TB disponibles para S.O, aplicaciones y datos)	4 Discos duros de 1TB (4TB disponibles para S.O, aplicaciones y datos)	
Fuente de poder redundante	Fuente de poder redundante	
Tarjeta PCI Mellanox ConnectX-2 Infiniband QDR	Tarjeta PCI Mellanox ConnectX-2 Infiniband QDR	

El switch infiniband usa una topología conmutada de tal forma que cada nodo puede compartir la red al mismo tiempo (en oposición a la topología en bus). Los datos se transmiten en paquetes de hasta 4 kB que se agrupan para formar mensajes. Un mensaje puede ser una operación de acceso directo a memoria de lectura o escritura sobre un nodo remoto (RDMA), un envío o recepción por el canal, una operación de transacción reversible o una transmisión multicast. Al ser un enlace de alta velocidad permite la transmisión de datos a procesar entre los nodos. El Switch Gigabit es un dispositivo de interconexión de equipos mediante la tarjeta de red. Su función es conectar los segmentos de red, pasando datos de un segmento a otro de acuerdo con la dirección MAC de cada dispositivo. Mediante este dispositivo es posible administrar y configurar los distintos nodos de forma remota.

El clúster usa como sistema operativo Centos versión 6.7. Esta distribución Linux está enfocada en entornos empresariales y es derivada de los paquetes fuentes libremente publicados por Red Hat. A su vez es necesario el compilador de fortran y C++ de Intel. Este compilador es óptimo para plataformas de hardware, minimiza estancamientos y produce así un código que se ejecuta en un número menor de ciclos. El compilador C++ de Intel soporta tres técnicas de alto nivel por separado para optimizar los programas compilados: optimización interprocedural o “interprocedural optimization” (IPO), optimización guiada por perfil o “profile-guided optimization” (PGO), y optimización de alto nivel o “high-level optimization” (HLO). También soporta técnicas y herramientas que agregan paralelismo en las aplicaciones. Python es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional. Es un lenguaje interpretado, usa tipado dinámico y es multiplataforma.

Finalmente, cabe destacar la gran cantidad de información que se almacena por cada día de procesamiento de datos. Por cada día se genera una carpeta con formato año-mes-día el cual contiene un total de 9 archivos netCDF, 3 archivos de configuración, 1 archivo de registro, y 25 figuras del campo de temperatura y salinidad superficial cada 6 horas. El peso total por carpeta es de ~ 20 Gb, generando así un total de ~ 620 Gb por mes. Estos datos son trasladados a discos de red instalados en la sala de servidores, donde son almacenados. Estos discos se conectan directamente a la red LAN a la que esta conectado el clúster, y a su vez a un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS).

Debido a que se debe asegurar la continuidad operacional de MOSA-ROMS y MOSA-WRF, se adquirió un nuevo clúster, el cual fue instalado y configurado en un Data Center en Viña del Mar con los estándares establecidos en las normas internacionales ANSI / TIA / EIA-942. Las especificaciones técnicas de este equipo son resumidos en la Tabla 11.

Tabla 11: Especificaciones técnicas servidor para MOSA-ROMS ubicado en Data Center Viña del Mar.

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

través de switch S4128f) switch S4128f)

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

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

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

ANEXO C: ECUACIONES MODELO HIDRODINÁMICO ROMS AGRIF

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. **Balace 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 termino de Coriolis asociado a velocidades verticales. Esto nos da:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (5)$$

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.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

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

$$\rho = \rho_0 = cte \quad (7)$$

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.

$$\vec{u} \cdot \nabla (-H) = w \quad (8)$$

5. **Conservación de momento horizontal.**

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| u}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| v}{\rho_0}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v + fu = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla_h (K_{Mh} \cdot \nabla_h v) + \frac{\partial}{\partial z} K_{Mv} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (10)$$

6. Ecuaciones conservativas de trazadores temperatura y salinidad

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla_h (K_{Th} \cdot \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = \nabla_h (K_{Sh} \cdot \nabla_h S) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (12)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ANEXO D: MODELO OPERACIONAL MOSA-WRF

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

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

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

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{\mu} \quad (13)$$

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 (13) propuesta por Laprise (1992), es la coordenada σ tradicional utilizada en muchos modelos atmosféricos hidrostáticos. η varía desde un valor de 1 en la superficie hasta 0 en el límite superior del dominio del modelo (Fig. 57). 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:

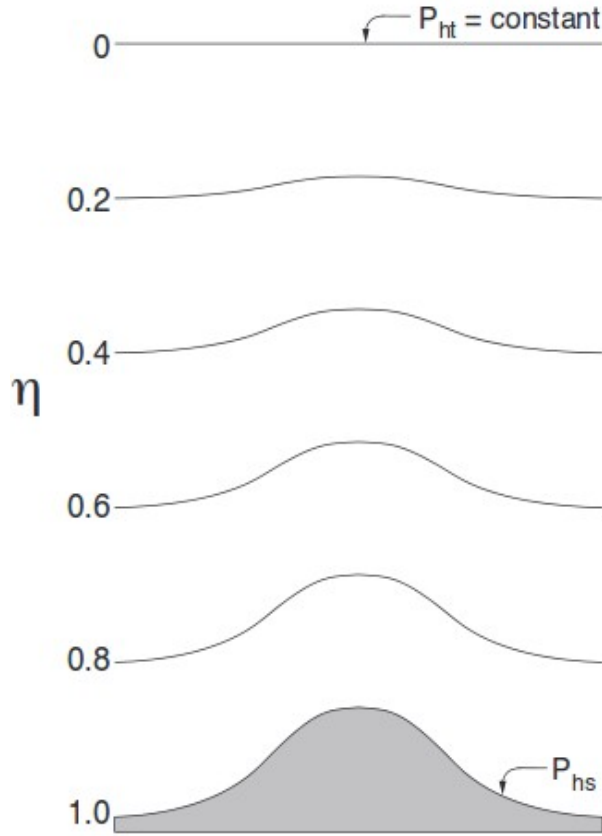


Figura 57: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno. Fuente Skamarock et al. (2005)

$$V = \mu v = (U, V, W), \Omega = \mu \eta', \Theta = \mu \theta \quad (14)$$

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

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_x(p\phi_x) = F_U \quad (15)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_y(p\phi_y) = F_V \quad (16)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (17)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\Theta \quad (18)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (19)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla_\phi) - gW] = 0 \quad (20)$$

Junto con la relación de diagnóstico para la densidad inversa:

$$\partial_{\eta} \phi = -\alpha \mu \quad (21)$$

y la ecuación de estado

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad (22)$$

Entre (15) - (22), los subíndices x, y y η denotan diferenciación,

$$\nabla \cdot V_a = \partial_x (U a) + \partial_y (V a) + \partial_{\eta} (\Omega a) \quad (23)$$

y

$$V \cdot \nabla_a = U \partial_x a + V \partial_y a + \Omega \partial_{\eta} a \quad (24)$$

donde a representa una variable genérica. $\gamma = c_p/c_v = 1.4$ 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_{Θ} representan términos forzados que surgen de la física del modelo, la mezcla turbulenta, las proyecciones esféricas y la rotación de la Tierra.

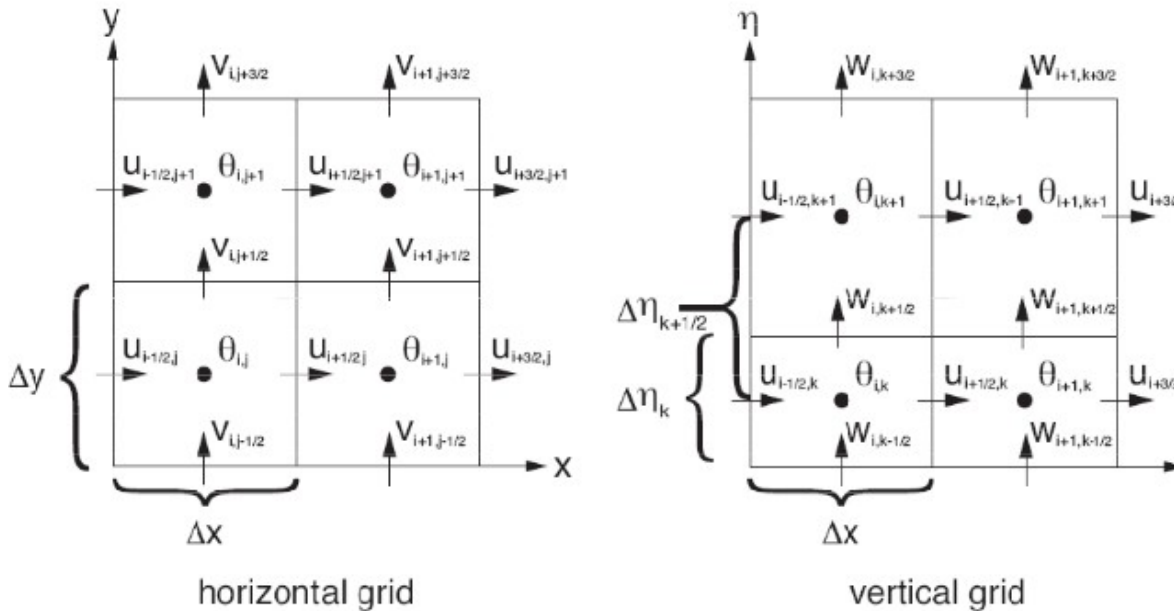


Figura 58: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).

Por otro lado, la discretización espacial en el núcleo ARW esta dada por la grilla Arakawa-C (Fig. 58), en dónde las componentes de la velocidad horizontal (U y V) y vertical (W) se resuelven en el centro de cada lado de las cuadrículas, dejando en el medio de cada cuadrícula las variables termodinámicas, de masa y escalares.

Por otro lado, el correcto funcionamiento de MOSA-WRF comienza con la descarga del forzante atmosférico, al rededor de las 3:00 am, mientras MOSA-ROMS da inicio a sus procesos. Esta información es esencial para lograr una simulación atmosférica exitosa. En esta versión se utilizaron los productos del modelo global de predicción atmosférica “Global Forecast System” (GFS). Estos pronósticos tienen una frecuencia temporal de 6 horas y una resolución horizontal de 0.25° distribuidos en 32 niveles verticales. Estos modelos son de libre acceso y se encuentran disponibles en <ftp://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).

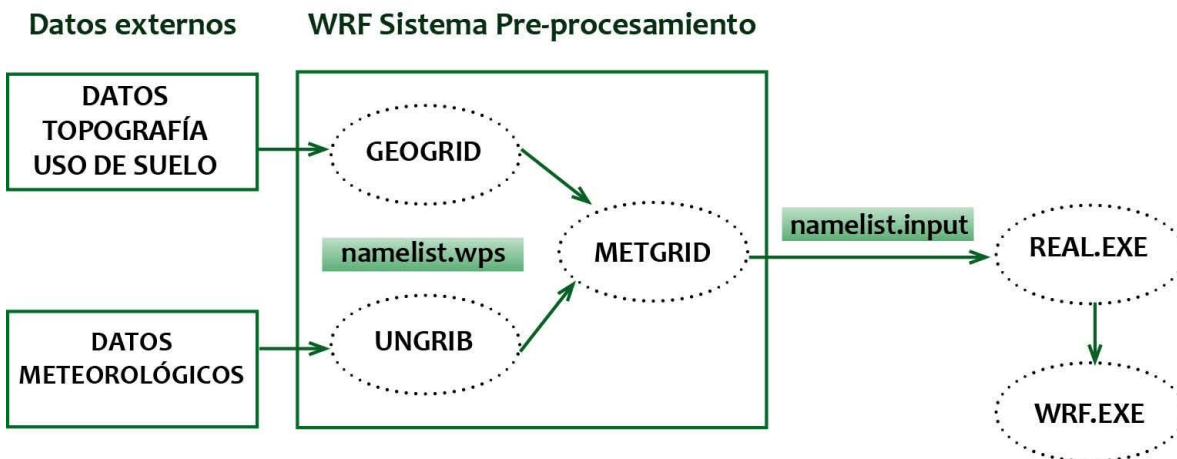


Figura 59: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.

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

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

ANEXO E: ESTADÍSTICOS PRINCIPALES PARA VALIDACIÓN

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

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

$$SESGO_{yx} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - X_k) \quad (25)$$

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

$$r_{yx} = \frac{COV_{yx}}{s_y s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})(X_k - \bar{X})}{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}) \sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (26)$$

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

Cociente entre las desviaciones estándar: Este índice nos permite resolver si el modelo está sobre-estimando o sub-estimando la amplitud de los datos. Consiste en el cociente entre la desviación estándar de los datos modelados y la desviación estándar de los

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

$$COCIENTE_{s_x s_y} = \frac{s_y}{s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})}{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (27)$$

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

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^N |Y_k - X_k|}{N} \quad (28)$$

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

$$RMSE = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(Y_k - X_k)^2}{N}} \quad (29)$$

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiken, C. M. (2008). Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).
- Albretsen, J. (2011). NorKyst-800 report no. 1: User manual and technical descriptions. *Fisken og havet*.
- Antonov, J. I., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, A. V. Mishonov, and H. E. Garcia, 2006. World Ocean Atlas 2005, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 62, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.
- 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.
- Atlas, R. (1997). Atmospheric Observations and Experiments to Assess Their Usefulness in Data Assimilation (Gtspecial Issue) Data Assimilation in Meteorology and Oceanography: Theory and Practice). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 75(1B), 111-130.
- Aumont, O., & Bopp, L. (2006). Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(2).
- Aumont, O., Éthé, C., Tagliabue, A., Bopp, L., & Gehlen, M. (2015). PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(2).
- 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.
- 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.
- Chassignet, E. P., & Verron, J. (1998). Ocean Modeling and Parameterization, vol. 516 of Mathematical and Physical Sciences.
- Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., and Ådlandsvik, B.: OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling, *Geosci. Model Dev.*, 11, 1405-1420, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>, 2018.

- Da Silva, A. M., Young, C. C., & Levitus, S. (1994). Atlas of surface marine data 1994, Vol. 4: Anomalies of fresh water fluxes. *NOAA Atlas, NESDIS, 9*.
- 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.
- Frolov, S., Baptista, A. M., Leen, T. K., Lu, Z., & van der Merwe, R. (2009). Fast data assimilation using a nonlinear Kalman filter and a model surrogate: An application to the Columbia River estuary. *Dynamics of Atmospheres and Oceans, 48*(1-3), 16-45.
- Glibert, P.M., Allen, J.I., Bouwman, L., Brown, C., Flynn, K.J., Lewitus, A. & Madden, C.J. 2010. Modeling of HABs and eutrophication: status, advances, challenges *J. Mar. Syst.*, 83, pp.262- 275.
- Glasgow, H. B., Burkholder, J. M., Reed, R. E., Lewitus, A. J., & Kleinman, J. E. (2004). Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 300*(1-2), 409-448.
- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions, 1*(1), 57-70.
- Laprise, R. (1992). The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review, 120*(1), 197-207.
- Lembeye, G., Marcos, N., Sfeir, A., Molinet, C., Jara, F., Clément, A., & Rojas, X. (1998). Seguimiento de la toxicidad en recursos pesqueros de importancia comercial en la X y XI región. *Informe Final Proyecto FIP, 97*, 49-86.
- Letelier, J., Soto-Mardones, L., Salinas, S., Osuna, P., López, D., Sepúlveda, H. H., ... & Rodrigo, C. (2011). Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región norte de los fiordos Patagónicos de Chile. *Revista de biología marina y oceanografía, 46*(3), 363-377.
- Liu, W. T., Tang, W., & Polito, P. S. (1998). NASA scatterometer provides global ocean surface wind fields with more structures than numerical weather prediction. *Geophysical Research Letters, 25*(6), 761-764.

- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, and H. E. Garcia, 2006. World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.
- Mardones, F. O., Perez, A. M., & Carpenter, T. E. (2009). Epidemiologic investigation of the re-emergence of infectious salmon anemia virus in Chile. *Diseases of aquatic organisms*, 84(2), 105-114.
- Mardones, J., Clément, A., Rojas, X., & Aparicio, C. (2010). Alexandrium catenella during 2009 in Chilean waters, and recent expansion to coastal ocean. *Harmful Algae News*, 41, 8-9.
- 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.
- Moore, A. M., Arango, H. G., Di Lorenzo, E., Cornuelle, B. D., Miller, A. J., & Neilson, D. J. (2004). A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model. *Ocean Modelling*, 7(1-2), 227-258.
- 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.
- Oke, P. R., Allen, J. S., Miller, R. N., Egbert, G. D., & Kosro, P. M. (2002). Assimilation of surface velocity data into a primitive equation coastal ocean model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C9), 5-1.
- Olivares, G., Sepulveda, H. H., & Yannicelli, B. (2015). Definition of sanitary boundaries to prevent ISA virus spread between salmon farms in Southern Chile based on numerical simulations of currents. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 158, 31-39.
- Paduan, J. D., & Shulman, I. (2004). HF radar data assimilation in the Monterey Bay area. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C7).
- Pettinger, L. R. (1971). Field data collection: An essential element in remote sensing applications.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., & McWilliams, J. C. (2006). Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system. *Ocean Modelling*, 12(1-2), 157-187.
- Pérez- Santos, I., Mayorga N., Silva N., Castillo M., Montero P., Schneider W., Pizarro O., Ramírez N., Igor G., Daneri G., Valle-Levinson A., Navarro E. & Mesa A. 2017. Determinación de la presencia natural de aguas con bajo contenido de oxígeno disuelto, en zonas utilizadas para el cultivo de salmones. Zona

Nortpatagonica Chilena. Proyecto del fondo de investigación pesquera y de acuicultura.

- Pielke, R. A., & Pielke, R. A. (1984). *Mesoscale meteorological modelling*. Academic press.
- Pinardi, N., & Coppini, G. (2010). Preface" Operational oceanography in the Mediterranean Sea: the second stage of development". *Ocean Science*, 6(1), 263-267.
- Rabalais, N.N., Turner, R. E., Díaz, R. J. & Justic, D. 2009. Global change and eutrophication of coastal waters, *ICES Journal of Marine Science*, Volume 66, Issue 7, pp.1528–1537.
- Ravichandran, M. (2011). In-Situ Ocean Observing System. In *Operational oceanography in the 21st century* (pp. 55-90). Springer, Dordrecht.
- Roa, V. (2015). Aprendizaje y cambio en políticas a partir de crisis en industrias basadas en recursos naturales: caso de la crisis sanitaria del ISA en la industria del salmón en Chile. In *6to Encuentro Anual Sociedad Chilena de Políticas Públicas*. Facultad de Gobierno Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile.
- Rodrigo, C. (2006). Topografía submarina en canales de la Patagonia norte. *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a Cabo de Hornos*, 19-23.
- Schiller, A., & Brassington, G. B. (Eds.). (2011). *Operational oceanography in the 21st century*. Springer Science & Business Media.
- Schneider, W., Pérez-Santos, I., Ross, L., Bravo, L., Seguel, R., & Hernández, F. (2014). On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia. *Progress in oceanography*, 129, 8-18.
- Sepúlveda, H.H, Marchesiello, P., Zhijin, L. "Oceanic data assimilation study in northern Chile: use of a 3DVAR method." *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41(3), 570-575, 2013.
- 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. & 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. & Vargas, C. A. 2014. Hypoxia in Chilean Patagonian fjords, *Prog. Oceanogr.*, 129, 62–74, 2014.

- Silva, N., Calvete, C. & Sievers, H. 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR-Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21: 17-48.
- 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.
- Stauffer, D. R., & Seaman, N. L. (1990). Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Monthly Weather Review*, 118(6), 1250-1277.
- Teillet, P. M., Gauthier, R. P., Chichagov, A., & Fedosejevs, G. (2002). Towards integrated Earth sensing: Advanced technologies for in situ sensing in the context of Earth observation. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(6), 713-718.
- Trenberth, K. E. (2008). Necesidades de observación para la predicción y adaptación climáticas. *Boletín de la OMM*, 57(1), 17-21.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79-82.
- Zhang, S., Harrison, M. J., Rosati, A., & Wittenberg, A. (2007). System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic climate studies. *Monthly Weather Review*, 135(10), 3541-3564.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

Sección Ediciones y Producción

Almte. Manuel Blanco Encalada 839

Fono 56-32-2151500

Valparaíso, Chile

www.ifop.cl



www.ifop.cl