



Informe Final

Convenio de Desempeño 2019
Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de circulación
marina, VI Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Octubre 2020



Informe Final

Convenio de Desempeño 2019.

Desarrollo de sistema de predicción
sinóptico de circulación marina, VI Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Octubre 2020

REQUERENTE SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

Subsecretaría de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Esteban Carrasco Zambrano

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
Valentina Besoain
Elías Pinilla Matamala
Cristian Ruiz Soto
Milton Salas Salas
Pedro Valdebenito
Oliver Venegas Mella

ÍNDICE GENERAL

Resumen ejecutivo.....	9
1. Antecedentes.....	11
1.1 Contexto.....	11
1.2 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA.....	12
2. Objetivos.....	16
2.1 Objetivo General.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3. Metodología.....	17
3.1 Metodología objetivo específico 1: Calibrar el sistema operacional oceanográfico para las regiones de Los Lagos y de Aysén.....	19
3.1.1 Calibración de diferentes distribuciones de niveles verticales en MOSA-ROMS.....	19
3.1.2 Evaluación de diferentes esquemas de turbulencia vertical y de advección lateral.....	21
3.1.3 Mejoramiento y evaluación de MOSA-WRF.....	21
3.1.4 Ingreso y evaluación de nuevos aportes de agua dulce.....	25
3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas históricas.....	27
3.3 Metodología objetivo específico 3: Incorporar al modelo lagrangiano de partículas (Parti-MOSA) interacción y respuestas a propiedades físicas.....	31
3.4 Metodología objetivo específico 4: Diagnosticar y diseñar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.....	34
3.5 Metodología objetivo específico 5: Diagnosticar y diseñar un modelo biogeoquímico (BGQ) climatológico en el mar interior de Chiloé.....	36
3.5.1 Modelo NPZD.....	37
3.5.2 Modelo PISCES.....	40
3.6 Metodología objetivo específico 6: Mejorar visualización de resultados en plataforma web CHONOS.....	41
4. Gestión del proyecto.....	44
4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA.....	44
4.2 Reuniones académicas.....	44
4.3 Talleres de difusión.....	48
4.4 Compra y mantenimiento de equipo.....	49
4.5 Publicaciones científicas.....	49
4.6 Carta Gantt del proyecto.....	49
5. Resultados.....	51
5.1 Resultados objetivo específico 1: Calibrar el sistema operacional oceanográfico para las regiones de Los Lagos y de Aysén.....	51
5.1.1 Calibración de diferentes distribuciones de niveles verticales en MOSA-ROMS.....	51
5.1.2 Evaluación de diferentes esquemas de turbulencia vertical y de advección lateral.....	56
5.1.3 Mejoramiento y evaluación de MOSA-WRF.....	60

5.1.4 Ingreso y evaluación de nuevos aportes de agua dulce.....	67
5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas históricas.....	69
5.3 Resultados objetivo específico 3: Incorporar al modelo lagrangiano de partículas (Parti-MOSA) interacción y respuestas a propiedades físicas.....	81
5.4 Resultados objetivo específico 4: Diagnosticar y diseñar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.....	83
5.4.1 Construcción de Dominio y Mascara.....	83
5.4.2 Pruebas de estabilidad.....	85
5.4.3 Pruebas con forzantes sinópticos.....	90
5.5 Resultados objetivo específico 5: Diagnosticar y diseñar un modelo biogeoquímico (BGQ) climatológico en el mar interior de Chiloé.....	97
5.5.1 Modelo NPZD.....	97
5.5.2 Modelo PISCES.....	103
5.6 Resultados objetivo específico 6: Mejorar visualización de resultados en plataforma web CHONOS.....	108
6. Discusión.....	111
6.1 Modelo operacional MOSA-ROMS.....	111
6.2 Modelo operacional MOSA-WRF.....	113
6.3 Modelo biogeoquímico.....	115
6.4 Modelo regional para la región de Magallanes.....	116
7. Conclusiones.....	119
Anexo A: Ecuaciones modelo hidrodinámico ROMS AGRIF.....	121
Anexo B: Modelo operacional MOSA-WRF.....	123
Anexo C: Estadísticos principales para validación.....	128
Anexo D: Recursos computacionales.....	130
Referencias bibliográficas.....	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo del modelo operacional Sur-Austral, MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.....	13
Figura 2: Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional de las tres etapas de la fase uno (2014 – 2017).....	14
Figura 3: Batimetría del modelo operacional MOSA-ROMS interpolada desde datos GEBCO y cartas náuticas digitales del SHOA.....	17
Figura 4: Esquema de funcionamiento diario del modelo operacional atmosférico MOSA-WRF.....	22
Figura 5: Dominios configurados del 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.....	23
Figura 6: Ubicación de las fuentes de información observacional utilizadas para la validación del modelo operacional. a) Campañas CTD mar interior 2017, b) Campañas CTD región de Aysén 2018, c) Campañas CTD 2019-2020, estaciones meteorológicas, correntómetros anclados (ADCP) y Boya oceanográfica operada por Centro i~mar de la Universidad de los Lagos.....	28
Figura 7: Tiempo de desarrollo previsto en días de estadios larvarios a infección utilizando la temperatura promedio del agua en (°C) y un modo logarítmico. Tabla 5 de Gónzalez y Carvajal, 2003.....	32
Figura 8: Esquema del modelo NPDZ.....	37
Figura 9: Ubicaciones de las transectas de datos WOA18 a lo largo de la longitud 79.5 °W (puntos azules) y latitud 43.5 °S (puntos rojos).....	38
Figura 10: Ubicación de los datos utilizados para el diagrama temperatura y oxígeno.....	39
Figura 11: Arquitectura del modelo PISCES extraído de Aumont y Bopp (2006). Este esquema muestra el modelo ecosistémico omitiendo el oxígeno y el sistema de carbonato.....	40
Figura 12: Diagrama de funcionamiento de la aplicación Nginx.....	42
Figura 13: Batimetría del Golfo de Corcovado, Golfo de Ancud y Seno Reloncaví y Fiordo Comau para la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda) y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).....	52
Figura 14: Batimetría de la zona de Aysén para la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda), y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).....	53
Figura 15: Series de tiempo del nivel del mar observadas y modeladas con las grillas de prueba MOSAv4a y MOSAv4b y la grilla actual MOSAv3.....	54
Figura 16: Transecta longitudinal de la distribución de los niveles verticales actuales en MOSA-ROMS entre Petrohué (cabeza fiordo Reloncaví) y canal Apiao.....	55
Figura 17: Transecta longitudinal de la distribución de los niveles verticales de la grilla de prueba para MOSA-ROMS entre Petrohué (cabeza fiordo Reloncaví) y canal Apiao.....	55
Figura 18: Salinidad superficial residual para los diferentes esquemas de advección lateral en períodos de sicigia y cuadratura.....	56
Figura 19: Boxplot de salinidad superficial entre los quintiles al 25 % y 75 %. (panel superior) Cuadratura, (panel inferior) Sicigia.....	57

Figura 20: Perfiles verticales y series de tiempo de número de Richardson durante siccigia y cuadratura. (a y b) Esquema KPP, (c y d) Esquema BVF, y (e y f) Esquema KKL.....	59
Figura 21: Rendimiento del sistema MOSA-WRF3km para el periodo 28/01/18 – 15/01/20.	60
Figura 22: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF y MOSA-WRF3km en Cucao durante el periodo 28/01/19 – 15/01/20.....	61
Figura 23: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF y MOSA-WRF3km, en Hunay durante el periodo 28/01/19 – 15/01/20.....	62
Figura 24: Presión atmosférica para la estación de Cucao entre 28/01/19 – 15/01/20. En azul se muestran datos observados, en rojo MOSA-WRF y amarillo MOSA-WRF3km.....	62
Figura 25: Rendimiento del sistema MOSA-WR_CFS para el periodo 10/02/20 – 07/04/20.	63
Figura 26: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF y MOSA-WRF_CFS en Cucao y Hunay durante el periodo 10/02/20 – 07/04/20.....	64
Figura 27: Condiciones iniciales utilizadas en el experimento de asimilación de datos. Panel superior izquierda U original, derecha U “perturbada”. Panel inferior, izquierda V original y derecha V “perturbada”.....	65
Figura 28: Series de tiempo para 3 puntos de control de la diferencia entre MOSA-WRF original y MOSA-WRF “perturbado”. En azul punto extraído en el mar interior de Chiloé, en rojo punto sobre la isla de Chiloé y amarillo punto sobre mar abierto. Panel superior muestra el pronóstico para variable U y panel inferior para variable V.....	66
Figura 29: Campo del promedio de las diferencias entre los pronósticos del 20 de julio de 2020 sin y con asimilación de datos para las 06, 12, 18 y 24 horas. Panel superior Variable U. Panel inferior variables V.....	67
Figura 30: Serie de tiempo de los caudales promedio de los 33 ríos para el modelo MOSA-ROMS (negro) y para el modelo VIC (rojo).....	68
Figura 31: Caudal total de los 33 ríos para el modelo MOSA-ROMS (azul) y para el modelo VIC (naranja).....	69
Figura 32: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA-ROMS y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y julio 2020.....	70
Figura 33: a) Correlación (r), b) Raíz del error cuadrático medio (rmse) y c) Sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MOSA-ROMS y VIIRS durante enero 2017 y mayo 2020.....	71
Figura 34: a) Error medio absoluto, y b) cociente de las desviaciones estándar entre el producto mensual SMAP y promedios mensuales de SSM MOSA-ROMS durante enero 2017 y junio 2020.....	72
Figura 35: Regresión entre promedios estacionales de SSM de MOSA-ROMS y SMAP. Los puntos no incluyen la zona interior del mar Chiloé-Aysén.....	73
Figura 36: (paneles superiores) Diagramas T/S elaborados a partir de lances de CTD de campañas oceanográficas de IFOP en Chiloé y Aysén durante 2017-2020. (paneles inferiores) 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 indica la profundidad.....	74
Figura 37: Frecuencias de magnitud en porcentaje de salinidad (paneles superiores) y temperatura (paneles inferiores), para las mediciones de lances CTD de las campañas IFOP 2017-2020 y MOSA-ROMS en el mismo periodo y locaciones.....	75

Figura 38: Series de tiempo de temperatura (panel superior) y salinidad (panel inferior) medidas por la boyas i~mar y su punto más cercano dentro del dominio MOSA-ROMS, entre Septiembre 2019 y Julio 2020. La discontinuidades en la serie (rojo) representan periodos sin información en la boyas.....	76
Figura 39: (a) y (b) Diagramas de dispersión de las componentes ortogonales y espectros de energía de la corriente para los ADCP y MOSA-ROMS en canal Moraleda. (c) y (d) Igual que (a) y (b) pero para la Boca del Guafo.....	77
Figura 40: Rendimiento del sistema MOSA-WRF de 5 km durante el 20/07/18 y 11/08/20.	78
Figura 41: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Apiao. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.....	79
Figura 42: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Cucao. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.....	79
Figura 43: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Huinay. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.....	80
Figura 44: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Merimeli. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.....	80
Figura 45: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Melinka. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.....	81
Figura 46: Visualización de la herramienta de dispersión de partículas Parti-MOSA en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos).....	81
Figura 47: Ejemplo de visualización de una dispersión de partículas usando Parti-MOSA.	82
Figura 48: Dominio y batimetría utilizada para construir el modelo MOSAM01. Esta grilla resultó ser estable en simulaciones de un mes de duración.....	83
Figura 49: Batimetría empleada en los mares interiores de la región. Izquierda Senos Skyring y Ottway y, en la derecha , Golfo Almirante Montt.....	84
Figura 50: Simulaciones de prueba realizadas con un paso de tiempo de 20 s antes de llegar a una versión estable del modelo.....	86
Figura 51: Puntos del dominio donde se registraron errores numéricos.....	87
Figura 52: Izquierda, ubicación de los mareógrafos y lances de CTD (verano) utilizados en la evaluación de la simulación de un mes forzada con datos climatológicos.....	89
Figura 53: Series de tiempo del nivel de mar observadas y modeladas con una frecuencia de muestreo cada 6 horas.....	90
Figura 54: Condiciones iniciales de temperatura superficial (izquierda) y salinidad superficial (derecha) obtenidas del modelo global Mercator-Ocean para el 03/07/2020.....	91
Figura 55: Campo superficial inicial del viento del modelo WRF utilizado para forzar MOSAM01.....	91
Figura 56: Diferencias entre campos superficiales de TSM de MOSAM01 (arriba) MODIS, y (abajo) OISST-AVHRR.....	92
Figura 57: Campos superficiales de temperatura (izquierda) y salinidad (derecha) del pronóstico realizado para el 03/07/2020. Se presentan los resultados a 24, 48 y 72 horas....	93
Figura 58: Campo de corrientes barotrópicas promedios a 24, 48 y 72 horas del pronóstico realizado para el 03/07/2020.....	94
Figura 59: Sección transversal de temperatura (arriba) y salinidad(abajo) extraída del promedio del pronostico de MOSAM01 a lo largo del estrecho de Magallanes.....	95

Figura 60: Mapa de las cuencas con información modelada de caudales horarios para ser utilizados en el dominio MOSAM01.....	96
Figura 61: Distribución estacional de oxígeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la longitud 73.5 °O.....	97
Figura 62: Distribución estacional de nitrógeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la longitud 73.5 °O.....	98
Figura 63: Distribución estacional de oxígeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la latitud 43.5 °S.....	99
Figura 64: Distribución estacional de nitrógeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la latitud 43.5 °S.....	100
Figura 65: Diagrama de temperatura-salinidad asociado a oxígeno disuelto (mL L-1) para los datos ubicados en boca del Guafo. Las líneas punteadas de color gris se corresponden a las isopicas y en línea negra los porcentajes de contribución de las masas de agua.....	100
Figura 66: Diagrama de temperatura-salinidad asociado a nitrato disuelto (μM) para los datos ubicados en boca del Guafo. Las líneas punteadas de color gris se corresponden a las isopicas y en línea negra los porcentajes de contribución de las masas de agua.....	101
Figura 67: Distribución temporal de oxígeno disuelto observada y simulada en el anclaje ubicado en la boca del Guafo.....	102
Figura 68: Nitrato en cruceros CIMAR (promedio julio-agosto) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros.....	103
Figura 69: Oxígeno en cruceros CIMAR (promedio julio-agosto) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros.....	104
Figura 70: Nitrato en cruceros CIMAR (promedio octubre-noviembre) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros.....	105
Figura 71: Oxígeno en cruceros CIMAR (promedio octubre-noviembre) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros....	106
Figura 72: Climatología de oxígeno disuelto (ml/L) en la boca del Guafo versus oxígeno disuelto modelado con PISCES durante los años 1, 2 y 3 de simulación a 70 y 105 metros de profundidad.....	108
Figura 73: Pagina de inicio del portal web del sistema de información oceanográfica, CHONOS (www.ifop.cl/chonos).....	109
Figura 74: Ejemplo de visualización de los resultados de MOSA-ROMS y MOSA-WRF en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos).....	110
Figura 75: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno. Fuente Skamarock et al. (2005).....	124
Figura 76: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).....	126
Figura 77: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.....	127

Índice de tablas

Tabla 1: Características del sistema de modelación hidrológico.....	26
Tabla 2: Resumen de las fuentes de información utilizadas para la validación del modelo operacional MOSA-ROMS.....	29
Tabla 3: Valores de salinidad y temperatura utilizados para las masas de agua.....	39
Tabla 4: Parámetros de suavizado empleado en las nuevas grillas de MOSA.....	52
Tabla 5: Indices estadísticos calculados en Castro para simulaciones con distintos esquemas de turbulencia vertical.....	58
Tabla 6: Parámetros de la grilla de MOSA-ROMS01.....	85
Tabla 7: Resumen de los tiempos de computo para las pruebas de sensibilidad de estabilidad, así como la paralización utilizada.....	88
Tabla 8: Valores de correlación (R) y error cuadrático medio (RMSS) entre los mareógrafos y las salidas del modelo.....	89
Tabla 9: Especificaciones técnicas servidor para MOSA-ROMS ubicado en Data Center Viña del Mar.....	130
Tabla 10: Especificaciones técnicas servidor web para CHONOS ubicado en Data Center Viña del Mar.....	131

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 5 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. Las salidas del modelo MOSA-ROMS fueron implementadas como condiciones de borde para el modelo de dispersión de partículas PartiMOSA. El modelo operacional MOSA-WRF también fue evaluado. A su vez, implementamos y evaluamos dos modelos biogeoquímicos: NPZD y PISCES. Finalmente, se implementó un modelo físico de alta resolución (~1.5 km) para la región de Magallanes.

El principal cambio realizado en MOSA-ROMS fue migrar desde el modelo oceanográfico ROMS a su nueva versión que lleva por nombre CROCO. De este modo, el modelo se mantiene con soporte de la comunidad científica, y a su vez nos permite probar los nuevos desarrollos numéricos, como por ejemplo el modulo de modelo no hidrostático. Este cambio se hizo efectivo en octubre del 2019, no presentando fallas al día de hoy. Junto a este cambio se realizó una nueva batimetría en el dominio y se actualizaron valores de algunos caudales de ríos en la región.

Un hito importante fue la implementación y evaluación de dos modelos biogeoquímicos acoplado con el modelo hidrodinámico CROCO. El primero fue un modelo simple NPZD y el segundo fue un modelo un poco más complejo, PISCES. Ambos modelos fueron simulados con las mismas condiciones de borde, forzantes atmosféricos y aportes de agua dulce. Ambos modelos biogeoquímicos模拟aron de manera cualitativa la distribución espacial y estacional de la concentración de oxígeno disuelto, pudiendo replicar la estructura de mínima de oxígeno disuelto observada. 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.

Otro hito importante fue la implementación y evaluación un modelo físico de alta resolución (~1.5 km) en la región de Magallanes. Si bien este modelo aún requiere ajustes importantes, especialmente en el campo de masa, ha respondido de manera satisfactoria a las pruebas de estabilidad, manteniendo una batimetría que mantiene los rasgos relevantes de la zona. También se ha podido realizar un pronóstico de prueba, probando que podría ser factible su implementación a futuro.

Finalmente, se realizaron mejoras sustanciales a la presentación, navegación y visualización de resultados en el portal web CHONOS (www.ifop.cl/chonos). Ahora se encuentran disponibles para consultar en línea tanto el pronóstico oceanográfico MOSA-ROMS, como el pronóstico atmosférico MOSA-WRF. Por último, la herramienta de dispersión de partículas PartiMOSA fue migrada al mismo servidor donde está alojada la pagina web y a su vez, se cambió el motor de mapas de GoogleMaps por OpenStreetMap.

1. ANTECEDENTES

1.1 Contexto

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

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

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

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

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

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

En el año 2014 comienza el proyecto “Desarrollo de un sistema de predicción sinóptico de circulación marina para el apoyo de la acuicultura”, dando inicio a 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. 1) 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).

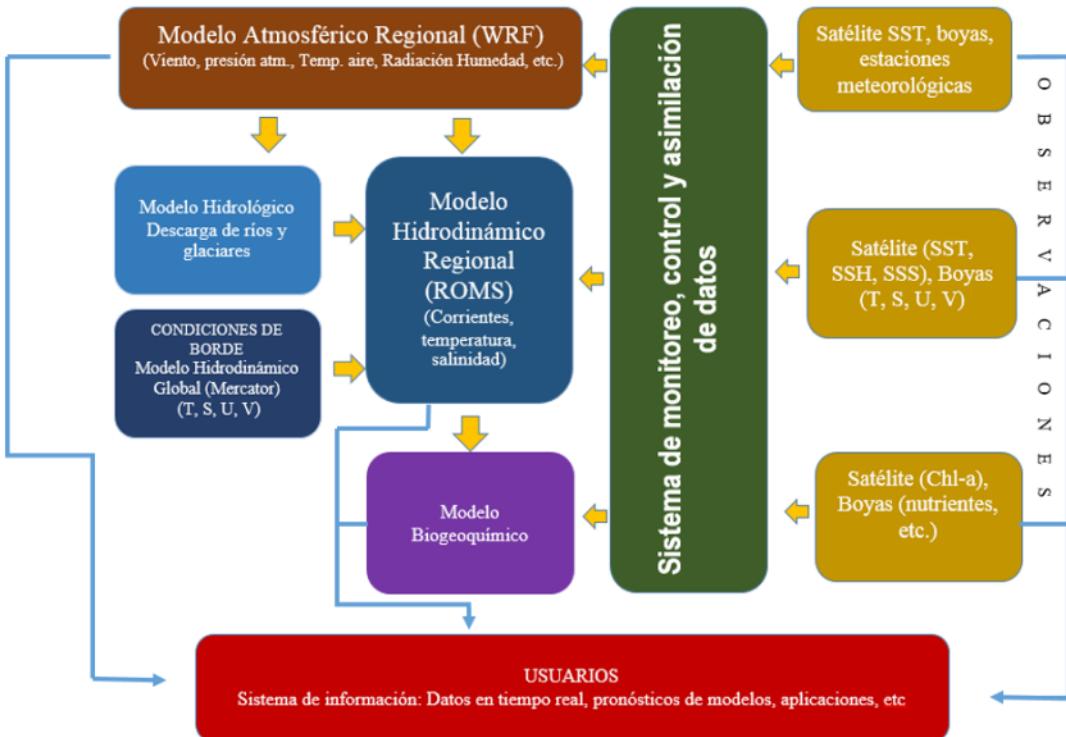


Figura 1: *Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo del modelo operacional Sur-Austral, MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.*

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 2 podemos ver el desarrollo de las etapas previas. En específico, este proyecto forma parte de la sexta etapa de desarrollo.

- **Etapa I: 2014 – 2015:** En líneas generales, la primera etapa de este proyecto incluyó el diseño del sistema, además de la implementación del modelo hidrodinámico ROMS-AGRIF, denominado para los fines del proyecto como MOSA-ROMS (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/chronos). 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.

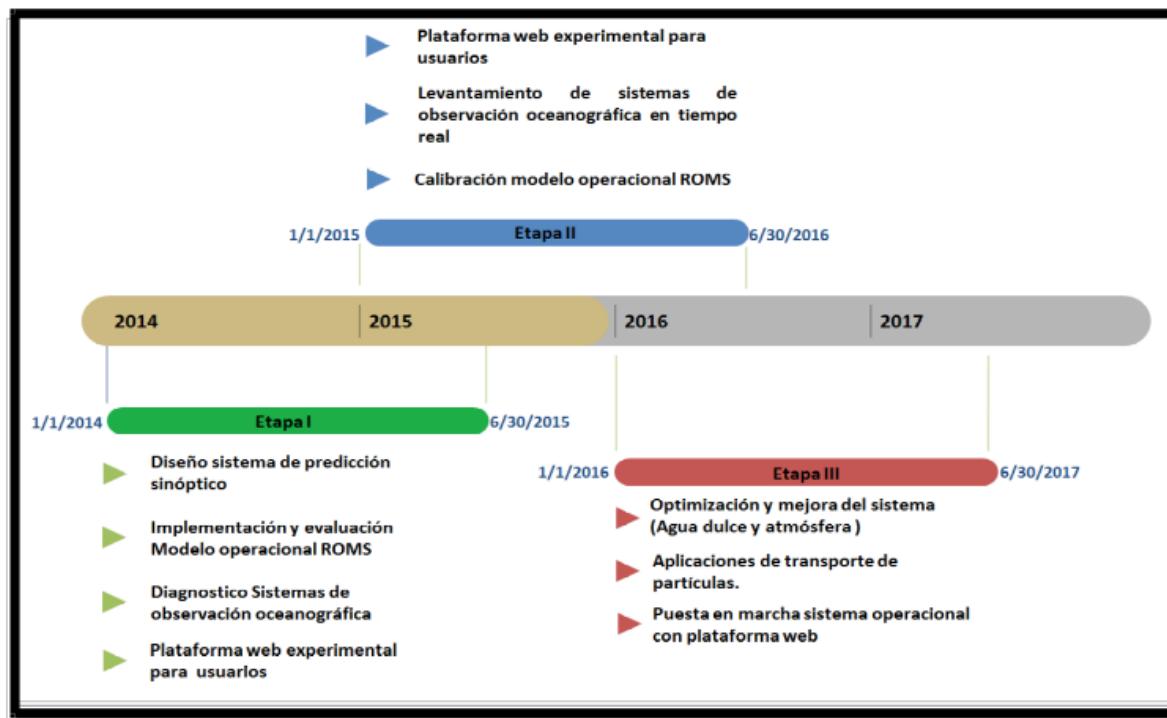


Figura 2: Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional de las tres etapas de la fase uno (2014 – 2017).

- **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 agregaron mejoras al modelo oceanográfico operacional MOSA-ROMS, se comenzó la implementación de un modelo atmosférico

predictivo exclusivo para el modelo (MOSA-WRF), y se trabajó en la robustez del sistema de plataforma web “CHONOS” (www.ifop.cl/chonos).

- **Etapa V: 2018 – 2019:** En esta etapa se agregaron nuevas fuentes de agua dulce y se modificó la batimetría en ciertos lugares del modelo MOSA-ROMS. Además, se realizó un diagnóstico de un modelo biogeoquímico.
- **Etapa VI: 2019 – 2020:** Esta VI etapa busca el mejoramiento de MOSA-ROMS enfocados en la calibración y evaluación del sistema operacional, el cual está diseñado para servir de información ambiental relevante en emergencias y/o contingencias en la zona sur de Chile, tales como diseminación de patógenos, transportes de microalgas, derrame de hidrocarburos, anomalías térmicas, etc. Para esto se incorporarán nuevas fuentes de agua dulce, y evaluar la sensibilidad de las coordenadas verticales sigma. Además se incorporará un producto atmosférico de mayor resolución (3 km). Por otra parte, se realizará un estudio de sensibilidad enfocado en el efecto de los esquemas de turbulencia vertical en la mezcla y circulación estuarina al interior del mar interior de Chiloé. Durante esta etapa se desarrollará la descripción de partículas con respuesta a propiedades físicas y biológicas para perfeccionar el modelo lagrangiano de partículas (Parti-MOSA), además de evaluar distintos tipos de modelos biogeoquímicos para diagnosticar su posible puesta en marcha de manera operacional, y evaluar la extensión del dominio hacia la región de Magallanes. Los detalles de estos objetivos se encuentran en la siguiente sección.

Mayores detalles de las etapas previas pueden ser consultadas en los informes técnicos del proyecto. Estos informes pueden ser descargados desde la página web del IFOP (www.ifop.cl).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

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

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Calibrar el sistema operacional oceanográfico para las regiones de Los Lagos y de Aysén.

2.2.2 Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas históricas.

2.2.3 Incorporar al modelo lagrangiano de partículas (Parti-MOSA) interacción y respuestas a propiedades físicas.

2.2.4 Diagnosticar y diseñar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.

2.2.5 Diagnosticar y diseñar un modelo biogeoquímico (BGQ) climatológico en el mar interior de Chiloé.

2.2.6 Mejorar visualización de resultados en plataforma web CHONOS.

3. METODOLOGÍA

MOSA-ROMS está basado en el modelo oceanográfico regional “Regional Ocean Modelling System, Adaptative Grid Refinement in Fortran” (ROMS AGRIF, Debreu et al., 2012). Esta versión es desarrollada por el Institut de Recherche pour le Développment (IRD) en Francia. ROMS AGRIF es un modelo de circulación oceánica hidrostático que resuelve las ecuaciones primitivas de conservación de momento, energía y masa sobre una grilla rectangular estructurada (Anexo A). MOSA-ROMS utiliza una malla horizontal estructurada tipo Arakawa-C (Arakawa & Lamb, 1981). La mayor ventaja de este tipo de mallas es que permite una mayor estabilidad numérica para la discretización 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 distribución tipo sigma.

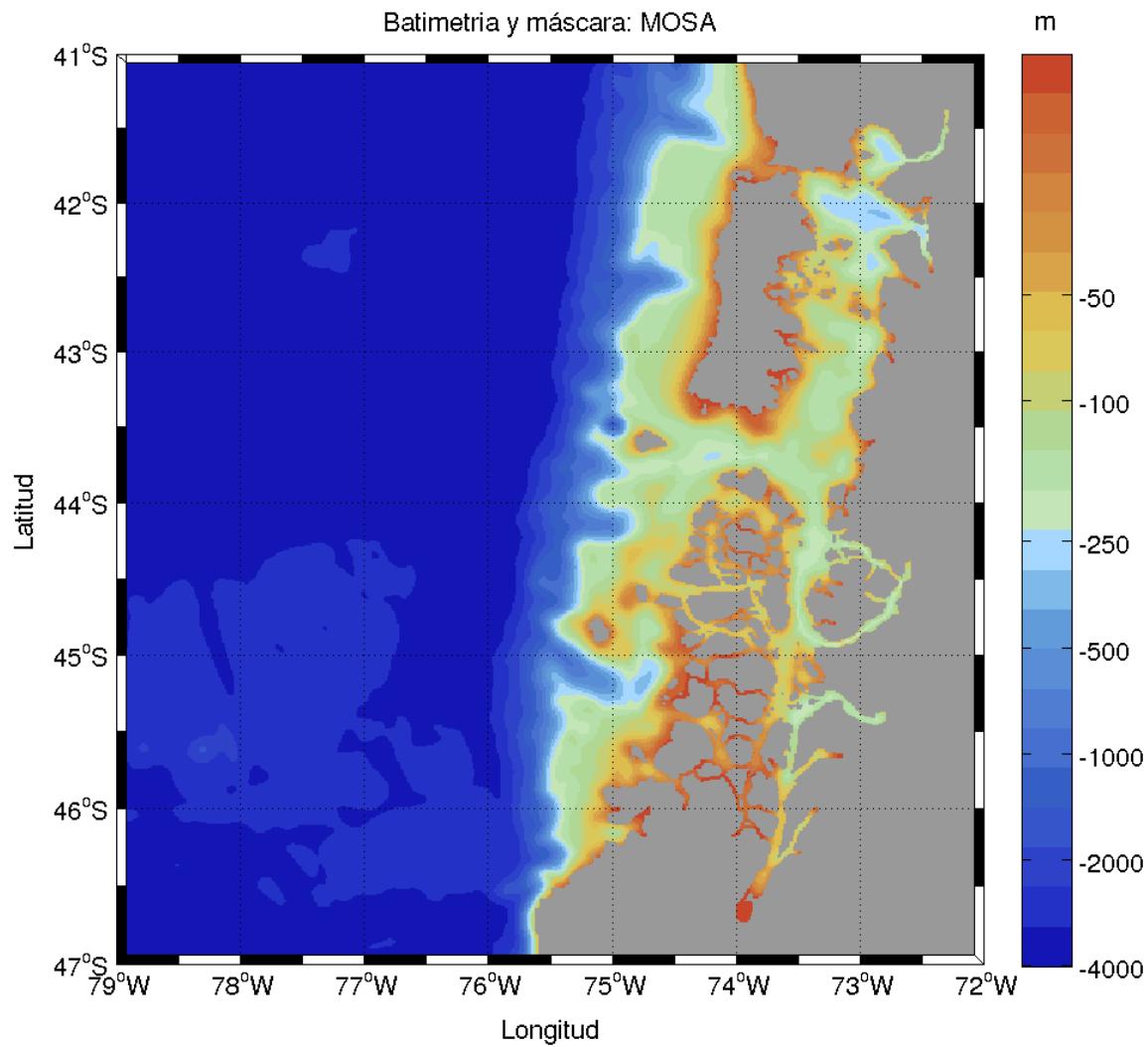


Figura 3: Batimetría del modelo operacional MOSA-ROMS interpolada desde datos GEBCO y cartas náuticas digitales del SHOA

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. 3). 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.

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 y 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. 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 relacionadas con el viento y los flujos de calor. Los campos de las variables atmosféricas son obtenidos del pronóstico operacional atmosféricos MOSA-WRF de 5 km de resolución espacial, el cual está basado en el modelo Weather Research Forecast (WRF, Skamarock et al., 2005).

El modelo WRF tiene un módulo no hidrostático que permite el libre movimiento de las parcelas de aire en la columna de aire. También tiene un sistema de coordenadas eulerianas, en donde el observador se encuentra fijo con respecto al movimiento del fluido.

WRF, 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 B.

Otro forzante en el modelo es el ingreso de fuentes de agua dulce, las cuales modifican la estructura de la picnoclina 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).

3.1 Metodología objetivo específico 1: Calibrar el sistema operacional oceanográfico para las regiones de Los Lagos y de Aysén.

La calibración del sistema operacional oceanográfico está orientada a la disminución de los errores sistemáticos del modelo operacional MOSA-ROMS. Se realizan experimentos específicos no operacionales que buscan determinar configuraciones y parametrizaciones adecuadas y/o óptimas para resolver la dinámica oceanográfica del mar interior de la región de los Lagos y Aysén.

3.1.1 Calibración de diferentes distribuciones de niveles verticales en MOSA-ROMS.

La construcción de grillas es una tarea compleja cuando se incorporan batimetrías realistas, especialmente en zona de fiordos y canales, ya que estas generan irregularidades que en muchos casos resultan imposibles de resolver manteniendo los principios de conservación en grillas de elementos regulares. En general, las grillas deben respetar algunos parámetros de suavizado para evitar inestabilidades numéricas, lo que implica en algunos casos un fuerte suavizado de los rasgos batimétricos. Lo anterior resulta en un delicado equilibrio entre obtener una grilla estable y realista para la zona.

En esta etapa identificamos y modificamos zonas donde la batimetría juega un rol importante en la circulación, y que a su vez está pobemente representada, como ocurre en algunas bocas de fiordos, canales insulares e interiores de Aysén donde el modelo siempre tiende a ser más somero que lo real. Las fuentes de información para mejorar la batimetría fueron cartas náuticas del SHOA, las cuales hemos reprocesados. Para evaluar el efecto de estos cambios en batimetría y línea de costa estudiamos el comportamiento de la marea al interior del dominio de estudio. Se realizó una simulación de 3 días con cada grilla nueva, utilizando la misma configuración de caudales de ríos y mareas que usa actualmente MOSA-ROMS, mientras que la condición inicial de estas corridas fueron extraídas de

modelos globales. La versión actual de MOSA-ROMS ha presentando validaciones altamente satisfactorias del nivel del mar en estos puntos en evaluaciones anteriores, por lo que se considera un parámetro de comparación válido para identificar si las grillas nuevas introducen errores nuevos. Las estaciones de control son: Ancud, que se encuentra en el océano Pacífico, Puerto Montt y Castro, que se encuentran al interior de la parte norte del mar interior de Chiloé, Melinka se encuentra en la boca del Guafo y Puerto Chacabuco que se encuentra en la cabeza del fiordo Aysén (Fig. 3).

Por otra parte, MOSA-ROMS utiliza una batimetría generada a partir de datos GEBCO y de cartas náuticas del SHOA (Fig. 3) distribuidas sobre 42 niveles verticales sigma. Estas coordenadas verticales se definen en base a parámetros, cuyos valores indican el grado de separación en cada nivel. Dada las propiedades oceanográficas de la región de estudio, los niveles verticales deben tener una mejor resolución en superficie. Hay que notar que entre más niveles verticales mayor es el costo computacional. Los valores de estos parámetros de configuración en MOSA-ROMS actualmente son: theta_s = 7 (parámetro de control superficial), theta_b = 2 (parámetro de control de fondo) y Tcline = 200 (ancho de la capa superficie/fondo utilizado en el estiramiento de coordenadas).

La distribución de los niveles verticales se rige bajo la siguiente transformación de coordenadas verticales:

$$z(x, y, \sigma, t) = \zeta(x, y, t) + [\zeta(x, y, t) + h(x, y)] S(x, y, \sigma), \quad (1)$$

$$S(x, y, \sigma) = \frac{h_c \sigma + h(x, y) C(\sigma)}{h_c + h(x, y)} \quad (2)$$

donde $S(x, y, \sigma)$ es una transformación vertical no lineal funcional, $\zeta(x, y, t)$ es la superficie libre variable en el tiempo, $h(x, y)$ es el espesor de la columna de agua no perturbada, $z = -h(x, y)$ corresponde al fondo oceánico, σ es una coordenada de estiramiento vertical fraccional que va desde $-1 \leq \sigma \leq 0$, $C(\sigma)$ es una función de estiramiento vertical, monótona, no dimensional que va desde $-1 \leq C(\sigma) \leq 0$, y h_c es un espesor positivo que controla el estiramiento.

El objetivo de esta actividad fue evaluar el desempeño del modelo para reproducir la estructura vertical de la columna de agua, especialmente en la zona de fiordos y canales dentro del mar interior de Chiloé. Dada la extensión del dominio de MOSA-ROMS, nos centraremos en el dominio entre el fiordo Reloncaví y el canal Apiao, por ser un lugar con suficiente información de la columna de agua en diferentes estaciones, tanto en sicigia como en cuadratura. Esta zona la utilizamos como punto de control para realizar un estudio de sensibilidad asociado al efecto de la cantidad y distribución de los niveles verticales en

la estratificación de la columna de agua. Específicamente, modificamos la cantidad de niveles verticales y los parámetros que modifican la distribución de estos niveles (σ y h_c).

3.1.2 Evaluación de diferentes esquemas de turbulencia vertical y de advección lateral.

En esta actividad cuantificamos el impacto de diferentes parametrizaciones físicas de turbulencia vertical y de advección lateral en la estratificación y mezcla dentro del mar interior de Chiloé. En el caso de la turbulencia vertical, ROMS-AGRIF cuenta principalmente con 3 modelos de clausura de turbulencia: Un esquema simple de mezcla basado en la frecuencia de Brunt-Vaisala (BVF), un modelo de clausura turbulenta para las capas de borde interior y planetarias (LMD) y un esquema de clausura turbulenta genérico de 2 ecuaciones (K-KL). En el caso de la advección lateral, ROMS cuenta con las siguientes parametrizaciones: Un esquema de advección de tercer orden cortado y rotado (UP3), otro esquema de tercer orden experimental que reduce los térmicos de difusión/dispersión (UP5), un esquema esencialmente no oscilatorio (WENO5) y un esquema de variación de disminución total (TVD). La principal diferencia entre los esquemas de advección no oscilatorios y los de diferentes ordenes son las propiedades de difusión. Los esquemas ascendentes de primer orden son muy difusivos, mientras que los de mayor orden tienden a reducir la difusión numérica (Li, 2008).

Se realizaron simulaciones comparando las diferentes combinaciones de esquemas de turbulencia vertical y de advección lateral. La evaluación se realizó mediante el número de Richardson. Este número adimensional cuantifica la estratificación (N^2) debido al cizalle vertical (S^2), y se define como:

$$Ri = \frac{N^2}{S^2} \quad (1)$$

donde $Ri > 1$ implica que la mezcla es fuertemente reprimida por estratificación y $Ri < 0.25$ que la mezcla es poco afectada por la estratificación.

3.1.3 Mejoramiento y evaluación de MOSA-WRF

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.

SISTEMA DE PRONÓSTICOS ATMOSFÉRICOS MOSA-WRF

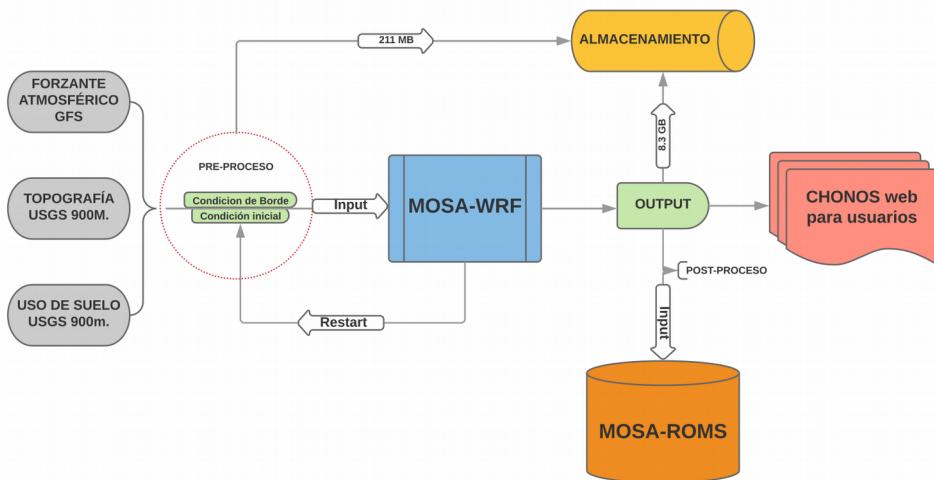


Figura 4: Esquema de funcionamiento diario del modelo operacional atmosférico MOSA-WRF.

Actualmente MOSA-WRF se encuentra implementado de manera operacional con una resolución espacial de 5 km y 28 niveles verticales que siguen la topografía. MOSA-WRF entrega información de las condiciones de borde atmosféricas al modelo operacional MOSA-ROMS y entrega un pronóstico atmosférico a 3 días. Este modelo usa como condiciones de borde datos del sistema de pronóstico global GFS (Fig. 4). En esta etapa se busca evaluar la factibilidad técnica en términos de tiempos de computo, almacenamiento, y estabilidad numérica en modelos de pronósticos atmosféricos de mayor resolución espacial.

Se han concentrado constantes esfuerzos en la búsqueda de avances para este sistema de modelación operacional. Uno de ellos, ha sido la puesta en marcha de un dominio de prueba de 3 km resolución espacial (Fig. 5). Con este cambio se pretende aumentar la definición de las variables atmosféricas y por consiguiente obtener un progreso tanto en la calidad del pronóstico atmosférico, como en la del hidrodinámico. En primer lugar se evaluará la factibilidad técnica de este nuevo dominio en términos de tiempos de computo, almacenamiento, y estabilidad numérica. Esto nos permitirá comparar estadísticamente los resultados de los dominios de 5 y 3 km de resolución.

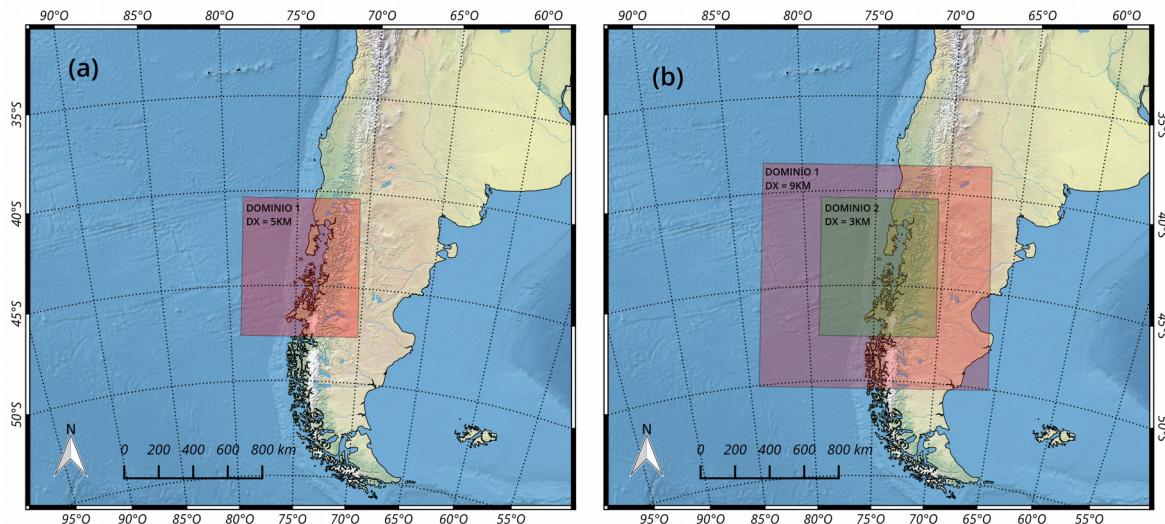


Figura 5: Dominios configurados del modelo MOSA-WRF para forzar MOSA-ROMS, a diferentes resoluciones espaciales: (a) 1 dominio de 5 km (b) 2 dominios de 9 km y 3 km.

MOSA-WRF de 3 km se procesa en la misma maquina en donde funciona el sistema operacional MOSA-WRF. Al terminar el pronostico de 5 km se comienza a procesar el nuevo dominio de prueba, utilizando como condición de borde el mismo forzante atmosférico GFS. La condición inicial es obtenida del archivo restart correspondiente al pronostico del día anterior. El pre y post-proceso de los resultados de este nuevo dominio se realizarán de manera análoga a MOSA-WRF.

Por otra parte, dado que el sistema de pronóstico MOSA-WRF debe entregar las condiciones de borde atmosféricas al modelo oceánico MOSA-ROMS (dirección y magnitud del viento, flujos de calor, y precipitación), se debe asegurar que funcione diariamente. Por este motivo, se evaluó la factibilidad de usar el producto de la “European Center for Medium-Range Weather Forecasts” (ECMWF) o uno similar, como una alternativa a la hora de cualquier inconveniente que se experimente con la descarga de GFS.

La búsqueda de una nueva base de datos a utilizar fue mediante la revisión de distintas páginas web de archivos, tales como: El “Research Data Archive” de la “University Corporation for Atmospheric Research” (<https://rda.ucar.edu>), el “European Centre for Medium-Range Weather Forecast” (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>), la “Met Office” del Reino Unido (<https://www.metoffice.gov.uk/services/data-provision>), además de foros propios del modelo WRF (<http://forum.wrfforum.com>) y la lista de correos abierta de la Corporación de Universidades para la investigación atmosférica “UCAR” (<http://mailman.ucar.edu/>).

Esta evaluación consistió en determinar la factibilidad técnica para la implementación de un forzante alternativo y luego comparar durante un período de tiempo a determinar los resultados de MOSA-WRF con condiciones de borde GFS y la posible alternativa. Estas simulaciones se contrastaron con información de estaciones meteorológicas mantenidas actualmente por el personal del IFOP a través de rosas de viento. Las estaciones que se utilizaran serán las ubicadas en Cucao y Huinay.

Finalmente, se pretendía realizar un diagnóstico del modelo de asimilación de datos de WRF (WRFDA), utilizando como primera aproximación información de radiación, ya sea satelital o de estaciones meteorológicas, dependiendo de la disponibilidad de esta información. Sin embargo, se presentaron varias dificultades que impidieron desarrollar este objetivo como estaba previsto. El primer percance experimentado se trató de un problema informático, puesto que para lograr compilar el código WRFDA, era necesario actualizar el compilador (gcc) con el cual se decodifican e instalan los archivos ejecutables de este nuevo módulo. Esta actualización no fue posible, debido a que se estaba trabajando en el mismo servidor donde funciona el sistema operativo MOSA, y su actualización podría implicar una caída del sistema.

Por otro lado y como parte de la gestión de este proyecto, estaba planificada para julio de este año una visita a la University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), en Boulder, Colorado, Estados Unidos, quienes junto a otras instituciones académicas y gubernamentales son los responsables del desarrollo y soporte del modelo WRF. En esta instancia se proyectaba asistir al taller anual para usuarios de WRF, específicamente WRFDA, cuya agenda sería muy parecida a la realizada en 2019 (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/Tutorials/2019_July/Tutorial_Agenda.html) Sin embargo, se cancelaron innumerables eventos a nivel global producto de la pandemia asociada al Covid-19, dentro de los cuales se encontraba este taller “tutorial”. Esta oportunidad era clave para adquirir la experiencia necesaria, tanto para operar el módulo, como para lograr satisfactoriamente la instalación de este.

En relación con este método, la asimilación de datos es el proceso por el cual las observaciones son incorporadas en un ciclo del pronóstico. Este proceso tiene implicancias profundas en cómo los datos son usados y en las condiciones que pueden conducir tanto a un análisis “pobre” como a un pronóstico “malo”. Es fundamental para controlar el crecimiento de los errores del pronóstico y contribuir a la generación de condiciones iniciales para las subsiguientes simulaciones. Por lo tanto, la calidad del pronóstico está estrechamente ligada a la calidad de sus condiciones iniciales. Por este motivo es importante trabajar en disminuir los rangos de errores asociados a la interpolación de productos de bajas resoluciones como GFS, o de las desviaciones que puede presentar en el tiempo una condición inicial retro-alimentada, como la que utiliza actualmente MOSA-WRF. 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. 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-WRF del día 20 de julio de 2020. Este día fue escogido al azar sin ninguna razón en particular. De la condición inicial de ese día se extrajeron puntos de las componentes U y V para el primer nivel vertical, grillados cada 10 elementos de grilla (50 km.). Consideraremos estos datos de U y V como si fueran observaciones ya sean de radares o una red ficticia de estaciones meteorológicas y por lo tanto los datos reales a asimilar.

Para perturbar la condición inicial, combinaremos estos valores con los datos de U y V de otro día en particular, en este caso se escogió, sin ninguna razón especial, el día 10 de julio de 2020. Nos referiremos a esta simulación como la simulación “perturbada”. Por lo tanto, simularemos un pronóstico a 72 horas desde el día 20 de julio con una condición inicial de U y V 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 U y V a 06, 12, 18 y 24 horas de pronóstico y en 3 puntos de control ubicados en el mar interior de Chiloé, sobre la misma isla de Chiloé y sobre el mar abierto, todos aproximadamente en la misma latitud.

3.1.4 Ingreso y evaluación de nuevos aportes de agua dulce.

Este objetivo busca mejorar la variabilidad de la estructura espacial y vertical de la salinidad en la columna de agua al interior del mar interior de Chiloé. Actualmente el modelo cuenta con 33 fuentes de agua dulce con caudales promedios mensuales. Estas fuentes puntuales representan los aportes de agua dulce de los principales ríos y cuencas de la zona de estudio. En etapas previas se intentó acoplar a MOSA-ROMS un modelo hidrológico para reproducir de manera más adecuada la circulación estuarina. Para esto, 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 la etapa V de este proyecto 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, de Aysén y Magallanes. Este producto fue entregado a principios de este año 2020 y sus principales características son resumidas en la Tabla 1.

Los caudales fueron simulados con el modelo hidrológico “*Variable Infiltration Capacity*” (VIC, Liang et al., 1994) que es alimentado con series de precipitaciones y temperatura del producto grillado *CR2MET* de una resolución espacial de 5 x 5 km. Con esa información, VIC simula la escorrentía en intervalos horarios mediante la cual se calculan series diarias de caudales en una red hidrográfica sintética (obtenida a partir de información satelital) para el dominio de análisis. Luego de un proceso de calibración realizada con observaciones fluviométricas de la DGA, en la cuál algunos parámetros del modelo VIC se ajustan para optimizar el desempeño del modelo determinado, el modelo es ejecutado para obtener estimaciones del caudal diario para el periodo 1980 a 2018, en todas las cuencas costeras del dominio espacial de la simulación.

Tabla 1: Características del sistema de modelación hidrológico.

Modelo hidrológico	Variable Infiltration Capacity (VIC)
Resolución espacial	0.05° (aproximadamente 5 Km)
Área de la simulación	Territorio Chileno entre 41° S y 56° S
Resolución temporal	Diario
Periodo de simulación	1980 – 2018 (inclusive)
Datos de entrada	Base de datos CR2MET
Modelo terreno digital	SRTM (30 metros de resolución)
Modelo para red hidrográfica	TauDEM
Calibración y evaluación	Datos fluviométricos de la DGA (~ 50 estaciones)

El producto de precipitación se basa en una regionalización estadística de datos de un re-análisis atmosférico, considerando el impacto de la topografía local mediante un conjunto de parámetros calibrados con observaciones locales de precipitación. Los datos de las temperaturas extremas también se construyeron con una mezcla de observaciones locales, topografía y re-análisis, pero además consideraron datos de temperatura superficial estimadas mediante imágenes satelitales. Más información sobre el producto *CR2MET* se

puede encontrar en la página web del producto (<http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados>).

Los datos de elevación topográfica se usan dentro de la modelación para determinar las bandas de elevación a incluir en las simulaciones, y también para definir la red hidrográfica de la zona, que a la vez es utilizada para determinar la distribución de las cuencas costeras. La base de datos utilizada fue el *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) con 30 metros de resolución lo cual es suficientemente detallado para delinejar las cuencas de interés para el presente proyecto.

Los caudales de este modelo hidrológico fueron comparados con los caudales actuales que utiliza MOSA-ROMS con el fin de actualizar estos valores o agregar nuevos aportes de agua dulce.

3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas históricas.

Las observaciones oceanográficas son una fuente de información fundamental para conocer el estado del océano, las cuales son utilizadas para definir patrones de circulación, variabilidad y procesos oceanográficos a diferentes escalas espacio-temporales, así como también juegan un rol importante en los sistemas de pronósticos operacionales, pues pueden ser utilizadas por modelos como condiciones de borde, calibración y/o evaluación. Esta información es recolectada a través de cruceros de investigación oceanográficos, instrumentos anclados, sumergibles, vehículos remolcados, flotadores y boyas derivadoras. Esta información es limitada en lugares remotos, con topografía compleja debido a los altos costos y problemas logísticos asociados a su obtención.

En el Instituto de Fomento Pesquero existe un constante esfuerzo en registrar información observacional del océano, realizando campañas de mediciones de forma periódica en el marco de diferentes proyectos desarrollados por el instituto. Para evaluar el desempeño del modelo operacional se utilizaron las bases de datos observacionales recapitulas de los proyectos ex ASIPA “Modelación de alta resolución aplicada al transporte hidrodinámico, al interior de la XI región de Aysén” y “Modelación de alta resolución aplicada al transporte hidrodinámico y su relación con procesos biogeoquímicos en la Patagonia Norte (Región de los Lagos y de Aysén)”. Esta información cuenta con mediciones de salinidad y temperatura mediante estaciones CTD realizadas 4 veces al año (cubriendo cada una de las temporadas). Durante 2017 abarcaron la zona del mar interior de Chiloé, fiordo Comau y seno de Reloncaví (Fig. 6a). En 2018 abarcaron la región de Aysén, principalmente a lo largo del canal Moraleda, Errázuriz y estero Quitralco (Fig. 6b). Finalmente, durante 2019 y febrero de 2020 el enfoque estuvo tanto en la región de Los Lagos como de Aysén (Fig. 6c). Además se cuenta con datos de correntometría euleriana

en la columna de agua a través de anclajes ADCP realizados entre agosto de 2018 y marzo de 2019 para el instalado en el canal Moraleda (-73.516° W, -44.666° S) y junio de 2019 para el caso de la Boca del Guafo (-73.758° W, -43.589° S), ambos anclajes alojados a una profundidad de 70 metros (Fig. 6c).

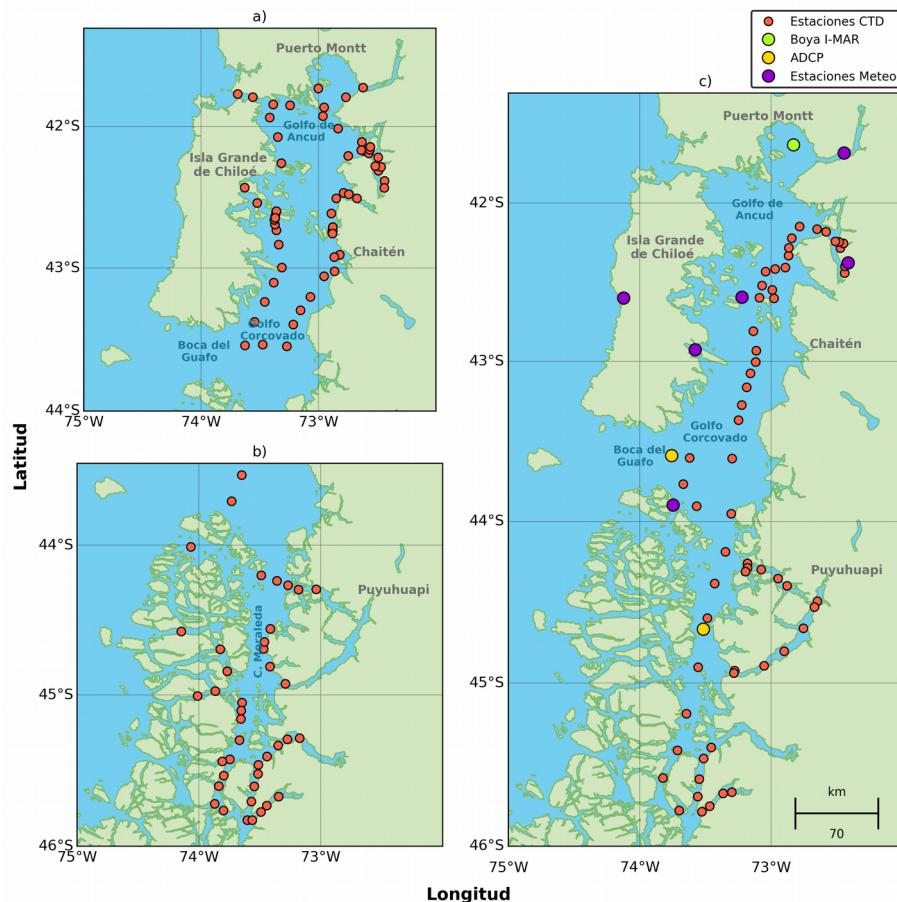


Figura 6: Ubicación de las fuentes de información observacional utilizadas para la validación del modelo operacional. a) Campañas CTD mar interior 2017, b) Campañas CTD región de Aysén 2018, c) Campañas CTD 2019-2020, estaciones meteorológicas, correntómetros anclados (ADCP) y Boya oceanográfica operada por Centro i~mar de la Universidad de los Lagos.

Para complementar el análisis observacional se integró la boyta oceanográfica ubicada en el seno de Reloncaví (latitud $41^{\circ}38'183$ Sur y longitud $72^{\circ}50'069$ Oeste) que se encuentra a cargo del Centro i~mar de la Universidad de los Lagos, Puerto Montt (Fig 6c). Los datos cuentan con información de variables meteorológicas y oceanográficas, tales como salinidad y temperatura superficial, entre otras. La información se transmite cada 1 hora y está disponible en línea en la página web del Centro COPAS Sur-Austral de la Universidad de Concepción, <http://www.cdom.cl/estaciones-meteorologicas/seno-del-reloncavi/>.

Por otra parte se han utilizado productos satelitales para evaluar los patrones espaciales y temporales del pronóstico en mayor detalle. En el caso de la temperatura superficial del mar (TSM) se hace uso de dos fuentes de información: VIIRS-SNNP y Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). VIIRS – SNNP es un producto satelital que corresponde a promedios mensuales desde 2012 hasta el presente y cuenta con una resolución espacial aproximada de 4 km. La información se encuentra disponible en https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/VIIRS-SNPP/Mapped_Monthly/4km/sst/. Para obtener una evaluación entre MOSA-ROMS y las imágenes satelitales de VIIRS-SNNP se llevó la información a la resolución de MOSA-ROMS (~1 km) a través de una interpolación lineal, cuidando que no existan inconsistencias con las zonas de tierra/agua después de aplicar este procedimiento.

Para visualizar el desempeño diario de la temperatura superficial del mar (TSM) en todo el dominio de MOSA-ROMS, se utilizarán datos diarios de Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST), sistema construido por una combinación de información de diversas plataformas (oceano y satelitales) con el fin de obtener la mejor interpolación posible a una resolución de 0.25°. La fuente satelital se denomina Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) y esta disponible en <https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/>.

En el caso de la salinidad superficial del mar se ha utilizado el producto grillado mensual Soil Moisture Active Passive (SMAP). Los archivos de datos SMAP corresponden a promedios mensuales y están disponibles desde el 1 de abril de 2015 hasta la fecha, con una extensión global y una resolución espacial de 0.25°. Sin embargo no cubren la zona del mar interior de Chiloé-Aysén, por lo que el análisis queda acotado a la región de mar abierto del dominio. La base de datos se encuentra disponible en <http://www.remss.com/missions/smap/>.

Tabla 2: Resumen de las fuentes de información utilizadas para la validación del modelo operacional MOSA-ROMS.

Fuente	Variables	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo disponible
Estaciones CTD	Temperatura, Salinidad	Puntual en la columna de agua	Diaria	2017-feb 2020
ADCP	Corrientes componentes U, V	Puntual en la columna de agua	Horaria	2018-2019
AVHRR	Temperatura superficial	0.25°x0.25°	Diaria	1981-presente
VIIRS-SNNP	Temperatura superficial	4 km	Mensual	2012-presente

SMAP	Salinidad superficial	0.25°x0.25°	Mensual	2015-presente
Boya Reloncaví Centro i~mar	Temperatura salinidad superficial	y Puntual	Horaria	2017-presente

El resumen de las fuentes de información se muestran en la Tabla 2. El desempeño del modelo operacional fue evaluado mediante una validación espacio-temporal de las variables pronosticadas entre 2017 y 2020. Las herramientas a utilizar constan principalmente de relaciones estadísticas entre bases de datos, las cuales permiten cuantificar la calidad del modelo (detalles de los estadísticos en Anexo C). Los resultados se presentan esquemáticamente mediante diagramas de dispersión, histogramas, mapas y series de tiempo permitiendo una interpretación intuitiva. Las salidas del modelo operacional junto con información de las principales variables pronosticadas se encuentran disponibles en el portal web del proyecto <http://www.ifop.cl/choros>.

El desempeño de MOSA-WRF fue evaluado utilizando la Transformada de Wavelet (Torrence & Compo, 1998) sobre el campo de vientos superficiales usando el parámetro de “Morlet”. Esta herramienta matemática nos permite analizar la evolución de periodicidades instantáneas tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia. La Transformada de Wavelet (TW) es particularmente útil para el análisis de señales no periódicas, ruidosas, intermitentes y transitorias. Su funcionamiento se basa en realizar un filtrado de la señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso bajos y paso altos, logrando con esto la eliminación de ciertas componentes de alta o baja frecuencia de la señal y este proceso se repite, para las señales resultantes del proceso de filtrado anterior.

Las variable propuesta para este análisis, se fundamentó básicamente en aquella 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. Se utilizó el vector complejo del viento ($U+Vi$), para comparar las salidas del modelo con los datos registrados en toda red de estaciones instaladas por personal de IFOP en el marco de este proyecto.

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:

$$U = M \operatorname{sen}(\phi + 180) \quad (2)$$

$$V = M \cos(\phi + 180) \quad (3)$$

donde M y ϕ , corresponden a la magnitud y dirección del viento respectivamente. Fue necesario sumar 180° a la dirección del viento, ya que las estaciones están configuradas en

convención meteorológica, a diferencia de las salidas del modelo que entrega la dirección hacia donde este se dirige.

Los datos instantáneos de las estaciones meteorológicas fueron extraídos para cada hora, con el fin de facilitar la comparación con el modelo MOSA-WRF. El periodo de evaluación se estableció entre 20/07/18 – 11/08/20, comprendiendo poco más de dos años de información, para las estaciones de Cucao, Apiao y Melinka. Las estaciones de Marimeli y Huinay fueron consideradas hasta el 08/04/20 debido a fallas relacionadas con la transmisión de datos.

3.3 Metodología objetivo específico 3: Incorporar al modelo lagrangiano de partículas (Parti-MOSA) interacción y respuestas a propiedades físicas.

En la etapa V de este proyecto se implementó un modelo lagrangiano de dispersión de partículas inertes con el objetivo de estudiar trayectoria pasivas usando los resultados del sistema de pronóstico hidrodinámico MOSA-ROMS de 3 y 10 días de duración. Esta herramienta numérica recibe el nombre de Parti-MOSA. Este modelo está basado en el código Python OpenDrift (Dagestad et al., 2018). Este es un código que consta de diversos módulos que pueden ser implementados. Cada modulo caracteriza las partículas con distintas propiedades y respuestas al medioambiente.

Se han realizado cambios en la visualización de la pagina web, así como en sus códigos. Un cambio asociado a la estabilidad de la herramienta web Parti-MOSA fue reemplazar la plataforma de mapas “GoogleMaps” por “OpenStreetMap”. Esta última es una plataforma abierta, que no requiere de una licencia de uso y que puede ser implementada en la red interna de IFOP. Los mapas de esta plataforma contienen detalles logísticos como poblaciones, caminos, y rutas marítimas. A su vez, se agregó la opción de descargar las trayectorias en formato netCDF.

Actualmente, Parti-MOSA tiene implementado un módulo de dispersión de partículas lagrangianas inertes, sin propiedades específicas ni reacciones al medio-ambiente. En esta etapa del proyecto implementamos un modelo simple de dispersión de partículas con respuesta al ambiente (Modelo basado en el individuo, IBM) basado en el ciclo de vida del recurso Loco (Concholepas concholepas) adaptado para el ciclo de vida del *Caligus rogercresseyi*, el cual afecta fuertemente a la industria salmonicultora en el sur de Chile. Las adaptaciones existentes para el recurso Loco permiten definir un periodo inicial de deriva libre, una fase bentónica, y una fase con migración vertical. Se escogió tomar como base este modelo IBM pues estas modificaciones puede ser replicadas en las respuestas ambientales de otros individuos. El código fue desarrollado por el Dr. Trond Kristiansen y está escrito en python, lo que facilita futuras modificaciones.

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$y = a + b \ln x$	$y = 1/T (\text{days}^{-1})$	$T (\text{days})$
4.2	0		0
5	0.025		40.0
6	0.05		20.0
7	0.075		13.3
8	0.09286		10.8
9	0.10952		9.1
10	0.12321		8.1
11	0.13571		7.4
12	0.14702		6.8
13	0.15893		6.3
14	0.16964		5.9
15	0.17857		5.6
16	0.18750		5.3
17	0.19524		5.1
17.5	0.20000		5.0

Figura 7: Tiempo de desarrollo previsto en días de estadios larvarios a infección utilizando la temperatura promedio del agua en ($^{\circ}\text{C}$) y un modo logarítmico. Tabla 5 de Gónzalez y Carvajal, 2003.

Las respuestas al medio ambiente existentes en el código se pueden resumir en las siguientes características:

1. Mortalidad dependiente de temperatura.
2. Mortalidad dependiente de salinidad.
3. Respuesta a la luz solar.
4. Crecimiento en función de la temperatura.
5. Cambios de la flotabilidad en función de la salinidad ambiente.

Las dos primeras fueron pensadas exclusivamente en función del *Caligus rogercesseyi*. En términos generales el desarrollo y maduración del *Caligus rogercesseyi* depende de la temperatura (Fig. 7), donde la maduración desde nauplius y copepodito puede ser representado por un modelo logarítmico (Gónzalez y Carvajal, 2003). La mortalidad en cambio, depende tanto de la temperatura como de la salinidad. Tanto nauplius como copepodito mueren a salinidades menores de 20 PSU. A temperaturas menores de 4.2 $^{\circ}\text{C}$ no hay desarrollo de copepodito y por lo tanto *Caligus rogercesseyi* muere. A su vez, el copepodito muere a los 7 días (a 12.4 $^{\circ}\text{C}$) si no encuentra huésped. Finalmente, hay que resaltar que se ajustará Parti-MOSA a dispersión de copepodito, dado que este estado es el infectivo.

Estas opciones están dentro de la función de OpenDRIFT *marine_species_ibm.py*

```
def update_survival_relative_to_environment(self):
    T = self.environment.sea_water_temperature
    S = self.environment.sea_water_salinity
    self.elements.status[np.where(T < 4.2)] = 1
    self.elements.status[np.where(S < 20)] = 1
```

Las partículas en este IBM pueden ser configuradas para ser sensibles a la condición día/noche a través del uso del módulo pysolar de python. Este módulo permite estimar la cantidad máxima de luz diaria en función de la latitud en la cual se ubica la partícula (o individuo). Estas opciones también se encuentran en la función *marine_species_ibm.py*.

```
def calculate_maximum_daily_light(self):
    dd = (self.start_time + datetime.timedelta(
        seconds=self.elements.age_seconds[0]))
    current_date = datetime.datetime(year=dd.year,
                                      month=dd.month,
                                      day=dd.day,
                                      hour=dd.hour,
                                      second=dd.second,
                                      tzinfo=datetime.timezone.utc)
    # Calculate the daily variation of irradiance based on time of
    # day using pysolar
    for ind in range(len(self.elements.lat)):
        if self.elements.lat[ind] < 0:
            lat = 360 - self.elements.lat[ind]
        else:
            lat = self.elements.lat[0]
            altitude_deg = pysolar.solar.get_altitude(lat,
                self.elements.lon[ind], current_date)
            self.elements.light[ind] = pysolar.radiation.
                get_radiation_direct(current_date, altitude_deg)
```

El código contiene además una curva de crecimiento que depende de la temperatura del agua. La curva actualmente implementada corresponde a la curva de crecimiento descrita para el recurso Loco (Garavelli et al., 2016). Este código se modificará para incorporar como opción la curva de crecimiento del Caligus descrita por Gonzales y Carvajal (2003).

```
def update_larval_fish_development(self):
    """
```

Calculates the growth rate in micrometer for each individual larvae depending

on their ambient temperature (Garavelli et al. 2016, PLoS ONE).

"""

```
dt = self.time_step.total_seconds()
T = self.environment.sea_water_temperature
beta = 4.587
PLD = np.exp(beta - 1.34 * np.log(T / 15.) - (0.28 * (np.log(T / 15.)) ** 2))
GR = ((1900 - 250) / PLD) * (dt / 86400.)
self.elements.growth_rate = GR
self.elements.weight += GR * dt
# Update the length (mm) using DOI:10.1371/journal.pone.0146418
mm2micrometer = 0.001
# self.elements.length = (self.elements.length*mm2micrometer + GR
dt)*(1./mm2micrometer)
# Update days of competency stage completed
self.elements.age += dt
```

El código usado permite definir una salinidad en la cual la partícula tiene una boyantes neutra, y de esta forma influir en el movimiento vertical de la partícula en función de la salinidad del medio ambiente.

```
# The density difference between a pelagic egg and the ambient water
# is regulated by their salinity difference through the
# equation of state for sea water.
# The Egg has the same temperature as the ambient water and its
# salinity is regulated by osmosis through the egg shell.
DENSw = self.sea_water_density(T=T0, S=S0)
DENSegg = self.sea_water_density(T=T0, S=eggsalinity)
dr = DENSw - DENSegg # density difference
```

donde *eggsalinity* es un parámetro definido según la especie de interés.

3.4 Metodología objetivo específico 4: Diagnosticar y diseñar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.

En esta etapa del proyecto trabajamos en la construcción de un modelo regional para la región de Magallanes, en la configuración de sus parámetros físicos, la evaluación de posibles forzantes, estimación de tiempos de computo y una evaluación de resultados simulados con información disponible. Se espera que los resultados de esta etapa permitan incursionar en el desarrollo de un modelo totalmente operacional en etapas próximas de este programa, que permitan generar de manera regional o local modelos de pronósticos para diversas zonas de la región.

Este objetivo busca obtener un diagnóstico sobre la factibilidad técnica de implementar un modelo operacional en esta región. Para esto, debemos identificar las posibles brechas y limitaciones que podría presentar su puesta en marcha, tomando en cuenta la cantidad de información *in situ* disponible, la capacidad de cálculo requerida y el grado de error que puede tener. A diferencia de MOSA-ROMS, modelo de pronósticos actualmente implementados en las regiones de Los Lagos y de Aysén, en la región de Magallanes existe una mayor brecha de conocimiento sobre los procesos dinámicos, así como también disponibilidad de datos de terreno. No obstante, a través de campañas oceanográficas históricas del Instituto de Fomento Pesquero podemos contar con algunos datos de variables oceanográficas en la zona. Lamentablemente, debido a la crisis sanitaria producto de la pandemia por Covid, las campañas oceanográficas en la región han debido ser postergadas, por lo cual se utilizaremos datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) para evaluar condiciones iniciales de simulaciones de pronósticos y datos históricos de campañas de CTD en el canal Cockburn para evaluaciones de simulaciones climatológicas.

La construcción de la batimetría para este modelo fue realizada con datos de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) para las zonas interiores y con datos del producto global GEBCO 2020 (<https://www.gebco.net>) para las zonas oceánicas. Además, realizamos correcciones manuales en la batimetría para corregir las inconsistencias generadas por los criterios de suavizamiento de CROCO. Estos filtros son usados en el modelo para evitar que la batimetría contenga pendientes fuertes. La construcción de esta batimetría junto con la construcción de la máscara tierra/océano es la tarea que más tiempo demanda en desarrollo de nuevos modelos.

Se realizaron simulaciones de sensibilidad numérica de un mes de duración para evaluar la estabilidad de la grilla en un ciclo completo de marea. Para estas pruebas se utilizaron datos climatológicos COADS (Da Silva et al., 1994) como forzante atmosférico, los cuales incluyen vientos y flujos de calor. A su vez, se utilizó datos climatológicos del World Ocean Atlas (WOA, Locarnini et al., 2006) como condiciones de borde hidrográficas y dinámicas así como también la construcción de una condición inicial (temperatura, salinidad y corrientes). Finalmente las mareas son extraídas del modelo global TOPEX07 (Egbert & Erofeeva, 2002), del cual se usaron los 10 primeros constituyentes armónicos para construir el forzante barotrópico en los bordes.

Una vez alcanzado una configuración estable evaluamos el desempeño del modelo como modelo de pronóstico. Para esto usamos como condiciones de borde el producto francés Mercator-Ocean y como forzante atmosférico un modelo basado en WRF de una resolución de 5 km forzado con el modelo global GFS. Este experimento buscó replicar un

pronóstico de 3 días de corrientes, temperatura y salinidad, similar al actual de MOSA-ROMS.

Las simulaciones climatológicas fueron realizadas en un servidor de alto rendimiento de 4 nodos de computo, cada uno con 12 procesadores. Realizaremos un estudio de eficiencia o escalamiento para evaluar la configuración óptima de procesadores. Para la prueba de pronóstico simulado, utilizamos 48 núcleos de computo en el servidor de alto rendimiento empleado por MOSA-ROMS (Anexo D) y una conexión de fibra óptica para la descarga de datos.

3.5 Metodología objetivo específico 5: Diagnosticar y diseñar un modelo biogeoquímico (BGQ) climatológico en el mar interior de Chiloé.

El objetivo de esta actividad es poder contar en un futuro con un modelo biogeoquímico regional de baja resolución para comprender los efectos de la eutrofización costera en la dinámica de los ecosistemas marinos. A su vez, se busca que sea un modelo contingente que sirva como alerta temprana ante emergencias sanitarias como zonas anóxicas o floraciones de algas nocivas.

En la etapa V de este proyecto se realizó un diagnóstico del modelo biogeoquímico más simple que se encuentra incorporado en ROMS-AGRIF, un modelo basado en nutrientes, fitoplancton, zooplancton y detritus (NPZD). El objetivo de este modelo NPZD fue reproducir condiciones generales de gran escala. Los resultados de un año climatológico, mostraron que este tipo de modelo es insuficiente si se quiere utilizar, por ejemplo, para escenarios de mareas rojas. No obstante, en esta etapa evaluaremos el desempeño del modelo NPZD tras un período de simulación de 8 años.

Además del modelo NPZD, ROMS-AGRIF cuenta con el modelo biogeoquímico Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES, Aumont et al., 2015), ampliamente utilizado por la comunidad científica. PISCES es un modelo con 24 variables de estado que simula el ciclo del carbono, oxígeno y de los principales nutrientes que controlan el crecimiento del fitoplancton (PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , Si y Fe). A su vez, tiene dos tipos de fitoplancton (diatomeas y nanofitoplancton), dos clases de zooplancton (micro y mesozoopláncton) y tres clases de variables no vivas (materia orgánica disuelta y materia orgánica particulada pequeña y grande).

Debido a la cooperación existente entre el IFOP y el Dr. Vincent Echevin y la Dra Odette Vergara, en esta etapa del proyecto también se diagnosticará el uso del modelo PISCES. Para esto, primero realizamos una revisión bibliográfica para determinar los valores de los principales coeficientes utilizados por el modelo en esta zona. La evaluación fue a partir de mediciones realizadas por el proyecto “Modelación de alta resolución

aplicada al transporte hidrodinámico y su relación con procesos biogeoquímicos en la Patagonia Norte (Región de los Lagos y de Aysén)”, específicamente silicato, nitrato y fosfato. Además se validó clorofila superficial a través de imágenes satelitales durante el período de estudio.

3.5.1 Modelo NPZD

El modelo NPZD es un modelo biogeoquímico simple basado en el desarrollo de Fasham et al. (1990). Este tipo de modelo de red trófica consiste en un pequeño número de compartimientos donde la diversidad de organismos y especies individuales son reemplazadas por variables genéricas como ‘fitoplancton’ o ‘zooplancton’. Por lo tanto el modelo contiene cuatro variables de estado: nitrógeno inorgánico disuelto o nitrato (NO_3^-), fitoplancton (P), zooplancton (Z) y detritus (D). La interacción entre las variables de estado se resume en la Figura 8.

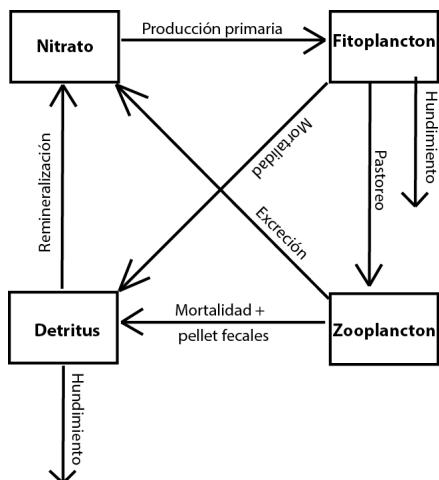


Figura 8: Esquema del modelo NPZD.

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

$$\frac{dO_2}{dt} = \text{Producción Primaria} - (\text{Respiración} + \text{Remineralización}) \dots \pm (\text{Intercambio océano-atmósfera}) \quad (4)$$

Por lo tanto la concentración de oxígeno está dada por el oxígeno producido durante el proceso de producción primaria, es decir durante el crecimiento del fitoplancton y los procesos que consumen O_2 . En los procesos de respiración del zooplancton y de remineralización del detritus, las bacterias utilizan oxígeno como primer oxidante. El intercambio océano-atmósfera puede ser una perdida o ganancia de oxígeno, ya que

depende de la solubilidad del O₂ en el agua de mar para la salinidad y temperatura de ese momento.

Para las condiciones iniciales y de borde de oxígeno y nitrato, se utilizaron interpolaciones de datos climatológicos del *World Ocean Atlas* 2009 (WOA, Levitus et al., 2010). Para las condiciones iniciales y de borde de clorofila se utilizó la climatología estacional de SeaWifs (Hooker & McClain, 2000). Los datos de fitoplancton y zooplancton utilizados fueron derivados desde los datos interpolados de clorofila utilizando una relación de 0.5 y 0.2 para el fitoplancton y zooplancton, respectivamente.

Para el diagnóstico del modelo NPZD se utilizaron datos observados estacionales del Atlas Mundial de los Océanos 2018 (WOA18, Boyer et al., 2018). Estos datos se ubican a lo largo de la longitud de 79.5°W y latitud 43.5° S (Fig.) y representan las condiciones de oxígeno disuelto y nitrógeno. En cuanto a los datos del modelo se utilizó un promedio estacional para realizar la comparación.

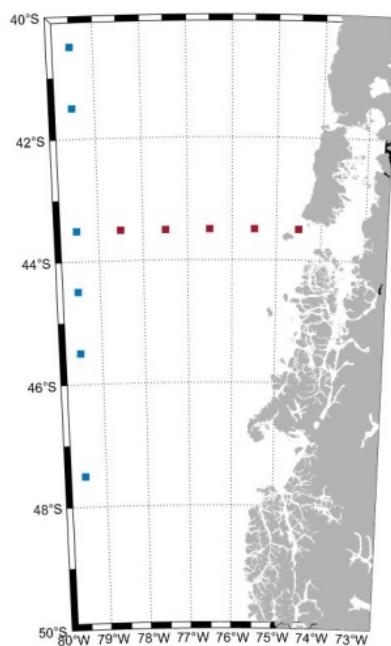


Figura 9: Ubicaciones de las transectas de datos WOA18 a lo largo de la longitud 79.5 °W (puntos azules) y latitud 43.5 °S (puntos rojos).

Para evaluar la simulación con la distribución de las masas de aguas de origen oceánico que ingresan por la boca del Guafo planteada en la etapa anterior de este proyecto, analizamos 94 datos de perfiles de CTD y muestras de nitrato a profundidades discretas, recopilados en la zona de la boca del Guafo, registrados entre 1967 y 2019 (Fig. 10). Estos datos posteriormente fueron analizados en un diagrama de temperatura potencial versus salinidad absoluta. Ambas variables fueron calculadas con la ecuación de termodinámica

del agua de mar 2010 (IOC et al., 2010), basadas en la formulación de la función de Gibbs y se contrastaron con el contenido de oxígeno disuelto y nitrato.

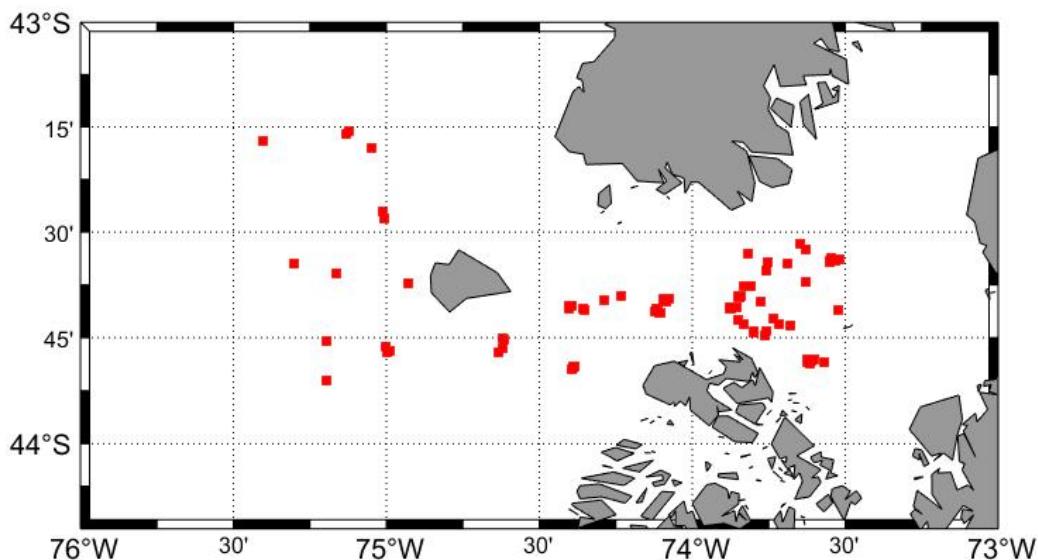


Figura 10: Ubicación de los datos utilizados para el diagrama temperatura y oxígeno.

Para la determinación del porcentaje de contribución de las masas de agua se utilizó el método de triángulo de mezcla descrito por Mamayev (1975), en donde el diagrama temperatura-salinidad (T-S) de las masas de aguas forman un triángulo de mezcla y el porcentaje de cada masa de agua es obtenido resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones lineales:

$$aT_{SAAW} + bT_{AAIW} + cT_{ESSW} = T \quad (5)$$

$$aS_{SAAW} + bS_{AAIW} + cS_{ESSW} = S \quad (6)$$

$$a + b + c = 1 \quad (7)$$

donde a, b y c son las proporciones de las masas de agua subantártica (SAAW), intermedia antártica (AAIW) y equatorial subsuperficial (ESSW), respectivamente. T corresponde a la temperatura potencial y S salinidad absoluta para cada una de las masas de aguas. Los valores utilizados para cada una de ellas se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de salinidad y temperatura utilizados para las masas de agua.

Masa de agua	Salinidad	Temperatura (°C)	Referencias
Agua Subantártica (SAAW)	33.8	11.5	Schneider et al.(2014) Silva et al.(2008)

Agua Intermedia Antártica (AIAA)	34	3	Carrasco <i>et al</i> (2017) Silva <i>et al</i> (2009) Lanillo <i>et al</i> (2014)
Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW)	34.9	12.5	Schneider <i>et al</i> (2014) Silva <i>et al</i> (2008)

Con la finalidad de evaluar la variación estacional de las concentraciones de oxígeno disuelto en la boca del Guafo, se utilizaron datos provenientes del anclaje instalado por IFOP en 43.6798 °S, 73.8754 °W durante agosto del 2018 a febrero del 2020. La concentración de oxígeno fue registrada por equipos Minidot a 20, 70 105 y 140 metros. Los datos fueron filtrados por un filtro lanczos e interpolados en la columna de agua.

3.5.2 Modelo PISCES

El modelo biogeoquímico Pelagic Interactive Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES, Aumont et al., 2003; Aumont y Bopp, 2006; Aumont et al., 2015) simula los ciclos de carbono, oxígeno y los principales nutrientes que controlan el crecimiento del fitoplancton (PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , Si, Fe). En este modelo el crecimiento del fitoplancton depende de las concentraciones externas de nutrientes. PISCES incluye dos clases de fitoplancton (diatomeas y nanofitoplanción) y dos clases de zooplancton (micro y mesozoopláncton). Este modelo incorpora tres compartimentos "no vivos", estos son: materia orgánica disuelta semilábil, pequeñas partículas que se hunden y grandes partículas que se hunden. A continuación se presenta un esquema general que representa la arquitectura del modelo PISCES (Fig. 11)

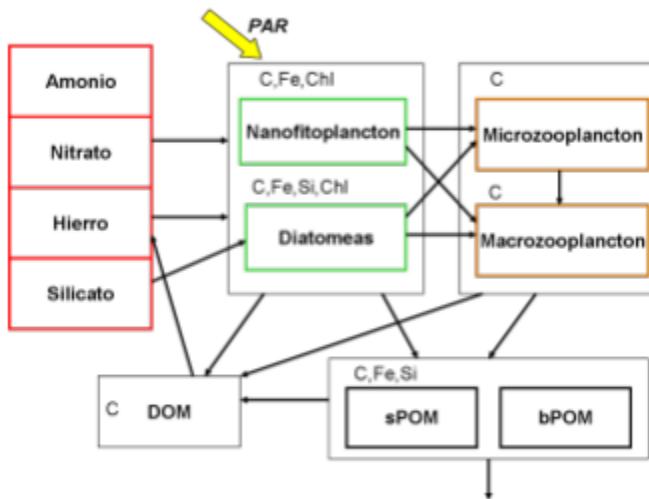


Figura 11: Arquitectura del modelo PISCES extraído de Aumont y Bopp (2006). Este esquema muestra el modelo ecosistémico omitiendo el oxígeno y el sistema de carbonato.

PISCES cuenta con 24 compartimentos y más de 60 parámetros (Aumont y Bopp, 2006), los cuales están especialmente configurados para ROMS a través de una lista

disponible para su modificación (*namelist.trc.sms*). Cabe destacar que la nueva versión de ROMS, CROCO (<https://www.croco-ocean.org>), contiene la versión actual de PISCES (Aumont et al., 2015) en la cual han aumentado el número de parámetros e incorporado cambios a los nutrientes modelados, a los compartimentos de fito y zooplancton y a la materia orgánica disuelta y particulada, entre otros. La implementación de PISCES en la zona sur-austral de Chile, podría ayudar a resolver problemáticas tan relevantes como aquellas relacionadas con la marea roja, la eutrofización, la disponibilidad de nutrientes y luz para el crecimiento del fitoplankton y la alcalinidad de la columna de agua.

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

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

1. Máxima tasa de pastoreo del zooplancton (Bottjer y Morales, 2005).
2. Tasa de remineralización de carbono orgánico disuelto (Pantoja et al., 2004).
3. Tasa de remineralización del carbono orgánico particulado (Pantoja et al., 2006; Cuevas et al., 2004).
4. Tasa de exudación del mesozooplancton (Pérez-Aragón et al., 2011).
5. Tasa de mortalidad del zooplancton (Yáñez et al., 2012).
6. Tasa de nitrificación (Fernández y Farías., 2012).
7. Tasa de excreción de materia orgánica disuelta (González et al., 2007).

La evaluación del modelo PISCES se realizó con la misma información que la utilizada por el modelo NPZD, previamente mencionada.

3.6 Metodología objetivo específico 6: Mejorar visualización de resultados en plataforma web CHONOS.

En la etapa IV de este proyecto se generó una plataforma 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.

Esta nueva plataforma web fue bautizada como CHONOS (www.ifop.cl/chronos), en honor a los antiguos habitantes de los mares del sur de Chile. La plataforma está dividida en resultados directos de los modelos de pronósticos operacional oceanográfico (MOSA-ROMS) y atmosférico (MOSA-WRF), y en la herramienta numérica que permiten generar simulaciones puntuales de dispersión de partículas (Parti-MOSA).

CHONOS se encuentra alojada en un servidor POWEREDGE R640 con sistema operativo CentOS Linux 7 x86-64. A nivel de software, la plataforma se compone de la aplicación “Nginx”, un framework de desarrollo web “Django” y el servidor http “Gunicorn”. Nginx está diseñado para ofrecer un bajo uso de memoria y alta concurrencia. En lugar de crear nuevos procesos para cada solicitud web, Nginx usa un enfoque asíncrono basado en eventos donde las solicitudes se manejan en un solo hilo (Fig. 12). Con Nginx, un proceso maestro puede controlar múltiples procesos de trabajo. El proceso maestro mantiene los procesos de trabajo, y son estos lo que hacen el procesamiento real. Podemos observar que Nginx es inicialmente el encargado de resolver la petición web realizada por el cliente, re-enviándola para que Gunicorn pueda procesarla utilizando varios “workers”. Cada *worker* es capaz de comunicarse con la aplicación Django de manera que pueden atenderse múltiples peticiones al mismo tiempo, manteniendo un buen tiempo de respuesta.

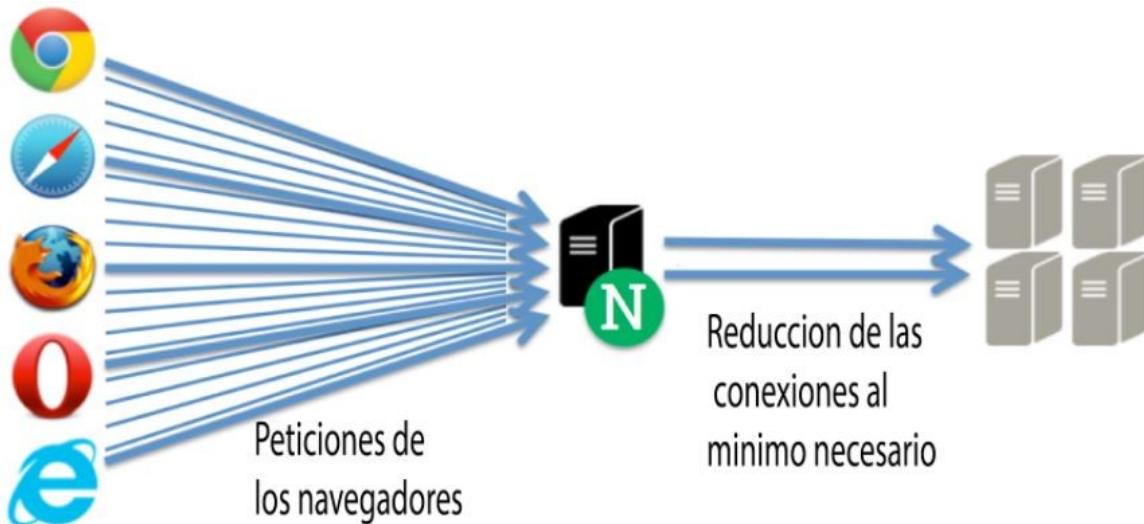


Figura 12: Diagrama de funcionamiento de la aplicación Nginx

Gunicorn es un servidor http “WSGI” para sistemas UNIX compatible con diferentes frameworks para desarrollo web, entre ellos Django, ligero en recursos de computación y bastante rápido. Django es un *framework* de aplicaciones web gratuito y de código abierto escrito en Python.

En esta etapa se corrigieron errores y/o fallas en el despliegue de información y se agregaron mejoras al modulo de dispersión de partículas Parti-MOSA.

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 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 (Meteodata)
9. Mark Falvey (Meteodata)

Reunión 2

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 3

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 4

Se realizó una reunión técnica con el asesor Dr. Andres Sepulveda y colaborador internacional Raschid Benshila 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 5

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)

Reunión 6

Se realizó una reunión técnica con el asesor Dr. Andres Sepulveda y el Dr. Daniel Brieva en el departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción entre los días 28 y 29 de Octubre del 2019. En esta reunión se trabajó sobre modelación en Magallanes y en incorporación de respuesta ambiental a las partículas dentro de Parti-MOSA.

Fecha: 28 – 29 Octubre, 2019.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Sepúlveda (DGEO)
3. Daniel Brieva (COPAS)

Reunión 7

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Dr. Mark Falvey y Andrés Arriagada en las oficinas de CTPA-Putemún en Castro durante los días 23 y 24 de Enero del 2020. En esta reunión se discutieron aspectos técnicos del portal web oceanográfico CHONOS y sobre las posibles mejoras a incorporar.

Fecha: 23 – 24 Enero, 2020.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

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

Reunión 9

La colaboradora del proyecto, la Dra. Odette Vergara, visitó el centro Putemún para discutir los resultados preliminares de la modelación biogeoquímica y en asesor en los parámetros a mejorar para una mejor representación de las condiciones ambientales.

Fecha: 28 – 30 Enero, 2020.

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 10

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Meteodata y personal de IFOP a través de videollamada el día 21 Julio del 2020. En esta reunión se discutieron los desarrollos y avances técnicos del portal web oceanográfico CHONOS.

Fecha: 21 Julio, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Arriagada (Meteodata)
3. Luis Avello (IFOP)
4. Oliver Venegas (IFOP)
5. Cristian Ruiz (IFOP)
6. Mark Falvey (Meteodata)
7. Pablo Reche (IFOP)
8. Paula Jarpa (Meteodata)
9. Pedro Valdebenito (IFOP)

Reunión 11

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Dr. Andrés Sepúlveda y la Dra. Odette Vergara y personal de IFOP a través de video-llamada el día 7 Agosto del 2020. En esta reunión se discutieron los desarrollos y avances técnicos del modelo biogeoquímico basado en el código PISCES.

Fecha: 7 Agosto, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)
3. Odette Vergara (DGEO)
4. Elias Pinilla (IFOP)
5. Gabriel Soto (IFOP)
6. Valentina Besoain (IFOP)

4.3 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 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, ademas 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 2

El martes 10 de septiembre del 2019 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 Esmeralda en Castro, Chiloé. En el taller se presentaron resultados y evaluaciones del modelo, la implementación del modelo MOSA-WRF y el portal CHONOS.

Fecha: 10 de septiembre, 2019.

Lugar: Hotel Esmeralda, Castro.

Expositores;

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

4.4 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. **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.
2. **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 D). Este sistema es una 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.
3. **Convenio Colaboración FCFM – NLHPC – IFOP.** El objetivo del presente convenio es establecer una relación de colaboración mutua duradera entre las partes, en el campo de la modelación oceanográfica y atmosférica de alta resolución, basada en la igualdad, en la reciprocidad y el beneficio mutuo. IFOP utilizará a través del acceso remoto, la capacidad de cómputo del supercomputador administrado por el NLHPC.

4.5 Publicaciones científicas.

Ruiz, C., Artal, O., Pinilla, E. & Sepúlveda, H. H. (2020). Stratification and mixing in the Chilean inland sea using an operational model. *Ocean Modelling*. En Revisión.

4.6 Carta Gantt del proyecto

El proyecto tiene una duración total de 20 meses, comenzando en enero del 2019 y finalizando en agosto del 2020.

Actividades	E19	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E20	F	M	A	M	J	J	A
1. Calibración niveles	x	x	x	x																

verticales.																				
2. Evaluación esquemas de turbulencia y advección lateral.					X	X	X	X												
3. Mejoramiento y evaluación MOSA-WRF	X																			
4. Evaluación agua dulce															X	X	X	X		
5. Evaluación modelo v/s observaciones											X									
6. Perfeccionamiento Parti-MOSA	X																			
7. Pruebas modelo Magallanes.	X																			
8. Pruebas modelo BGQ.	X																			
9. Incorporación nuevos productos y herramientas a portal CHONOS.	X																			
10. Taller difusión																				
11. Reuniones de coordinación																				
12. Documento de avance 1											X									
13. Documento de avance 2																X				
14. Informe final																		X		

5. RESULTADOS

5.1 Resultados objetivo específico 1: Calibrar el sistema operacional oceanográfico para las regiones de Los Lagos y de Aysén.

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 continuadamente 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 las fuentes de agua dulce, mejoras en las condiciones atmosféricas, distribución de las capas verticales del modelo y selección de las parametrizaciones de turbulencia vertical.

5.1.1 Calibración de diferentes distribuciones de niveles verticales en MOSA-ROMS.

Se han identificado zonas donde la batimetría del dominio MOSAv3 (denominación al dominio que ocupa el modelo actualmente) presenta diferencias significativas con respecto a las sondas batimétricas disponibles. Estas zonas eventualmente podrían ser sensibles en el desarrollo de estructuras hidrodinámicas coherentes en la zona. En esta etapa se realizaron algunos test de estabilidad con 2 grillas modificadas, denominadas MOSAv4a y MOSAv4b. En la región de Los Lagos se realizaron modificaciones de la batimetría en el Estero y seno de Reloncaví, fiordo Comau y alrededores de isla Queullin. En la región de Aysén se realizaron ajustes en el Archipiélago de las Guaitecas, canales King, Byron, Ninualac, Errázuriz, Costa, estero Elefantes, y en los fiordos Quintralco y Cupquelán.

Las grillas se construyen en base a parámetros que indican el grado de suavizado empleado en ellas. En este caso utilizamos 3 parámetros:

1. pendiente de la batimetría (r_{target}). Resultado del cociente entre el gradiente de la batimetría y la batimetría.
2. Filtro para montes submarino ($filter_deep_topo$). Define el número de pasadas de un filtro selectivo para reducir el aislamiento de montes submarinos y singularidades
3. Filtro final (n_filter_final). Hace referencia al número de pasadas de un filtro Hanning al final del procedimiento que evita la persistencia de ruidos en los datos.

Los valores utilizados en las nuevas grillas se muestran en la tabla 4. Al tratarse de una modificación sobre una grilla ya suavizada se evita el empleo de nuevas pasadas 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. En la figura 13 se muestra la zona de Reloncaví, Golfo de Ancud y el fiordo Comau de las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b junto con la grilla actual MOSAv3. Se observa que en la boca del estuario Reloncaví la profundidad en las nuevas grillas alcanza los 400 m, siendo uno de los cambios mayores en esta zona. También hay cambios considerables en el paso de Islas Queullin, la que es una importante zona de intercambio de aguas entre la cuenca del seno y fiordo Reloncaví y el golfo Ancud. Por otra parte, aún cuando se introducen cambios en el fiordo Comau, las grillas al ser sometidas a nuevos filtros, tienden a perder estos cambios mostrando diferencias menores con la grilla actual.

Tabla 4: Parámetros de suavizado empleado en las nuevas grillas de MOSA.

	MOSAv3	MOSAv4a	MOSAv4b
r_target	0.25	0.25	0.25
n_filter_deep	4	0	1
n_filter_final	2	0	2

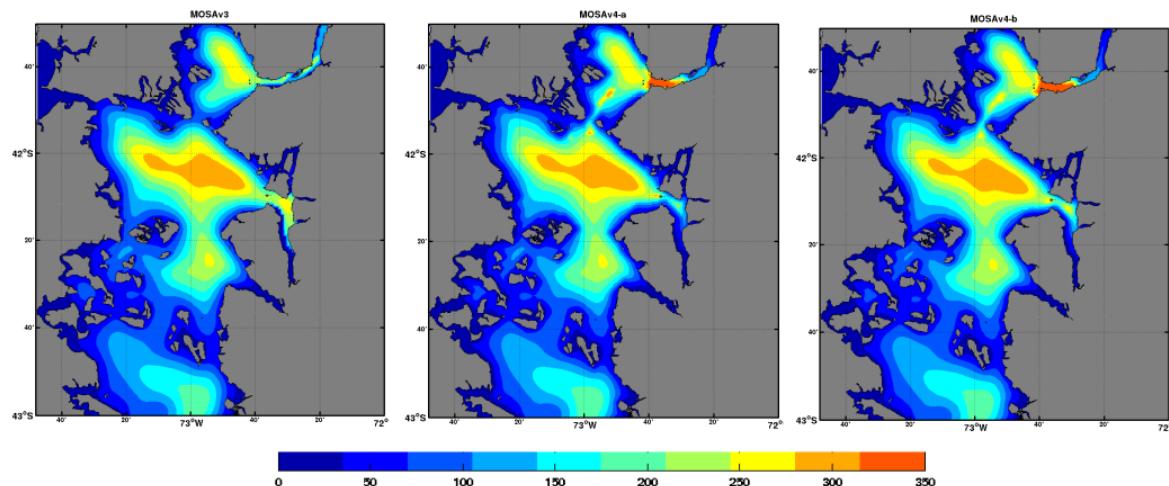


Figura 13: Batimetría del Golfo de Corcovado, Golfo de Ancud y Seno Reloncaví y Fiordo Comau para la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda) y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).

Análogamente en la figura 14 se presentan las grillas modificadas y la actual de MOSA para la región de Aysén. Realizamos menores modificaciones en diversas áreas de la zona en comparación con la parte norte del dominio, estas podrían causar un impacto significativo. Los cambios estuvieron concentrados en la zona insular de Aysén. En el archipiélago de las Guatecas 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 el canal Darwin. En el canal Moraleda, se realizaron modificaciones importantes en la zona de 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 constrictión presentes al norte de la boca del fiordo Cupquelán. Mientras los cambios parecen mantenerse en la zona insular y a lo largo del eje norte Sur de los canales principales, el suavizado tiende a modificar la grilla en las zonas de canales continentales del dominio, especialmente en los canales Jacaf, Puyuhuapi, fiordos Aysén, Quirralco y Cupquelán. De las 2 nuevas grillas, la MOSA v4b es la que presentan menos alteraciones en sus modificaciones al ser pasada por los distintos filtros.

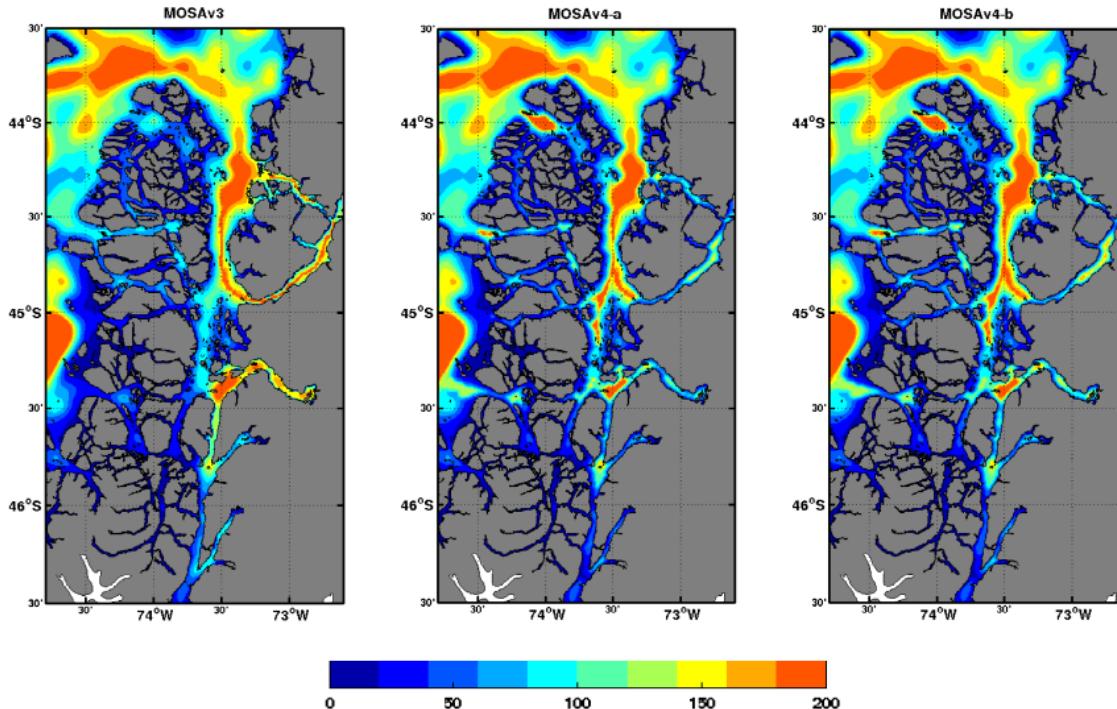


Figura 14: Batimetría de la zona de Aysén para la grilla actual de MOSA-ROMS (izquierda), y las grillas modificadas MOSAv4a y MOSAv4b (centro y derecha).

Para evaluar la estabilidad de las grillas de prueba y el impacto de los cambios, se realizó una simulación de 3 días en cada una, se extrajeron valores del nivel del mar y se compararon con datos de mareógrafo. Estas simulaciones corridas se realizaron entre los días 21 y 24 de agosto del 2019, y sus resultados también fueron comparados con los resultados del modelo oficial que corre diariamente usando la grilla MOSAv3. Las pruebas fueron realizadas usando las mismas fuentes de agua dulce que usa MOSAv3, es decir, caudales de 33 ríos en todo el dominio, sin embargo debido a los cambios efectuados, se utilizó una condición inicial de baja resolución obtenida del producto Mercator-Ocean.

Las series en general muestran que se mantiene el ajuste que se venía observando con la grilla actual, destacando que todas las series están relativamente en fase y con errores menores. Se observa 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 corridas.

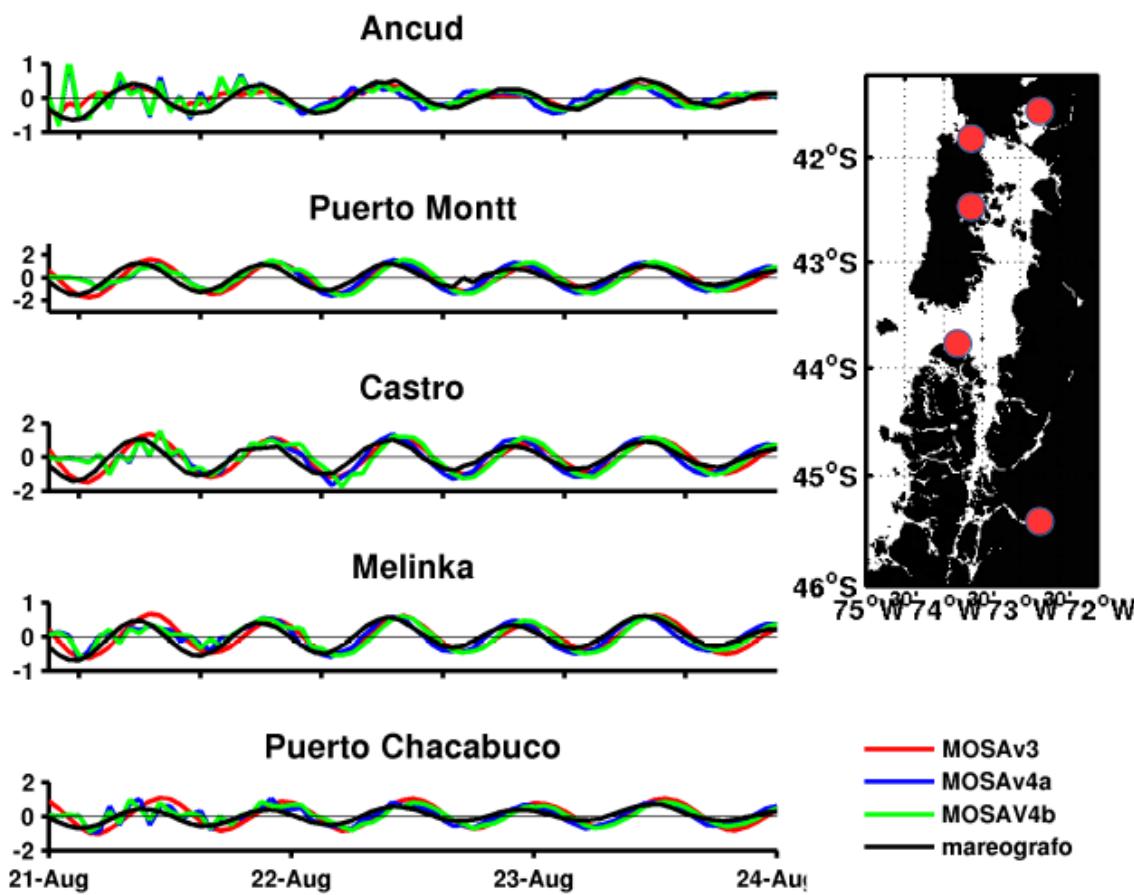


Figura 15: Series de tiempo del nivel del mar observadas y modeladas con las grillas de prueba MOSAv4a y MOSAv4b y la grilla actual MOSAv3.

En el caso de los niveles verticales buscamos una nueva distribución modificando los parámetros de fondo y de estiramiento. Después de varias modificaciones a estos valores, se optó por probar una configuración con los valores de $\theta_b=2.5$ y $T_{cline}=20$. La figura 16 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 17 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.

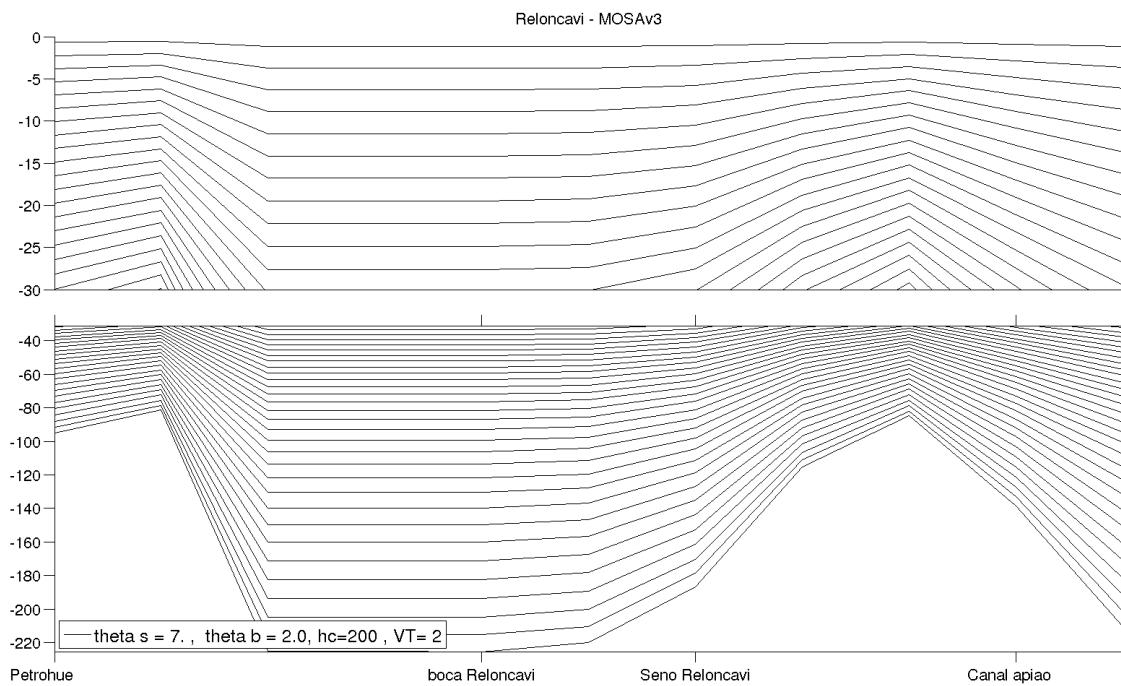


Figura 16: Transecta longitudinal de la distribución de los niveles verticales actuales en MOSA-ROMS entre Petrohué (cabeza fiordo Reloncaví) y canal Apiao.

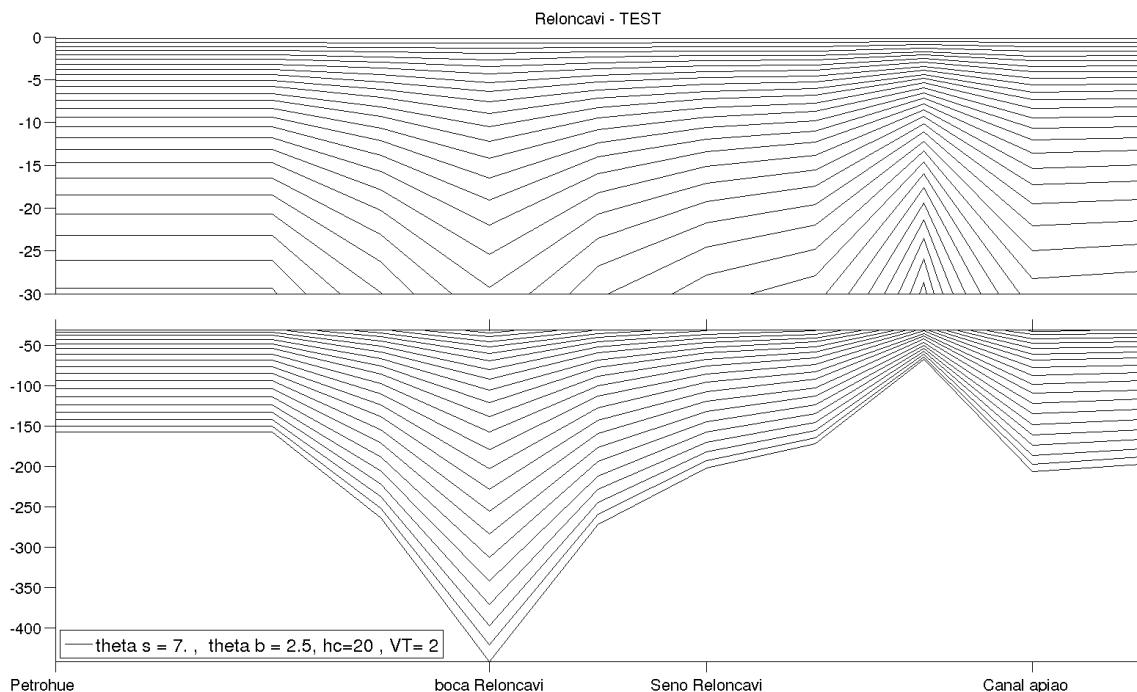


Figura 17: Transecta longitudinal de la distribución de los niveles verticales de la grilla de prueba para MOSA-ROMS entre Petrohué (cabeza fiordo Reloncaví) y canal Apiao.

Luego de comprobar la estabilidad de estas simulaciones durante más de 1 mes solo modificamos la batimetría de la grilla. La grilla de MOSAv4b en el pronóstico operacional se comenzó a utilizar desde Octubre del 2019.

5.1.2 Evaluación de diferentes esquemas de turbulencia vertical y de advección lateral.

En el caso del experimento con diferentes esquemas de advección lateral se utilizó la misma grilla que utiliza MOSA-ROMS actualmente. Se tomaron como fechas de referencia el día de máximo de sicigia (12/01/2020) y de máxima cuadratura (04/01/2020) para las simulaciones de los pronósticos de 3 días con cada esquema diferente. MOSA-ROMS utiliza el esquema de advección lateral UP3 en sus pronóstico operacional. De los tres modelos restantes, el esquema UP5 no logró ser estable en cuadratura ni en sicigia. A su vez, el esquema TVD solo corrió en cuadratura. Dado que la intención de este experimento es mejorar la representación de la salinidad, nuestros resultados estarán en función de esta variable.

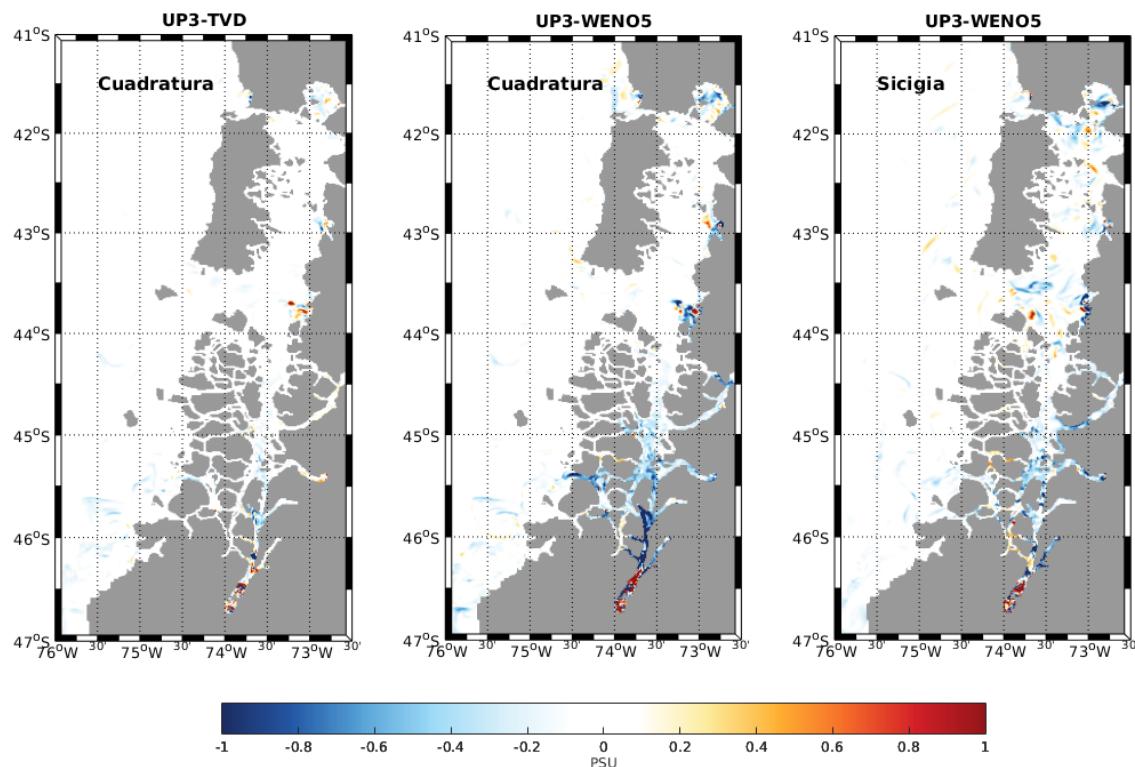


Figura 18: Salinidad superficial residual para los diferentes esquemas de advección lateral en períodos de sicigia y cuadratura

Podemos observar diferencias negativas de salinidad principalmente a lo largo del Canal Moraleda y Estero Elefantes, incluyendo el fiordo Aysén tanto en cuadratura como en sicigia tanto en el esquema TVD como WENO5 (Fig. 18). Esto significa que ambos esquemas subestiman en aporte de agua dulce o mezclan más eficientemente, lo que se traduce en términos generales en un valor de salinidad mayor. Se observan valores positivos en la laguna de San Rafael, la cual no tiene aporte de agua dulce como fuente puntual sino que recibe un mayor aporte de agua dulce por precipitación en superficie. En el caso del esquema WENO5 podemos observar más zonas con diferencias significativas durante sicigia, como es en caso del canal Apiao, Desertores o la Boca del Guafo. Dada las pocas diferencias encontradas y por la estabilidad del modelo se seguirá usando por ahora la configuración actual de MOSA con el esquema de advección lateral UP3.

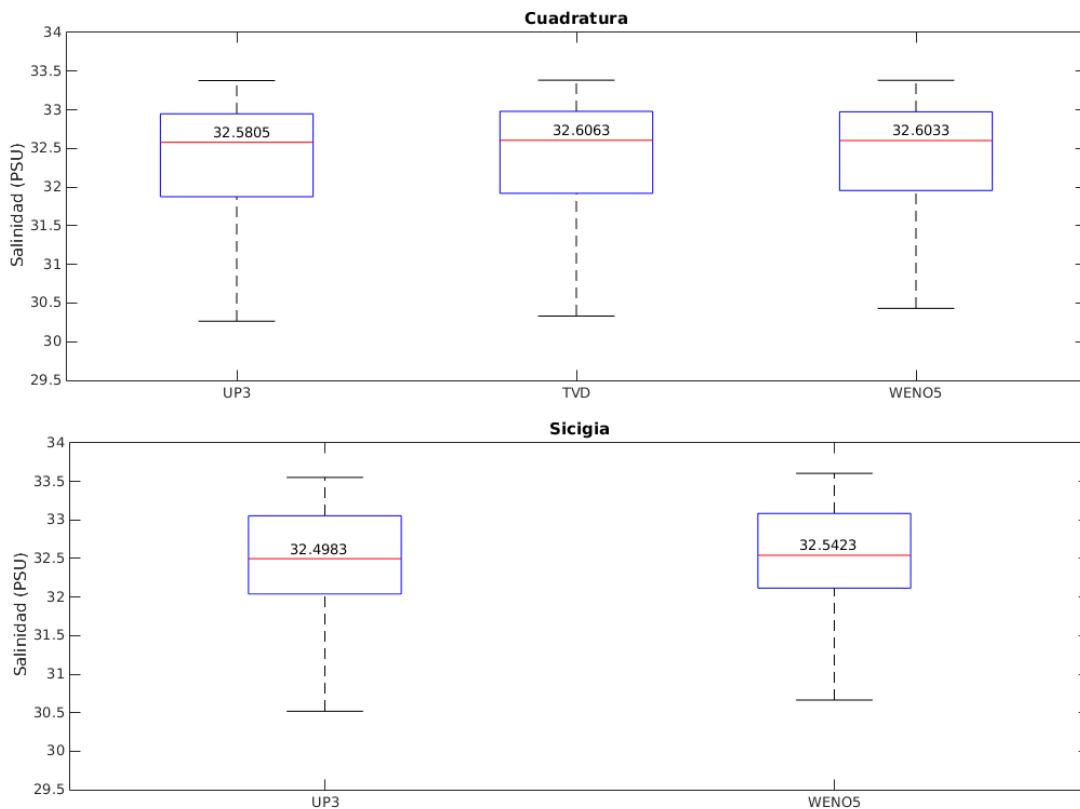


Figura 19: Boxplot de salinidad superficial entre los quintiles al 25 % y 75 %. (panel superior) Cuadratura, (panel inferior) Siciglia.

Por otra parte, la evaluación de diferentes esquemas de turbulencia vertical fue realizado con un dominio anidado a MOSA-ROMS en el sector del canal Apiao y paso Desertores (Fig.). Este dominio hijo tiene una resolución de 400 m y se extiende desde 42.1 °S a 43.1 °S, y 72.4 °O a 73.8 °O. Esta configuración tiene 42 niveles verticales sigma y sus coeficientes en estas coordenadas son theta_s=7, theta_b=2 y hc=300. Se simuló el

año 2013 usando como condiciones de borde Mercator-Ocean, pero nuestros análisis utilizan los máximos de sicigia y cuadratura durante junio y julio del mismo año.

Las elevaciones del nivel del mar utilizando los diferentes esquemas mostraron una buena correlación con el mareógrafo ubicado en Castro con un error cuadrático medio normalizado menor al 12 %. La elevación del nivel del mar en relación con los armónicos de mareas muestra que el modelo es capaz de reproducir los rangos de amplitud de los principales componentes de mareas diurnas y semi-diurnas. La componente de marea M2 fue sobreestimada en todas las simulaciones, aproximadamente 20 cm con los esquemas KPP y KKL y 40 cm por el esquema BVF. La componente S2 fue mejor representando, aunque BVF muestra diferencias mayores. Los patrones son similares en el caso de las componentes de marea diurnas.

Tabla 5: Indices estadísticos calculados en Castro para simulaciones con distintos esquemas de turbulencia vertical

	R2	RMSE (cm)	NRMSE (%)
KPP	0.91	0.59	9.66
KKL	0.92	0.61	9.90
BVF	0.93	0.65	10.66

Los perfiles verticales de salinidad durante sicigia mostraron una columna de agua homogénea con un valor cercano a 32.5 en todas las simulaciones. En cuadratura existen diferencias más notorias entre los esquemas. En los primeros 5 m de profundidad los esquemas KPP y BVF tienen un valor de ~ 31, y un perfil de salinidad vertical bien estratificado, mientras que el esquema KKL tenía una estructura vertical bien mezclada en superficie . con una columna de agua homogénea bajo los 20 m en todas las simulaciones.

La estratificación de la columna de agua fue evaluada utilizando el número de Richardson (R_i). Las salidas del modelo numérico se convirtieron del nivel vertical sigma a la profundidad en metros. Dadas las profundidades elegidas para analizar la estratificación a lo largo del tiempo, se decidió promediar los datos de todos los perfiles entre 30 m y la superficie en cada instante. Promediamos cada nivel de profundidad a lo largo del tiempo. Este procedimiento se realizó para todos los esquemas verticales utilizados durante los períodos de sicigia y cuadratura.

Una serie temporal de números de R_i para los primeros 30 m en la simulación de turbulencia utilizando el esquema KPP indica que hay mayor mezcla durante sicigia que en cuadratura (Fig. 20b). Los valores de R_i durante sicigia son siempre inferiores a 5, incluso en unas pocas horas se obtienen valores inferiores a 1. Se obtuvo un valor mínimo de R_i de 3 durante cuadratura, pero por lo general se mantienen sobre 5. El perfil de KPP en

cuadratura está más estratificado que el de sicigia (Fig. 20a). No se observaron valores de R_i menores a 1 en toda la columna de agua.

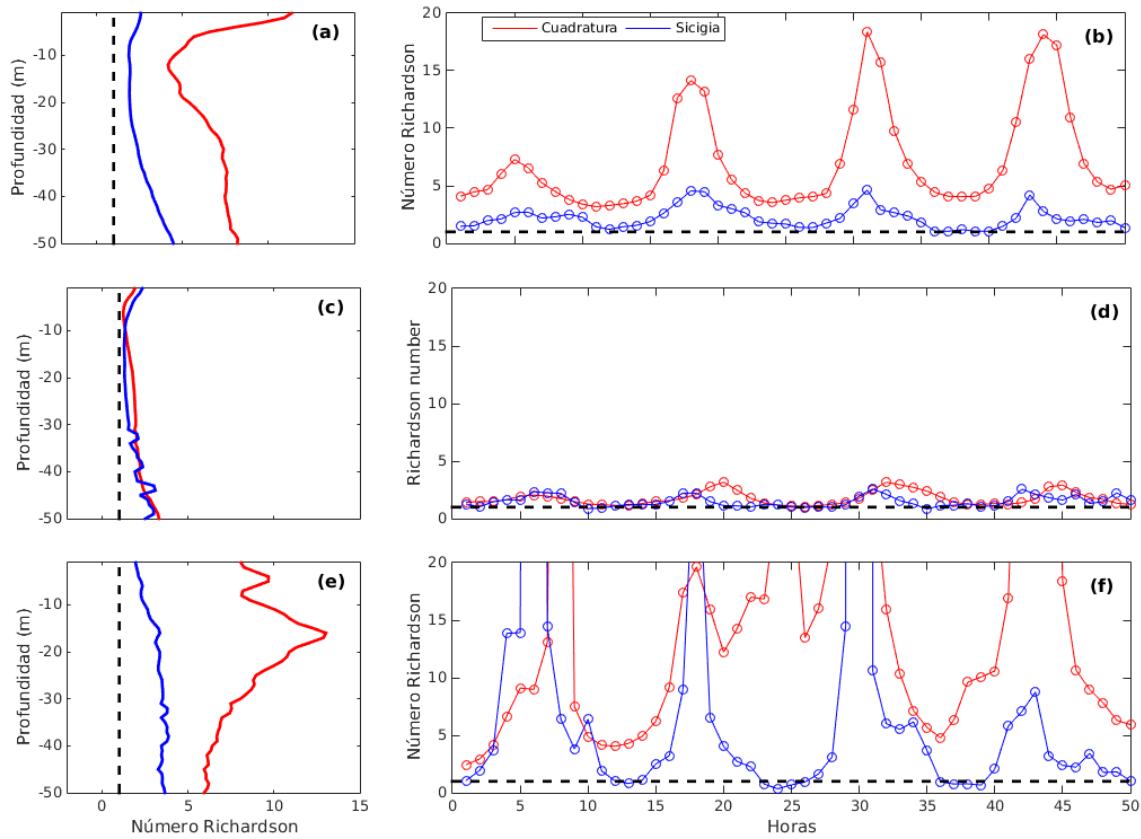


Figura 20: Perfiles verticales y series de tiempo de número de Richardson durante siccigia y cuadratura. (a y b) Esquema KPP, (c y d) Esquema BVF, y (e y f) Esquema KKL

La periodicidad se puede observar tanto en siccigia como en cuadratura en las simulaciones usando el esquema KKL (Fig. 20f). Los valores de R_i indican que el agua muestra que los primeros 30 metros de la columna de agua estuvieron bien mezclados durante ambos períodos, con la diferencia de que hay momentos durante las mareas bajas cuando la columna de agua está más estratificada. Los perfiles medios son similares a los encontrados en KPP durante siccigia, mostrando una columna de agua bien mezclada. La principal diferencia es en el sentido del perfil medio durante cuadratura. Por ejemplo entre 10 y 20 m el esquema KPP muestra un valor de R_i menor a 5 mientras que KKL muestra un valor de R_i de ~ 15 (Fig. 20e), lo que indica que en esta profundidad KPP tiende a ser una columna de agua más mezclada.

El R_i no excedió de 5 durante siccigia ni cuadratura en la simulación de BVF y fue inferior a 1 durante la marea baja (Fig. 20d). La columna de agua se estratifica durante

cuadratura, con períodos con más mezcla vertical durante marea baja. En términos generales, el perfil medio durante sicigia y cuadratura se mantuvo bien mezclado (Fig. 20c).

Dados estos resultados MOSA-ROMS seguirá ocupando el esquema KPP para la mezcla de turbulencia vertical.

5.1.3 Mejoramiento y evaluación de MOSA-WRF.

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 de resolución espacial y las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del dominio de MOSA. El periodo escogido para la evaluación de los pronósticos (MOSA-WRF 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 – 15/01/20 y se estudiaron las variables magnitud y dirección del viento, mediante rosas de viento y presión atmosférica a través del análisis error medio absoluto. 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 presión atmosférica se consideraron las cinco estaciones meteorológicas instaladas y mantenidas por personal de IFOP-Putemún.

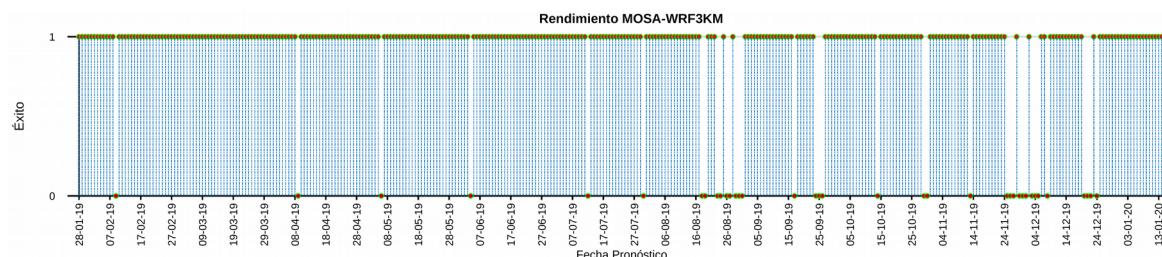


Figura 21: Rendimiento del sistema MOSA-WRF3km para el periodo 28/01/18 – 15/01/20.

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 21 se puede apreciar el rendimiento de este dominio desde su comienzo hasta el 15 de enero de 2020, ya que luego de esta fecha, se experimentó una serie de problemas técnicos los cuales dieron paso a la interrupción de esta versión preliminar. En la figura, un valor 1 indica que el pronóstico fue exitoso y un valor 0 si el pronóstico sufrió alguna caída de cualquier índole. Se pueden apreciar en 37 ocasiones un pronóstico defectuoso de un total de 353 corridas. Esto significa que MOSA-WRF3km alcanzó un ~ 89.5 % de estabilidad. El mayor número de fracasos consecutivos se percibieron principalmente a fines de noviembre y principios de

diciembre, resultado de una seguidilla de inconvenientes asociados a la red y al estado de los nodos de cálculo propiamente tal. Destacar que estas pruebas se realizan en los computadores que se encuentra en dependencias de IFOP-Putemún en donde se alojan diversas pruebas que no son de carácter oficial.

En Cucao podemos apreciar una componente principal en la dirección del viento con mayores magnitudes y frecuencia provenientes del noroeste y norte (Fig. 22). Junto a estas, le sigue una importante componente con origen en el suroeste con intensidades menores y una frecuencia del ~10 % de ocurrencia. Al observar las salidas pronosticadas, podemos afirmar que los sistemas MOSA-WRF y MOSA-WRF3km logran reproducir las componentes de mayor frecuencia y magnitud 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 cual MOSA-WRF3km logra reproducir de manera más ajustada en términos de frecuencia.

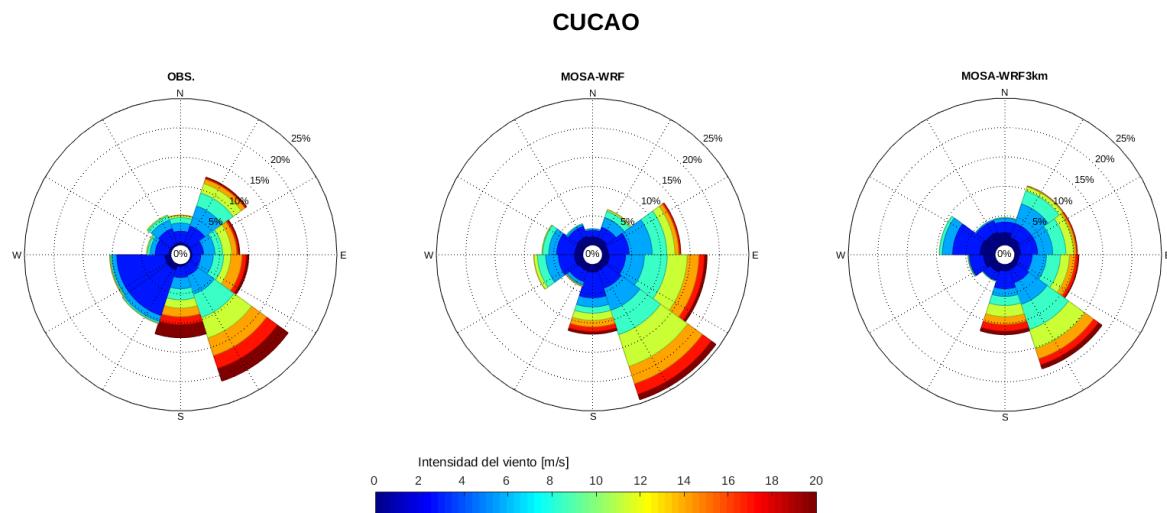


Figura 22: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF y MOSA-WRF3km en Cucao durante el periodo 28/01/19 – 15/01/20.

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. 23). Ambos pronósticos resolvieron como componente principal vientos procedentes del norte, sin embargo la componente en el eje noreste–suroeste fuertemente influenciada por la topografía solo fue resuelta por el pronostico MOSA-WRF3km.

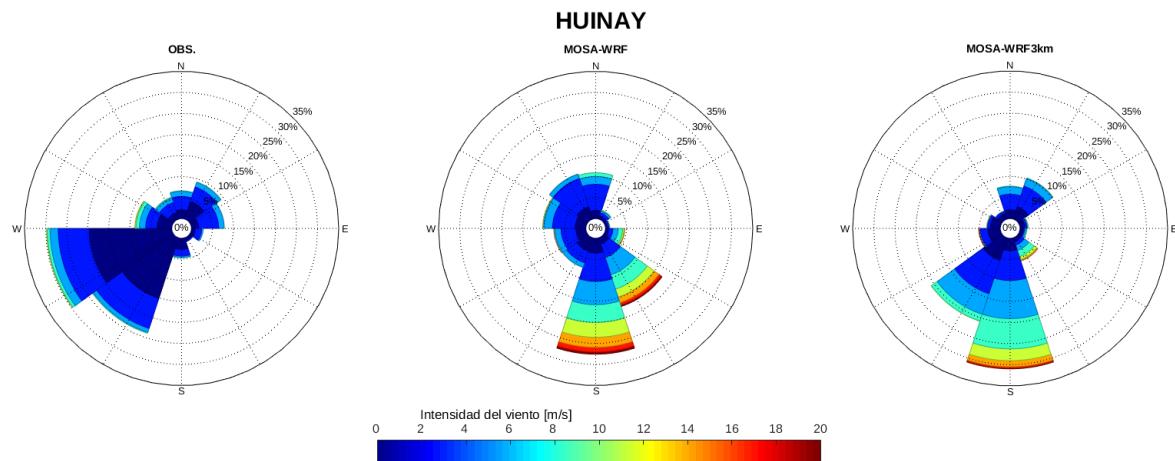


Figura 23: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF y MOSA-WRF3km, en Hunay durante el periodo 28/01/19 – 15/01/20.

Para el caso de la presión atmosférica se cuantificó el error medio absoluto (MAE) en todas las estaciones disponibles, evidenciando una notable mejoría luego de aumentar la resolución espacial del pronóstico a 3 km (Fig. 24), siendo Huinay y Marimeli las estaciones que presentaban un error de mayor magnitud, principalmente relacionado con el sesgo derivado de la incorrecta representación de la topografía presente en esta área. Dicho error fue minimizado por el modelo de mayor resolución, lo que nos permite afirmar que existe mayor precisión a la hora de resolver este terreno montañoso y así representar de manera más realista la altura del terreno en donde se están resolviendo las ecuaciones que gobiernan la atmósfera.

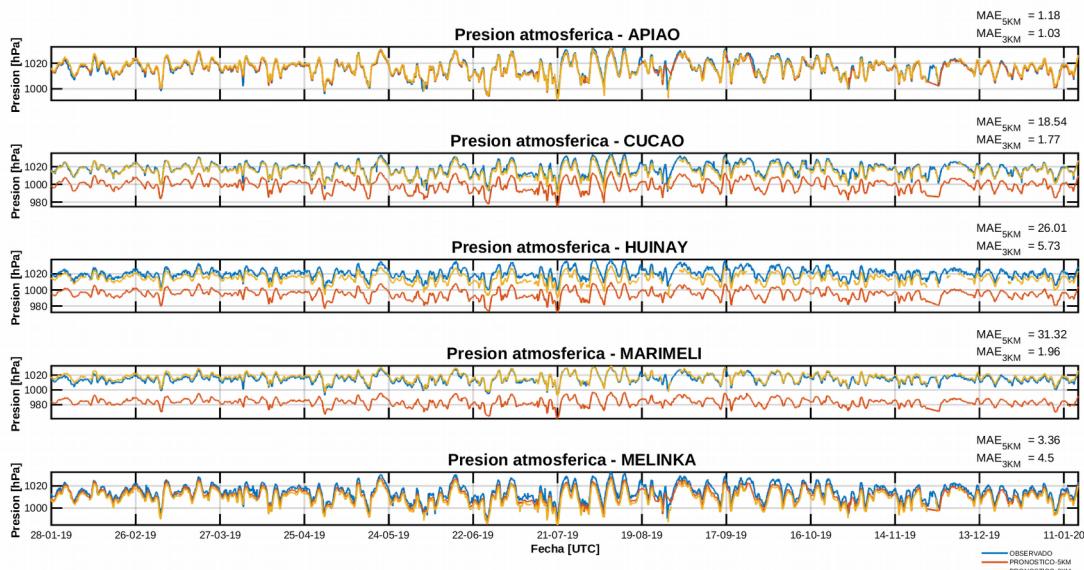


Figura 24: Presión atmosférica para la estación de Cucao entre 28/01/19 – 15/01/20. En azul se muestran datos observados, en rojo MOSA-WRF y amarillo MOSA-WRF3km.

Con respecto al forzante alternativo, en primer lugar se intentó utilizar el producto Europeo perteneciente a la ECMWF, Era-Interim. Sin embargo, el uso de este producto no es de libre acceso por lo que debe ser comprado. Esto desechó la alternativa de utilizar este producto como forzante del sistema MOSA-WRF. De todos modos, no se descarta la opción de concretar, alguna alianza de trabajo sin fines de lucro con esta institución y así obtener esta la información de manera libre.

El primer producto posible de utilizar como alternativa fue la salida del modelo GDPS, de Canadá (https://weather.gc.ca/grib/grib2_glb_25km_e.html). Para este producto se desarrolló un nuevo archivo Vtable, el cual es fundamental para reconocer los forzantes en la etapa de pre-procesamiento del modelo. Sin embargo no fue posible emplear esta base de datos ya que no posee información sobre temperatura y humedad subsuperficial en diferentes niveles, no reuniendo así las condiciones básicas para ser usado como alternativa a GFS.

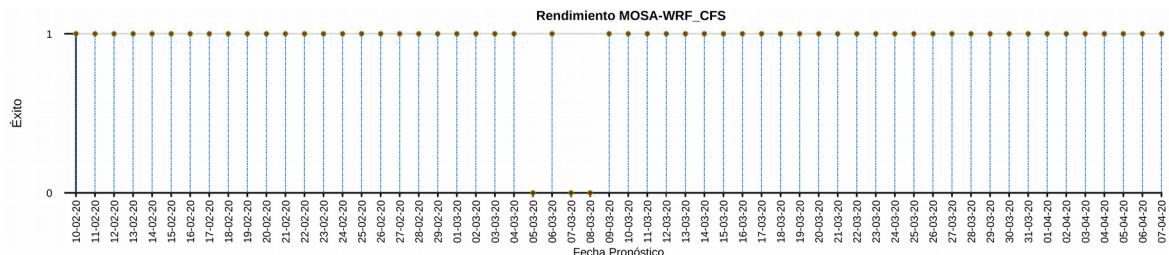


Figura 25: Rendimiento del sistema MOSA-WR_CFS para el periodo 10/02/20 – 07/04/20.

La segunda alternativa que se intentó implementar fue la del producto ARPEGE, modelo de Meteo France (https://donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=produit&id_produit=130&id_rubrique=51), el cual debió ser sometido a un procesamiento antes de ser utilizado por WPS, ya que los datos se descargan en paquetes por rangos de tiempo y variables. Para utilizar estos datos es necesario modificar el archivo Vtable de ECMWF, agregando información de GRIB2 de estos mismos. Lamentablemente dentro de estos paquetes de información, no existe la variable de temperatura y humedad del suelo subsuperficial. Además estos datos se descargan por periodos de 24 horas, aunque la información sea cada 6 horas, por lo que se debe realizar un procesamiento extra para separar los datos en archivos cada 6 horas, convirtiendo esta metodología en un proceso tedioso y sujeto a errores.

El tercer y definitivo producto encontrado fueron las salidas del “Climate Forecast System” de NCEP (<http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/prod/cfs/>), el cual cumple con los requisitos de formato, variables necesarias y actualización diaria, por lo que se creó un código numérico para su descarga automática por 102 horas. La descarga de estos datos se realiza en dos partes: datos por niveles de presión (archivos “PGBF”) y datos

de superficie (archivos “FLXF”). Finalmente, se utiliza el Vtable por defecto de WRF para el producto CFSR.

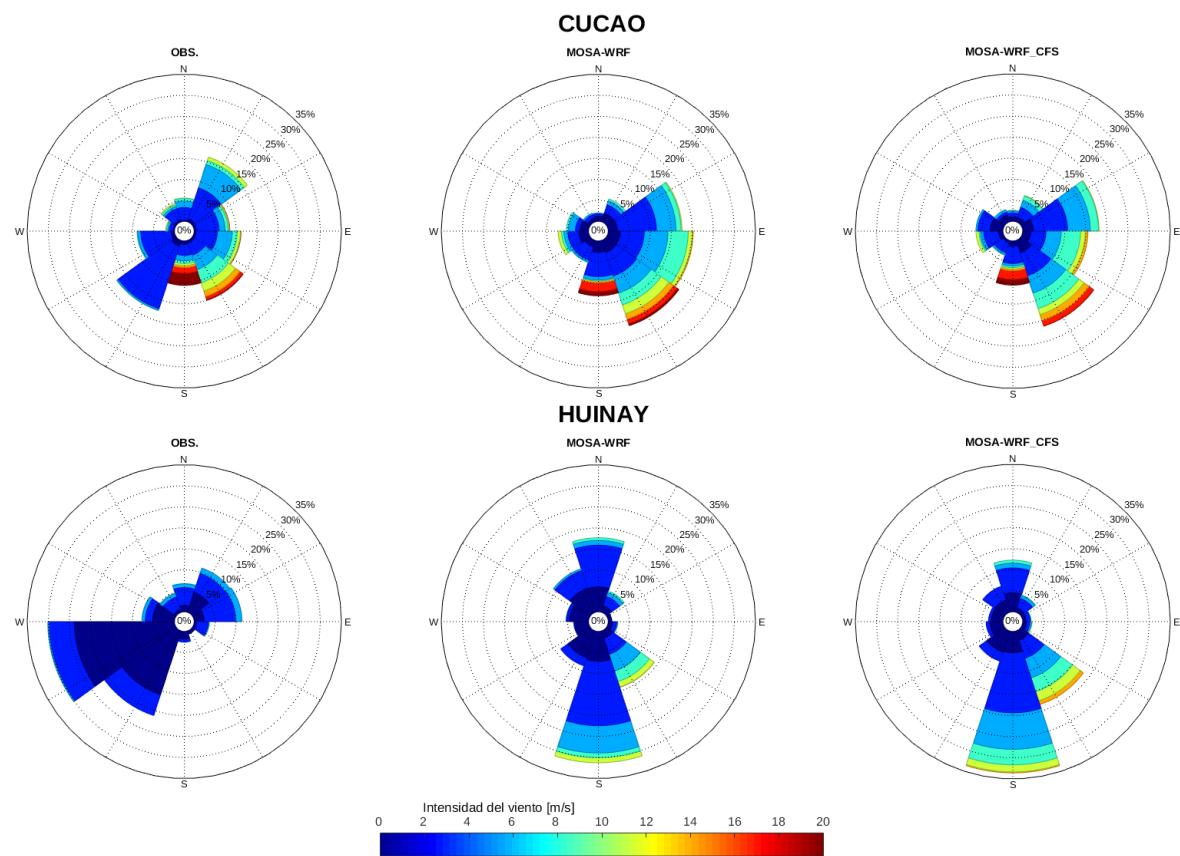


Figura 26: Rosas de viento para los datos observados y modelados con MOSA-WRF y MOSA-WRF_CFS en Cucao y Huinay durante el periodo 10/02/20 – 07/04/20.

Para llevar a cabo la evaluación de este producto, se implementó un pronóstico alternativo a MOSA-WRF forzado con estas nuevas condiciones iniciales y de borde, al cual llamaremos MOSA-WRF_CFS. La configuración y los procesos ejecutados para este nuevo sistema se efectuaron de manera similar a MOSA-WRF. MOSA-WRF_CFS se puso en marcha el 10/02/20 su rendimiento hasta el 07/04/20 ha sido estable (Fig. 25), en donde se observan solo 3 ocasiones de pronósticos fallidos, de un total de 58 corridas, lo que nos indica que ha sido un sistema con un ~95% de estabilidad.

La figura 26 presenta rosas de viento para las observaciones, MOSA-WRF y MOSA-WRF_CFS, en Cucao y Huinay representando condiciones altamente con influencia oceánica y de precordillera, respectivamente. Además de demostrar una contundente estabilidad, el pronóstico iniciado con este nuevo forzante es capaz de reproducir de manera similar los patrones de circulación de viento resueltos por MOSA-WRF forzado

con el producto GFS, lo cual nos demuestra ser una buena opción a la hora de utilizar como producto alternativo.

Finalmente, realizamos un experimento utilizando una técnica de asimilación de datos simple. La prueba consistió en combinar la condición inicial de las componentes del primer nivel vertical de viento U y V de MOSA-WRF del día 20 de julio del 2020 con los mismos datos U y V grillados cada 10 elementos de grilla con una condición inicial de U y V del 10 de julio del 2020, para luego volver a lanzar 1 simulación a 72 horas con esta nueva condición inicial “perturbada” correspondiente al día 20 de julio de 2020 (Fig. 27).

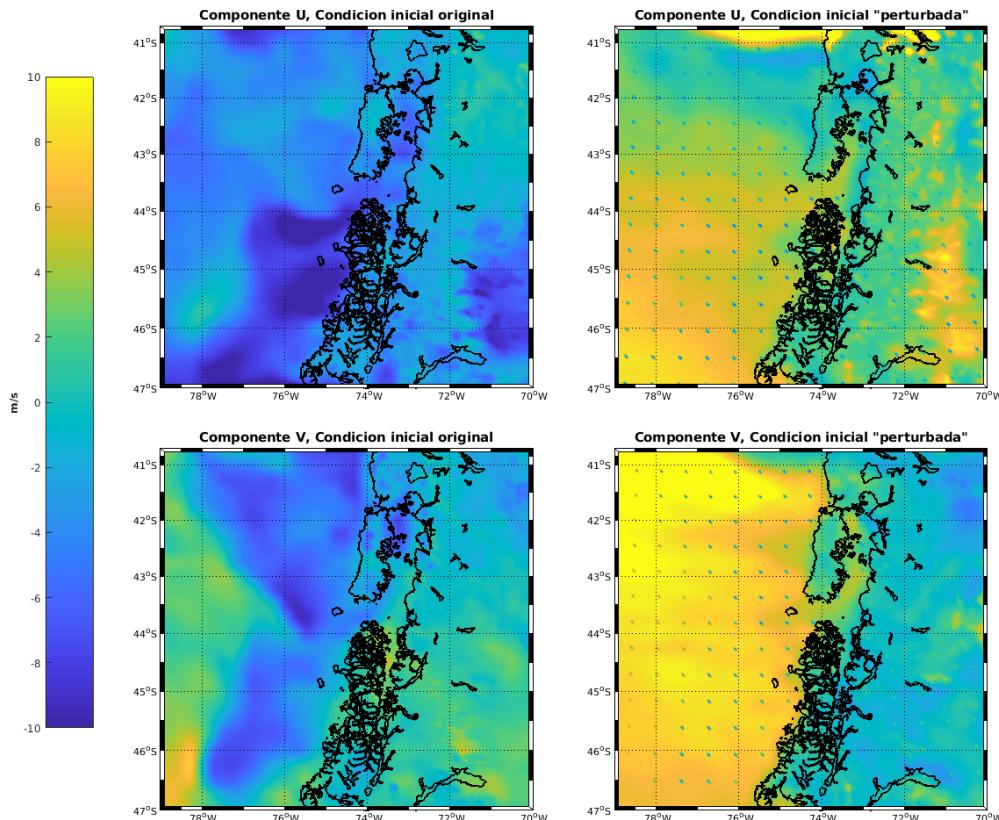


Figura 27: Condiciones iniciales utilizadas en el experimento de asimilación de datos. Panel superior izquierda U original, derecha U “perturbada”. Panel inferior, izquierda V original y derecha V “perturbada”.

Se utilizaron 3 puntos de control para comparar las diferencias que existieron entre estos dos pronósticos para las variables U y V del primer nivel vertical (nivel “perturbado”). Se puede apreciar que las mayores diferencias se obtuvieron para las primeras 6 horas de pronóstico (Fig. 28). Estos rangos de diferencia disminuyeron notablemente después de este intervalo, llegando a valores que tienden a 0. Por otro lado se puede afirmar que la mayor diferencia se presentó para el punto de control ubicado sobre el océano abierto llegando a un valor por sobre los -6 m/s en su condición inicial.

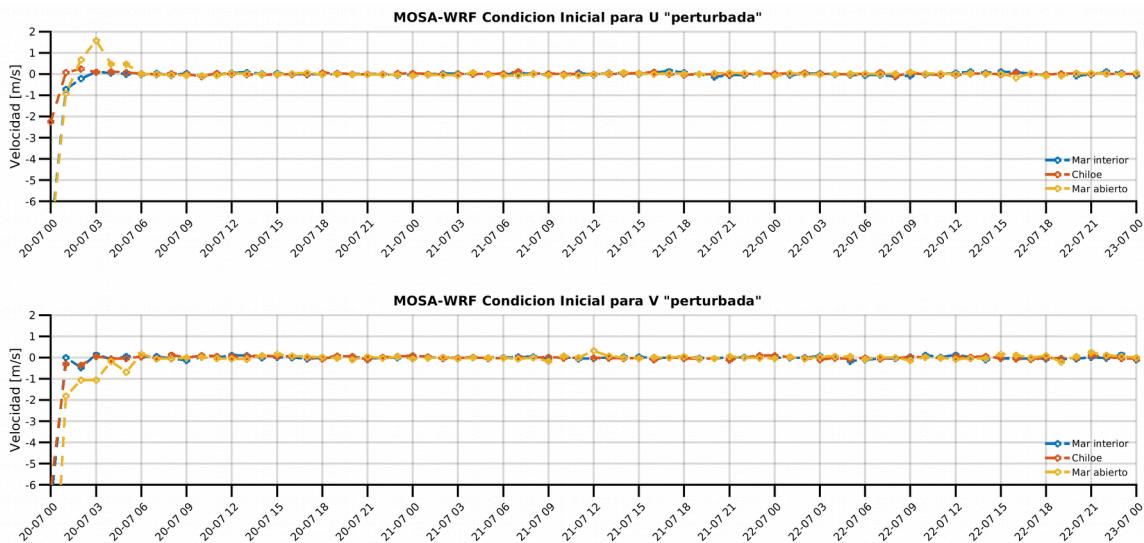


Figura 28: Series de tiempo para 3 puntos de control de la diferencia entre MOSA-WRF original y MOSA-WRF “perturbado”. En azul punto extraído en el mar interior de Chiloé, en rojo punto sobre la isla de Chiloé y amarillo punto sobre mar abierto. Panel superior muestra el pronóstico para variable U y panel inferior para variable V.

Podemos complementar la información anterior con los campos promedios de las diferencias entre los resultados de los pronósticos con y sin asimilación de datos. Con esta información podemos destacar que la mayor variación espacial se resolvió sobre el mar abierto con valores por sobre 1.5 m/s en términos de su valor absoluto, tanto para U como para V (Fig. 29). Obteniendo valores inferiores para las zonas de mar interior y sobre la tierra para todo el dominio de MOSA-WRF, los cuales se acercan a 0 luego de las primeras 6 horas.

Esto nos permite inferir que el uso de datos asimilados debería ser como máximo cada 6 horas. Posterior a esta ventana de tiempo, la simulación numérica estará influenciada y regulada principalmente por las condiciones de borde, que justamente son ingresadas con esta frecuencia de tiempo. Por otro lado, las mayores diferencias son precisamente en dónde la dinámica está regulada por patrones sinópticos como el mar abierto, a diferencia del mar interior y las zonas sobre tierra en donde los patrones de circulación atmosférico son regulados fuertemente por condiciones más locales.

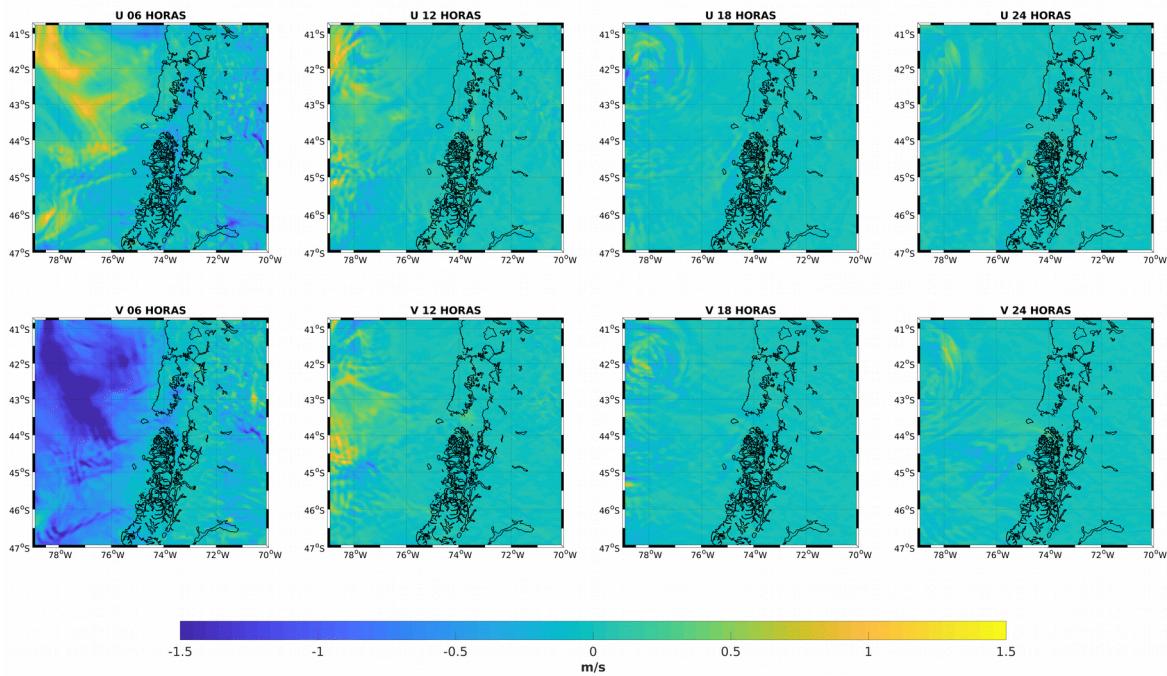


Figura 29: Campo del promedio de las diferencias entre los pronósticos del 20 de julio de 2020 sin y con asimilación de datos para las 06, 12, 18 y 24 horas. Panel superior Variable U. Panel inferior variables V.

5.1.4 Ingreso y evaluación de nuevos aportes de agua dulce.

Para esta actividad ocupamos un modelo hidrológico basado en el modelo VIC y desarrollado por Meteodata. VIC cuenta con estaciones fluviométricas de la DGA para la validación de sus resultados. VIC contiene caudales diarios para el periodo 1980 a 2017, para más de 30000 cuencas hidrográficas costeras. Actualmente MOSA-ROMS cuenta con información de fuentes puntuales que representan el aporte de 33 ríos en la región. El objetivo de esta actividad es utilizar nuevos aportes de agua dulce provenientes de VIC en los pronósticos oceanográficos de MOSA-ROMS para mejorar la representación del agua dulce superficial en la zona de fiordos y canales. A su vez, se espera evaluar los caudales actuales y corregir estos valores si es necesario.

Primero identificamos las 33 fuentes puntuales que usa actualmente MOSA-ROMS en VIC para comparar el ciclo anual de cada uno y evaluar las diferencias netas en aporte de agua dulce al sistema. En términos de variabilidad temporal podemos apreciar un ciclo estacional promedio con máximos en primavera-verano tanto en la caudales actuales como en VIC (Fig. 30). A su vez, se observa que los caudales totales de VIC son menores de los que usa actualmente MOSA-ROMS casi la mayor parte del tiempo. El caudal de VIC es mayor al actual solo en los meses de Mayo, Agosto, Septiembre y Octubre.

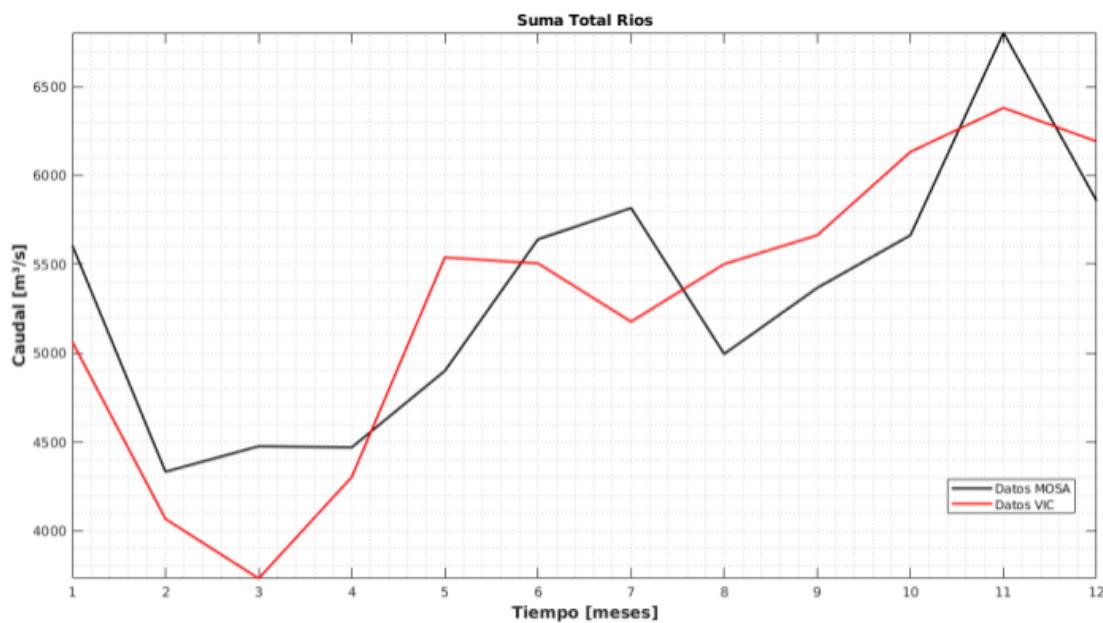


Figura 30: Serie de tiempo de los caudales promedio de los 33 ríos para el modelo MOSA-ROMS (negro) y para el modelo VIC (rojo).

Para ver el comportamiento zonal de los ríos estos fueron separados en dos grupos: la zona norte compuesta por 16 ríos entre la boca del Guafo y en el seno de Reloncaví, y la zona sur compuesta por 17 ríos entre el canal Moraleda y la laguna de San Rafael. Contrario a lo que se esperaba se observa que los valores que actualmente usa MOSA-ROMS son mayores que la fuente puntual en el modelo VIC tanto en la zona norte como sur del dominio (Fig. 31). Actualmente la zona norte presenta un aporte de agua dulce neto al sistema de $41129 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ mientras que el modelo VIC entrega un valor de $40455 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. De la misma manera la parte sur tiene actualmente un aporte de $23179 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ mientras que VIC muestra un valor de $22794 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Actualmente ingresa un caudal neto anual de $64308 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en contraste con los $63250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ que ingresarían eventualmente al utilizar VIC. El total de agua modelada por MOSA-ROMS es 1.67 % mayor al total de VIC. Comparando los valores actuales y los de VIC río a río observamos que solamente 3 ríos tienen valores de caudales significativamente mayores. Estos ríos corresponden a los ríos Palena, Cupquelan y Témpanos.

Dado que la primera comparación fue punto a punto y que modelo el balance de masa que considera VIC se distribuye en más de 30000 cuencas se realizó una nueva revisión considerando puntos cercanos a la fuente para sumar estos nuevos aportes. A su vez, se buscaron nuevas fuentes puntuales para agregar a MOSA-ROMS. De esta búsqueda se modificaron seis ríos para el modelo VIC y se encontraron dos nuevas fuentes puntuales. Los caudales de los ríos modificados en donde VIC corresponden a: Petrohué, Vodahue, Negro, Yelcho, Queulat y Cuervo. Sin embargo, al comparar con los caudales actuales que

utiliza MOSA-ROMS, solo los ríos Negro, Queulat y Cuervo presentan caudales significativamente mayores.

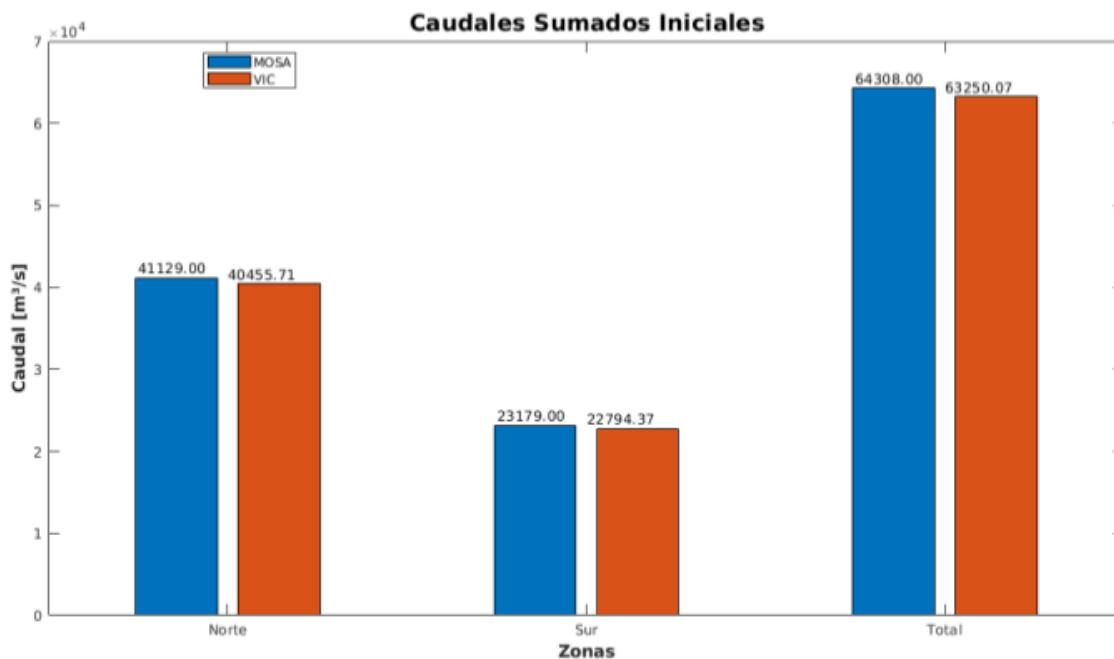


Figura 31: Caudal total de los 33 ríos para el modelo MOSA-ROMS (azul) y para el modelo VIC (naranjo)

En resumen, con el modelo VIC se actualizaron los valores de 6 ríos en los caudales actuales de agua dulce que ingresan al modelo y se agregaron 2 fuentes puntuales nuevas. Los ríos actualizados son: Palena, Cupquelan, Témpanos, Negro, Queulat y Cuervo. Con esto se tiene un caudal neto anual de $67104 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ lo que equivale a $2796 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de aporte de agua dulce extra al sistema.

5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional con observaciones oceanográficas históricas.

Dentro de la superficie que integra el dominio MOSA-ROMS existe escasa información confiable en tiempo real sobre las condiciones del océano, ya sea de variables como temperatura, salinidad o corrientes. Sin embargo existen productos satelitales que, si bien presentan algún rango de incertidumbre, entregan información significativa de la superficie del océano. Por consiguiente, se utiliza información satelital para evaluar el desempeño espacio-temporal de MOSA-ROMS empleando datos grillados de los productos satelitales AVHRR y VIRRS, para la temperatura superficial del mar (TSM) y SMAP, para la salinidad superficial (SSM).

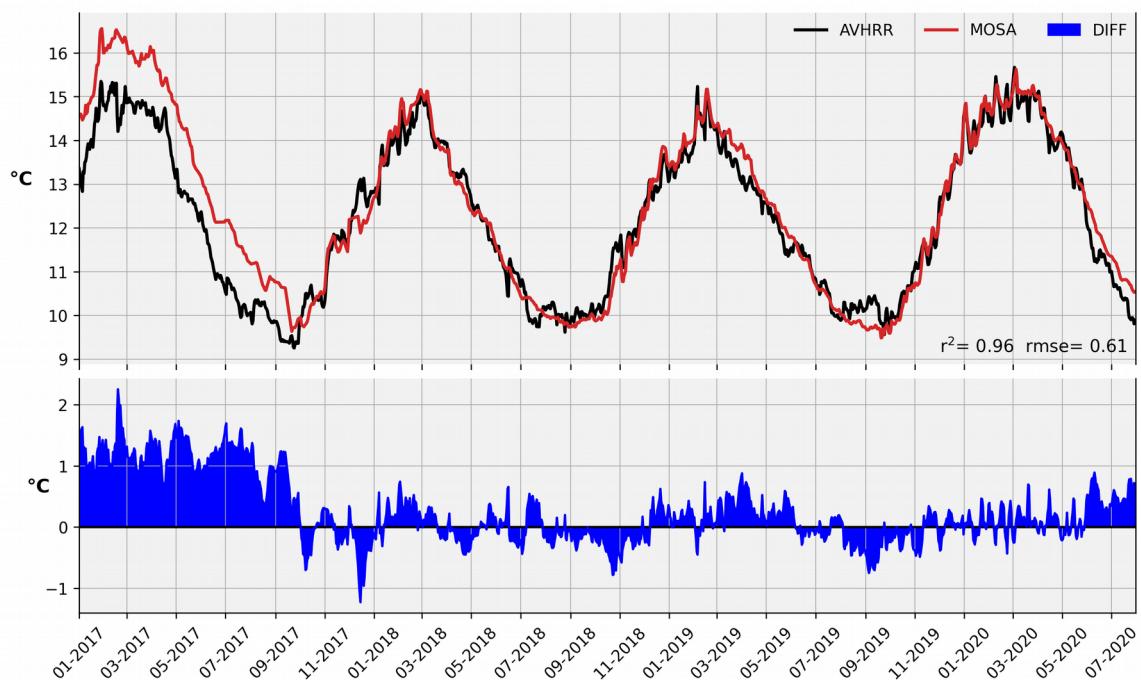


Figura 32: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA-ROMS y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y julio 2020.

Para evaluar la variabilidad diaria de TSM se comparó el pronóstico de MOSA-ROMS con el producto AVHRR, calculando promedios diarios y su diferencia para todo el dominio durante enero de 2017 y julio de 2020. Se puede observar un alto ajuste entre ambas series con una correlación de 0.96 (r^2) y un error cuadrático medio de 0.61 (rmse), para todo el periodo (Fig. 32). Diversos cambios y mejoras se han realizado a lo largo del desarrollo del sistema operacional, donde destacan el aumento y cambio de configuración de los niveles verticales tipo sigma, pasando de 32 a 42 niveles, ajustes a la máscara y batimetría, la incorporación de nuevas fuentes de agua dulce, además de la integración de la nueva versión del modelo oceánico ROMS-AGRIF, rebautizado como CROCO “Coastal and Regional Ocean Community model” (más información del proyecto en <http://www.croco-ocean.org/>) en octubre de 2019. Estos profundos cambios en la configuración de MOSA se ven reflejados en la validación del modelo, donde destaca un mayor ajuste entre las series a partir de septiembre de 2017, disminuyendo el sesgo más de 1 °C entre satélite y modelo. Desde 2019 a la fecha el modelo alcanzó una correlación de 0.99 (r^2) y un error cuadrático medio menor a 0.4. Esto refleja la habilidad del modelo de reproducir de manera optima la variabilidad estacional de la temperatura superficial, tanto en fase como en amplitud.

Por otra parte, se construyeron promedios mensuales con valores diarios de MOSA-ROMS y se comparó con datos mensuales de VIIRS mediante una serie de estadísticos que permiten evaluar el comportamiento del modelo. El pronóstico de temperatura superficial

presenta un alto ajuste dentro de todo el dominio, con un mejor desempeño en mar abierto donde se alcanzan correlaciones por sobre 0.9 (Fig. 33a). Como es de esperar, la calidad del pronóstico disminuye gradualmente hacia el mar interior de Chiloé-Aysén, debido en parte a la complejidad de simular el sistema por las características de la zona y a la resolución de las imágenes satelitales que no representan adecuadamente la región. Sin embargo, las correlaciones son suficientemente significativas con valores que oscilan entre 0.8-0.9, logrando reproducir la variabilidad estacional de la temperatura (Fig. 33a). Por otra parte, el rmse y el sesgo presentan un patrón espacial similar. Los máximos localizados en el mar interior de Chiloé-Aysén alcanzan valores de 1.3 °C en el caso de rmse (Fig. 33b), mientras el sesgo no supera ~1 °C (Fig. 33c). En mar abierto, el error y sesgo alcanzan valores mínimos casi nulos, que evidencian una mejor calidad del pronóstico en esta parte de la región.

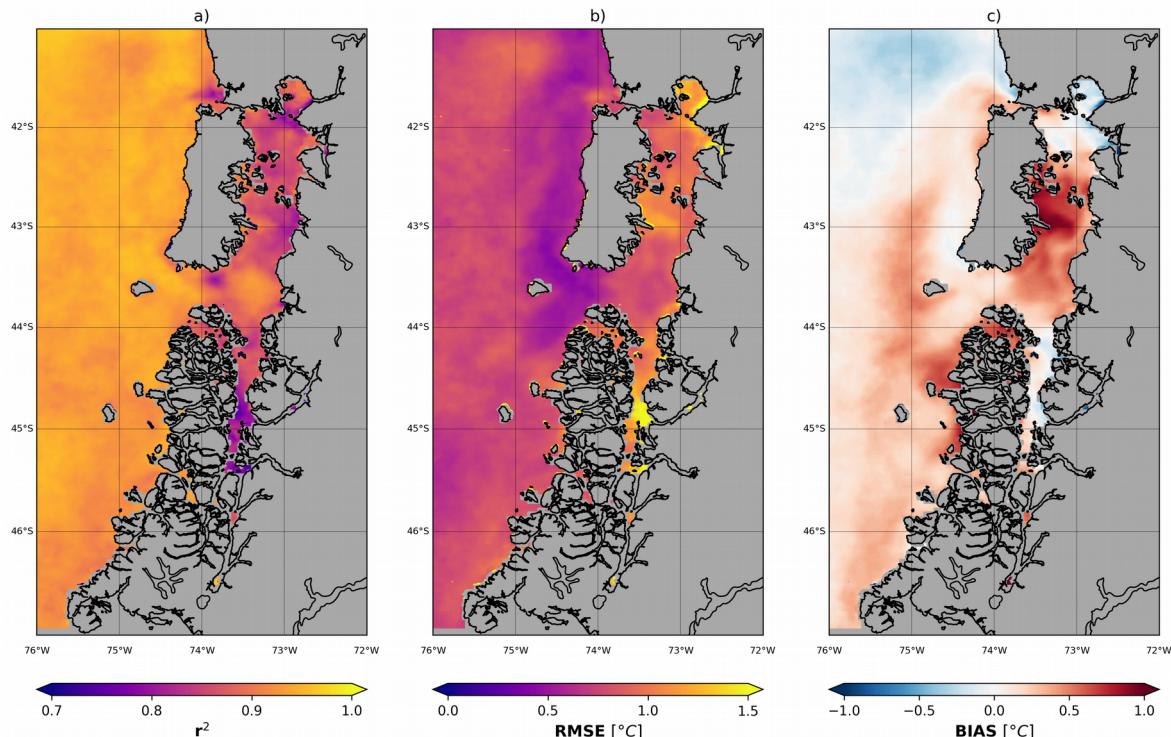


Figura 33: a) Correlación (r), b) Raíz del error cuadrático medio (rmse) y c) Sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MOSA-ROMS y VIIRS durante enero 2017 y mayo 2020.

Para determinar la capacidad del modelo de reproducir de manera optima la salinidad superficial se utilizó la base de datos mensual procedente del producto satelital SMAP, la cual tiene una resolución espacial de ~25 km. Sin embargo este producto no cubre los mares interiores de Chiloé-Aysén lo cual propicia un incremento del error en las zonas más cercanas a la costa. Esta información fue contrastada con promedios mensuales de SSM para el pronóstico de 1 día de MOSA-ROMS durante enero de 2017 y junio de 2020. Se observa que el mayor error está asociado al sector oriental del dominio alcanzando valores

de ~1 PSU (Fig. 34a). El cociente entre la desviación estándar simulada y modelada es ~1 en toda la región, lo que se traduce en una capacidad óptima del modelo en reproducir la amplitud de SSM, especialmente en la región costera entre 45 – 46 °S (Fig. 34b). Aunque esta información presenta un alto grado de incertidumbre permite obtener una mirada sobre la distribución de salinidad superficial estacional en la zona oceánica del modelo, donde es más complejo tener mediciones en terreno.

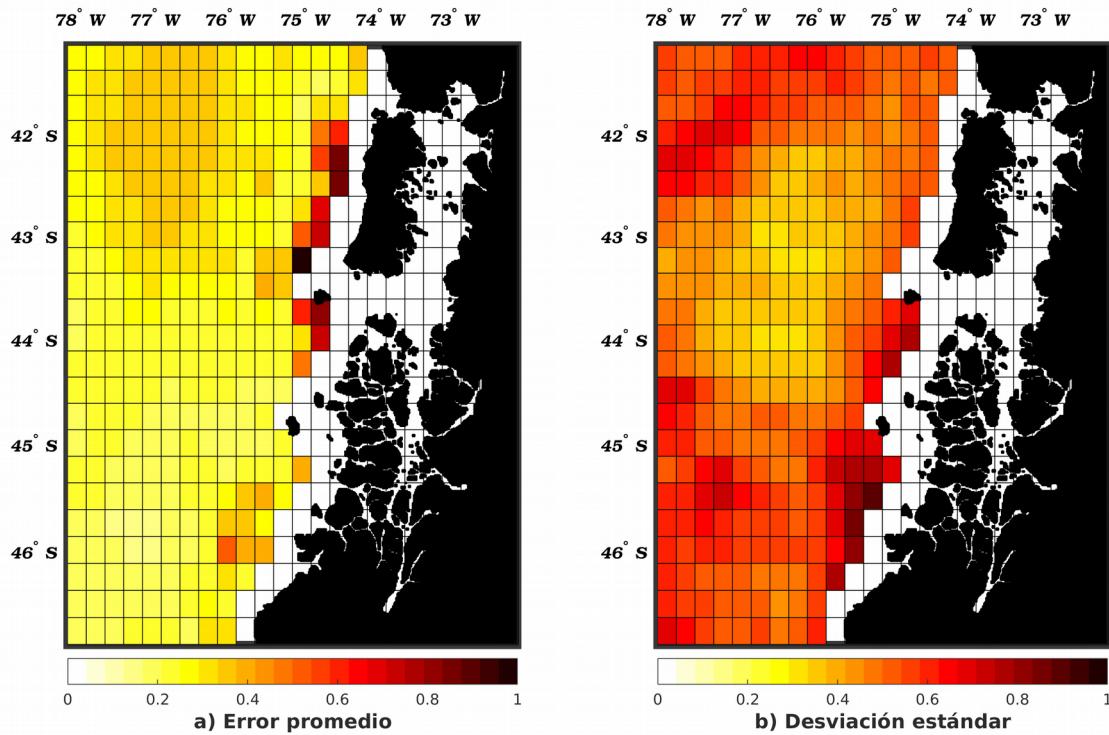


Figura 34: a) Error medio absoluto, y b) cociente de las desviaciones estándar entre el producto mensual SMAP y promedios mensuales de SSM MOSA-ROMS durante enero 2017 y junio 2020.

Para complementar el análisis de SSM durante 2017 y 2020 para ambos productos se calcularon promedios estacionales y se realizaron diagramas de regresión. Por lo general, se observa un buen ajuste entre ambas bases de datos, considerando la incertidumbre propia del producto satelital (Fig. 35). La temporada de primavera y de verano son las que presentan la correlación más alta alcanzando valores de 0.71 y 0.69, respectivamente. En invierno, la correlación alcanza el mínimo con 0.43. Se puede apreciar la presencia de valores escapados que sin duda hacen decaer la relación entre los datos, no obstante el grueso de la información presenta una buena correlación, dando cuenta de que el modelo responde a la variabilidad de la salinidad en superficie en la zona oceánica.

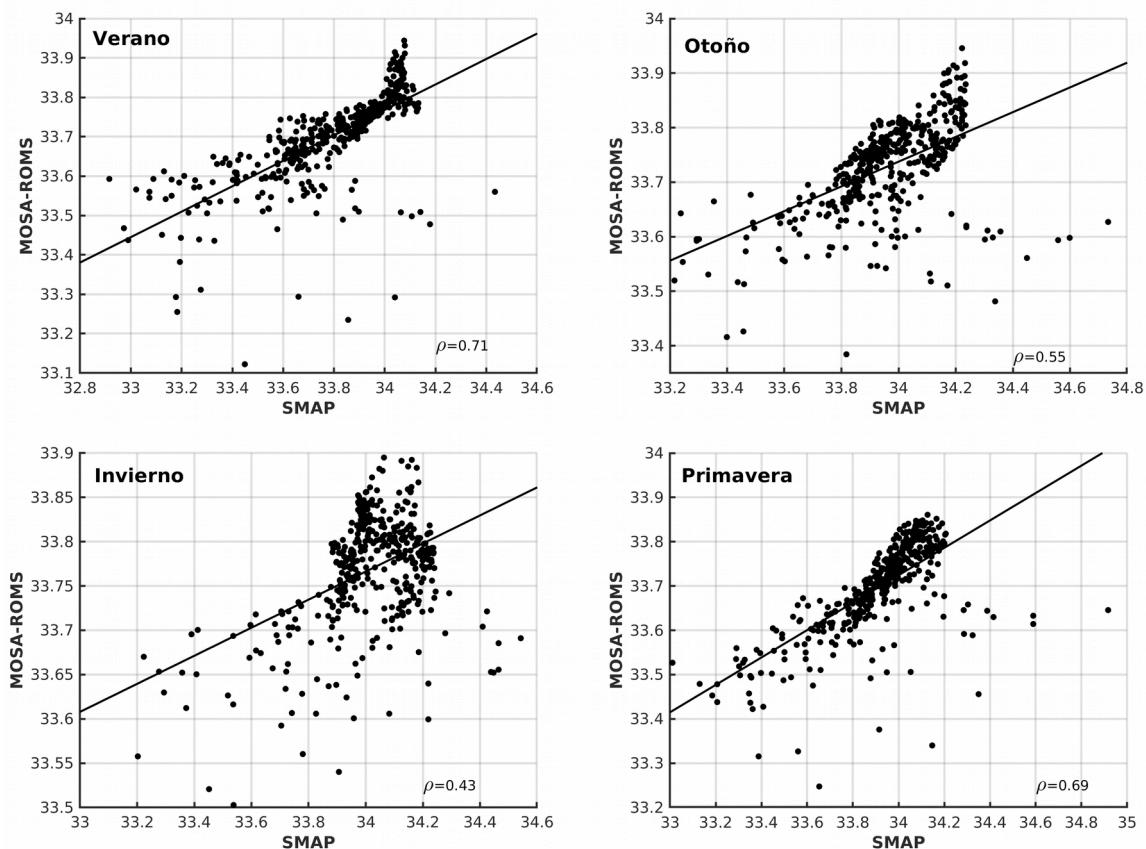


Figura 35: Regresión entre promedios estacionales de SSM de MOSA-ROMS y SMAP. Los puntos no incluyen la zona interior del mar Chiloé-Aysén.

Uno de los desafíos más importantes en la modelación oceánica se basa en la capacidad de poder reproducir de manera optima los procesos dinámicos que gobiernan las estructuras termohalinas, particularmente en una zona constituida por una serie de canales, fiordos, senos y bahías, que poseen características topográficas que juegan un importante rol en la distribución de los parámetros oceanográficos. A esto se le suma el importante aporte de agua dulce en la región a través de ríos y glaciares y una estructura del fondo marino compleja que puede generar bloqueos que restringen el intercambio de agua, generando zonas semi-aisladas con características oceanográficas particulares que las diferencian entre ellas. Estas características limitan tener información observacional distribuida espacialmente en todo el dominio MOSA-ROMS, por ende se utilizan las campañas oceanográficas realizadas 4 veces al año por IFOP en los mares interiores de Chiloé-Aysén durante los años 2017 al 2020 para analizar y tener una visión general de la distribución del campo de masas.

Se extrajo el promedio diario de temperatura y salinidad de MOSA-ROMS para cada una de las locaciones donde se realizaron lances de CTD, tomando cada uno de los niveles verticales simulados. A partir de ambas mediciones se construyeron diagramas TS para

cada una de las estaciones del año (Fig. 36). Se puede notar que el modelo es capaz de reproducir en términos generales las estructuras termohalinas, simulando el patrón de distribución observado en los lances de CTD, para cada una de las estaciones del año. A pesar de ello y como es de esperar, la mayor diferencia se da en profundidades someras, donde el modelo carece de valores bajos de salinidad en superficie debido a las dificultades ya mencionadas.

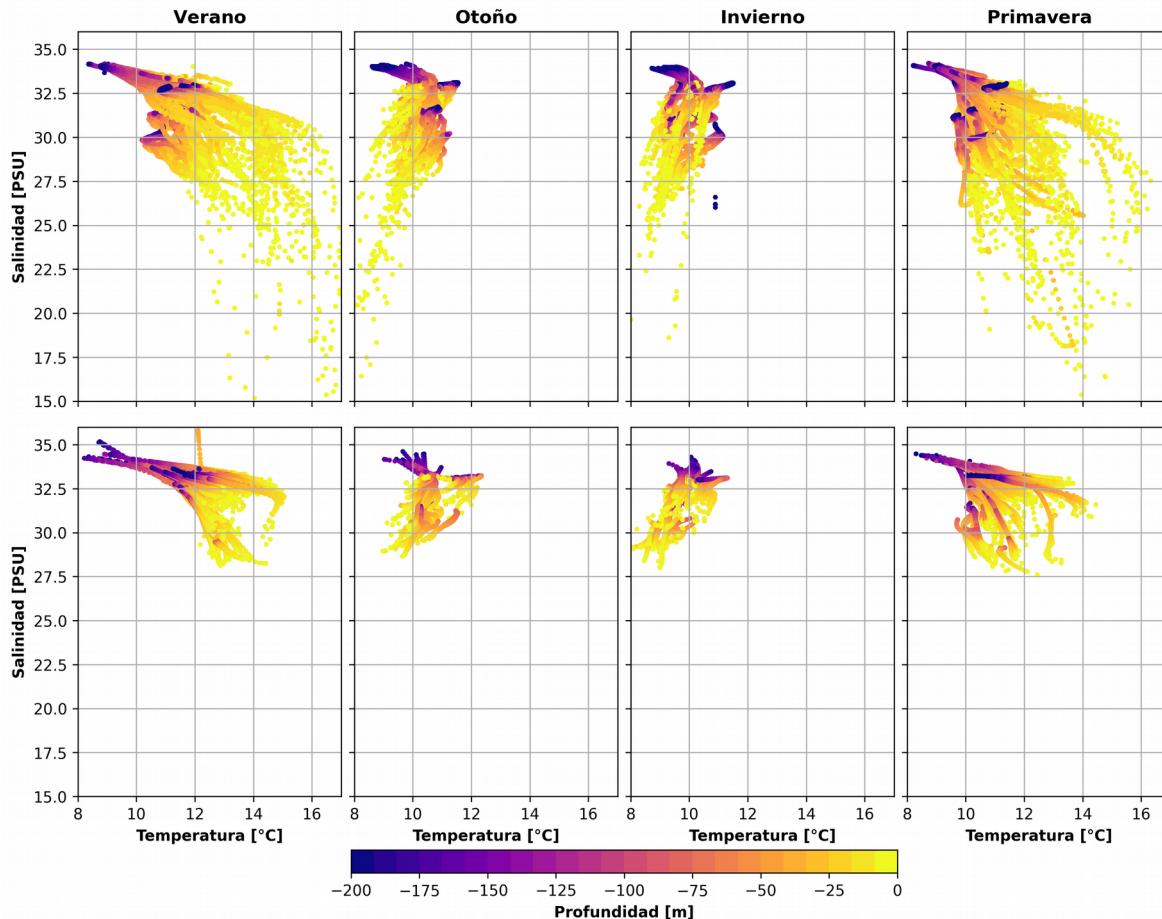


Figura 36: (paneles superiores) Diagramas T/S elaborados a partir de lances de CTD de campañas oceanográficas de IFOP en Chiloé y Aysén durante 2017-2020. (paneles inferiores) Diagramas T/S elaborados con perfiles de temperatura y salinidad extraídos de MOSA-ROMS para las mismas fechas de los lances de CTD. La barra de colores indica la profundidad.

De manera complementaria se presentan histogramas de estas mediciones con el objetivo de representar de manera individual la distribución de frecuencia de cada una de las variables (Fig. 37). Estos resultados reafirman un buen ajuste en los rangos de magnitud entre los lances CTD y MOSA-ROMS para ambas variables. Las frecuencias de magnitud se distribuyen de forma similar en salinidad y temperatura. Se observa una distribución más uniforme de la salinidad durante otoño e invierno. En el caso de la temperatura se observa una leve diferencia de ~ 1 °C en verano entre las mediciones CTD y el modelo

MOSA-ROMS, teniendo este mejor habilidad de pronóstico en el resto de las estaciones. En conclusión, el sistema operacional es capaz de reproducir a gran escala los patrones de estacionalidad de las masas de agua dentro del dominio.

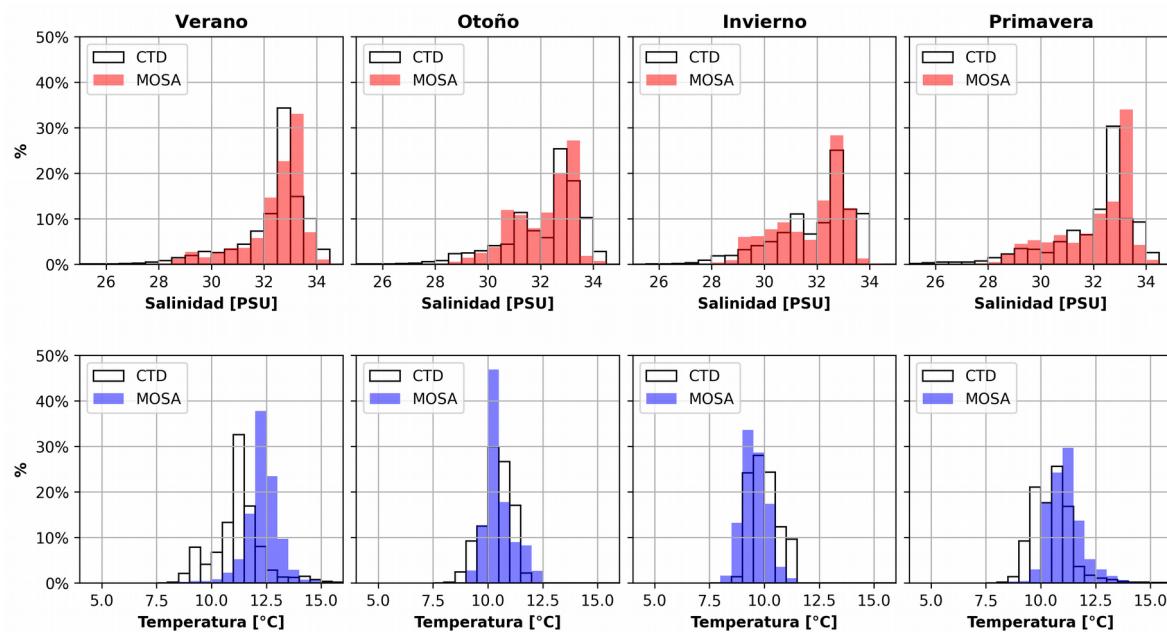


Figura 37: Frecuencias de magnitud en porcentaje de salinidad (paneles superiores) y temperatura (paneles inferiores), para las mediciones de lances CTD de las campañas IFOP 2017-2020 y MOSA-ROMS en el mismo periodo y locaciones.

Por otro lado, una boya oceanográfica ubicada en el seno de Reloncaví es prácticamente la única fuente de información oceanográfica en tiempo real que actualmente se encuentra operativa dentro del dominio de MOSA-ROMS. Esta información puntual permite comparar el pronóstico del modelo a una resolución de escala sinóptica. Para esto se calcularon promedios diarios de salinidad y temperatura en la boya y se compararon con las simulaciones del punto más cercano extraído del dominio MOSA-ROMS. La información fue acotada entre septiembre de 2019 y junio de 2020, periodo que corresponde con la integración de la nueva versión del modelo oceanográfico (CROCO) y cambios en la batimetría de la región. Se puede observar la temperatura exhibe un alto ajuste con un coeficiente de correlación que alcanza los 0.9 (r^2) y un error cuadrático medio de 1.25°C en todo el periodo (Fig. 38a). Evidentemente el modelo tiene la capacidad de simular la variabilidad sinóptica de la temperatura en la ubicación de la boya, sin embargo en el caso de la salinidad la situación es un poco más compleja. Con los últimos cambios incorporados al modelo es capaz de reproducir cierta señal de variabilidad en la zona con un coeficiente de correlación de ~ 0.5 y una diferencia en la amplitud de 3.75 PSU como promedio (Fig. 38b). El importante aporte de agua dulce realizado por el río Puelo, la geomorfología del seno Reloncaví y otros procesos locales, juegan un rol importante en la variabilidad y dinámica del océano en la zona, de modo que en

IFOP se están aplicando constantes esfuerzos para avanzar en la comprensión y mejoramiento de la modelación a esta escala.

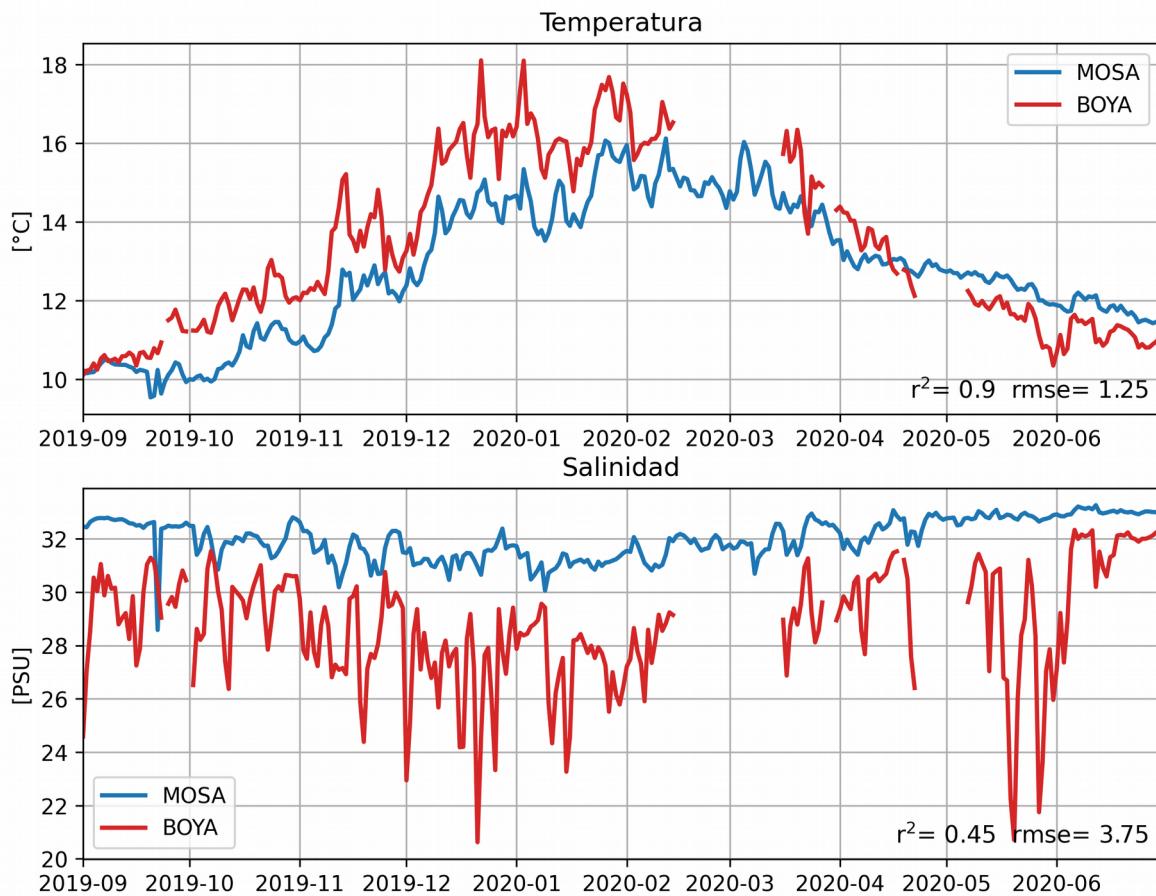


Figura 38: Series de tiempo de temperatura (panel superior) y salinidad (panel inferior) medidas por la boyas i~mar y su punto más cercano dentro del dominio MOSA-ROMS, entre Septiembre 2019 y Julio 2020. La discontinuidades en la serie (rojo) representan periodos sin información en la boyas.

De manera análoga, los procesos asociados a la dinámica de la corriente resultan complejos de predecir. Para evaluar el desempeño de MOSA-ROMS en este ámbito se utilizaron dos ADCP operados durante las campañas oceanográficas de IFOP instalados en la zona del canal Moraleda y Boca del Guafo. El primero registró información de los primeros 65 m durante agosto de 2018 y marzo de 2019 y el segundo lo hizo entre los 10 y 66 m en el periodo agosto 2018 y junio 2019. Los datos se descompusieron en componentes ortogonales y llevados a promedios horarios, para posteriormente ser integrados en la columna de agua. Esta información fue comparada con las componentes de velocidad integradas de MOSA-ROMS para las mismas profundidades registradas por los anclajes.

Con las componentes ortogonales se elaboraron diagramas de dispersión de las corrientes y se compararon con los resultados de MOSA-ROMS. En el canal Moraleda la

corriente presenta una orientación norte-sur y en Boca del Guafo es noreste-sureste. Ambos ejes de máxima varianza prácticamente coinciden entre el modelo y las mediciones ADCP, con leves desviaciones de $\sim 3^\circ$ y $\sim 1^\circ$ hacia el este, respectivamente (Fig. 39a,c). En ambos casos, se observa una sobreestimación de la intensidad del flujo, siendo más evidente en Boca del Guafo y particularmente hacia el norte en canal Moraleda. Sin embargo, en ambos casos la mayor densidad de las mediciones se ajustan de manera correcta.

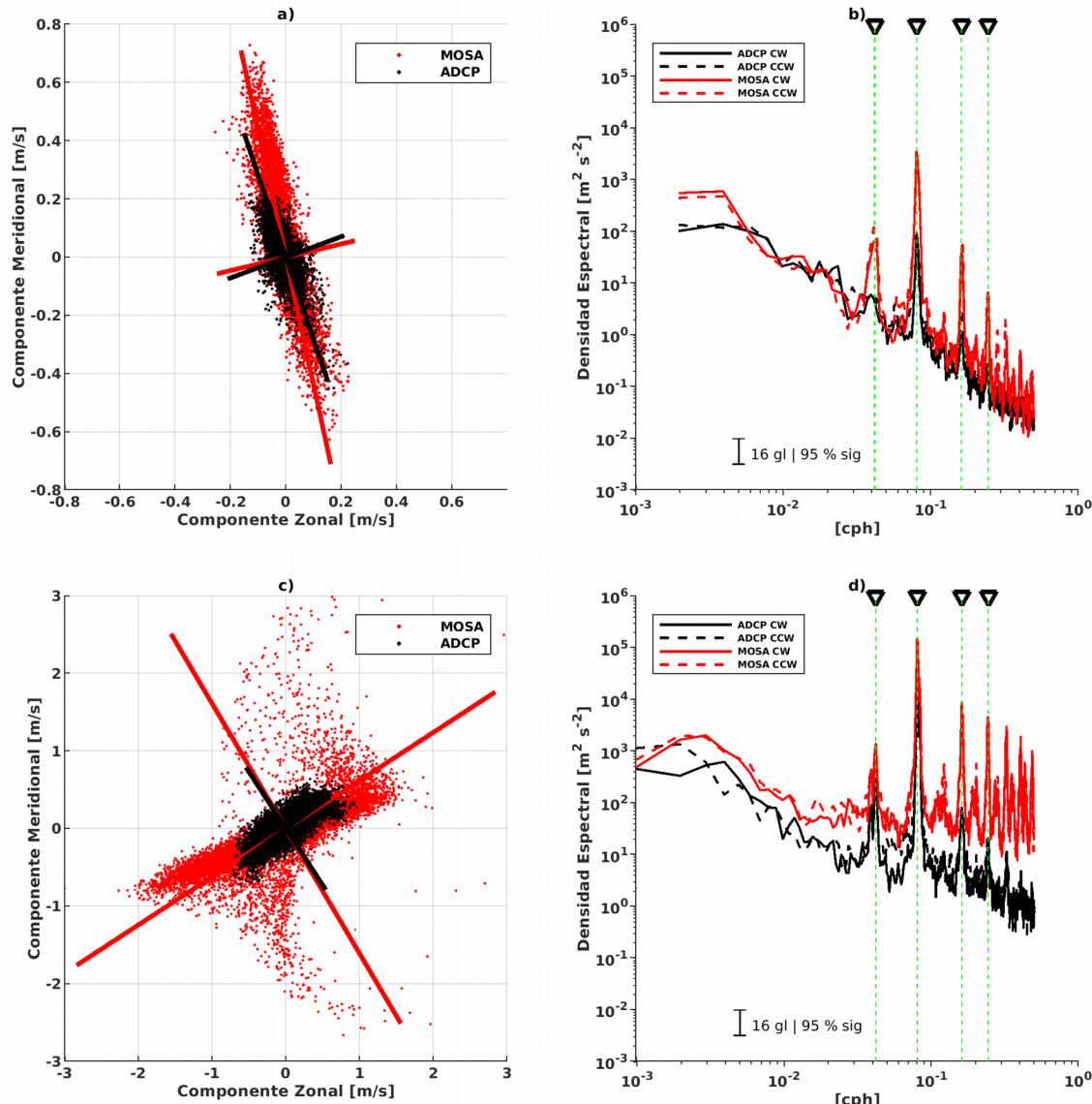


Figura 39: (a) y (b) Diagramas de dispersión de las componentes ortogonales y espectros de energía de la corriente para los ADCP y MOSA-ROMS en canal Moraleda. (c) y (d) Igual que (a) y (b) pero para la Boca del Guafo.

Por otra parte se calcularon las densidades espectrales de potencia alcanzando una cantidad de energía similar en canal Moraleda (Fig. 39b) y levemente sobreestimadas por el modelo en Boca del Guafo (Fig. 39d). En ambos casos los máximos espectrales se

encuentran bien definidos en las bandas diurnas y semi-diurnas, como también en algunas frecuencias mayores, cercanas a las 6 y 4 horas. 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.

Actualmente MOSA-WRF se encuentra operando desde el 20 de Julio del año 2018. La figura 40 muestra el rendimiento de MOSA-WRF hasta el 11 de agosto de 2020, indicando con un número 1 si el pronóstico fue exitoso y con un 0 si el sistema se cayó por algún motivo. Podemos observar que el sistema se ha mantenido estable, presentando un 97.9% de efectividad, experimentando solo en 16 ocasiones pronósticos defectuosos o incompletos de un total de 754. 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. Cabe destacar que en el transcurso del tiempo han ido disminuyendo considerablemente los pronósticos fallidos.

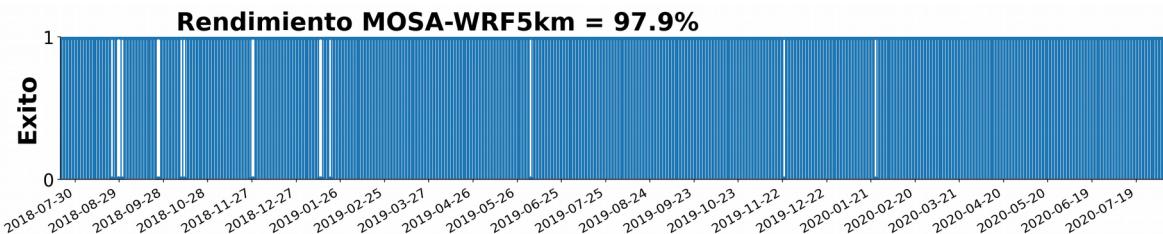


Figura 40: Rendimiento del sistema MOSA-WRF de 5 km durante el 20/07/18 y 11/08/20.

Realizamos una evaluación de los vientos de MOSA-WRF con datos de estaciones meteorológicas mediante un análisis de ondeleta (*wavelet*). Podemos apreciar que MOSA-WRF logró representar el patrón temporal durante el tiempo de operación del sistema en la estación de Apiao. Se identifica una banda de energía significativa para los períodos entre 4 y 8 días y entre 16 y 32 días, el cual logra resolver su mayor intensidad entre los meses de mayo y septiembre de 2019 (Fig. 41). Este primer periodo y en donde se observa la máximos valores de energía, hace referencia a procesos de escala sinóptica, los cuales se traducen al ingreso de sistemas frontales, presentes con amplia frecuencia en esta zona, principalmente en la estación invernal. Por otro lado el segundo máximo de energía que se destaca, es entre los períodos de 16 y 32 días correspondientes a procesos de escala intra-estacional.

Para la estación de Cucao, se observó que la variabilidad del viento modelado y observado tiene un comportamiento similar. Al igual que en Apiao se destaca una banda de energía en la escala sinóptica de 4 y 8 días y luego entre los 16 y 32 días asociados a procesos intra-estacionales. Estos bandas de energía están bien representadas por el modelo MOSA-WRF. Además se observa uno banda de energía de menor potencia para el periodo

de 1 día asociado al ciclo diario del viento, posiblemente asociado a procesos costeros como brisa marina (Fig. 42).

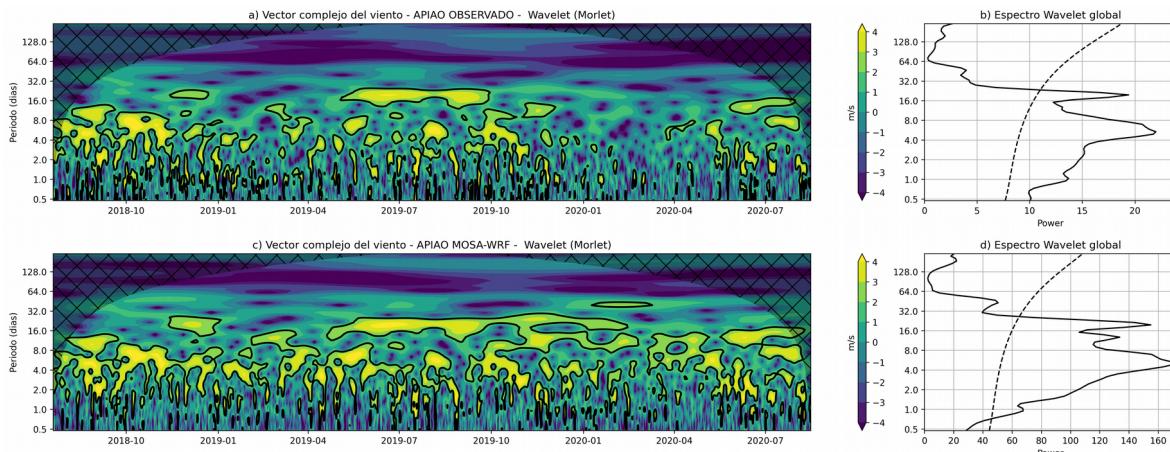


Figura 41: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Apiao. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.

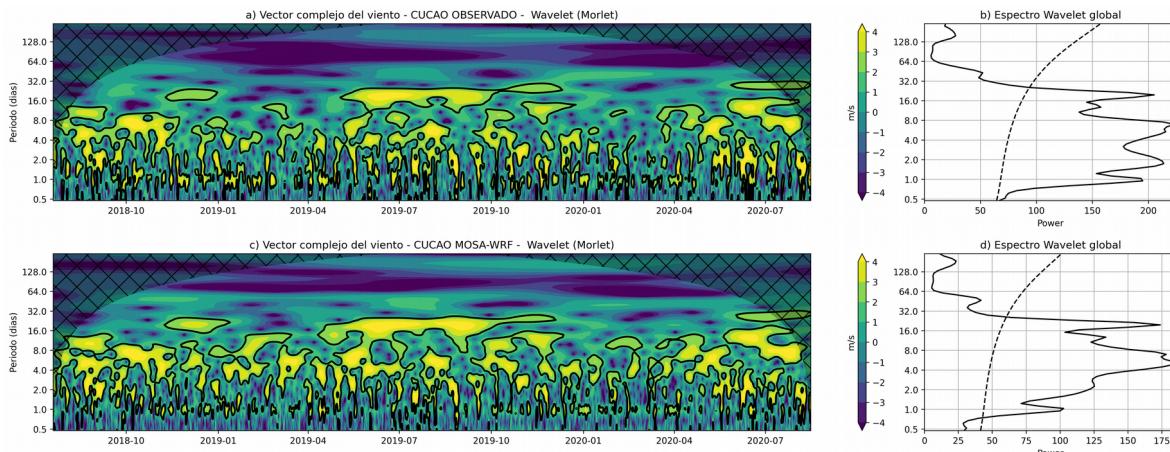


Figura 42: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Cucao. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.

A diferencia de Cucao y Apiao, los datos observados en Huinay muestran una única banda de energía significativa, la cual está posiblemente asociada al ciclo diario producto del efecto de los vientos de montaña y la brisa marina, ya que esta estación está ubicada en la boca de un valle cordillerano (Fig. 43). Esta periodicidad significativa fue resuelta por el modelo, sin embargo con menor intensidad que las observaciones. Por otro lado MOSA-WRF representó la variabilidad sinóptica presente en este punto correspondiente a los períodos entre 4 y 8 días y procesos de escala intra-estacional presentes con periodicidad entre los 16 y 32 días. Estas bandas de energía no fueron registradas por la estación meteorológica ya que estos fueron instalados en un sector muy influenciado por la topografía en donde los patrones atmosféricos se rigen localmente en términos espaciales.

En la estación de Merimeli también se logró identificar una banda de energía correspondiente al ciclo diario de los vientos, el cual MOSA-WRF logra representar de manera adecuada (Fig. 44). Sin embargo, al igual que en el caso de huinay, el modelo mostró otros máximos de potencia asociados a patrones sinópticos y de escala intra-estacional, pero con amplitud menor.

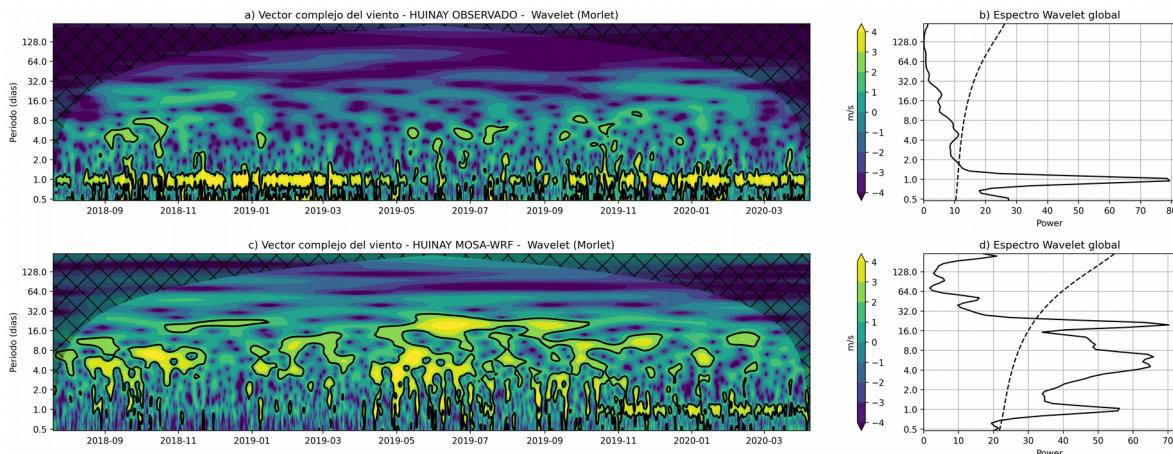


Figura 43: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Huinay. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.

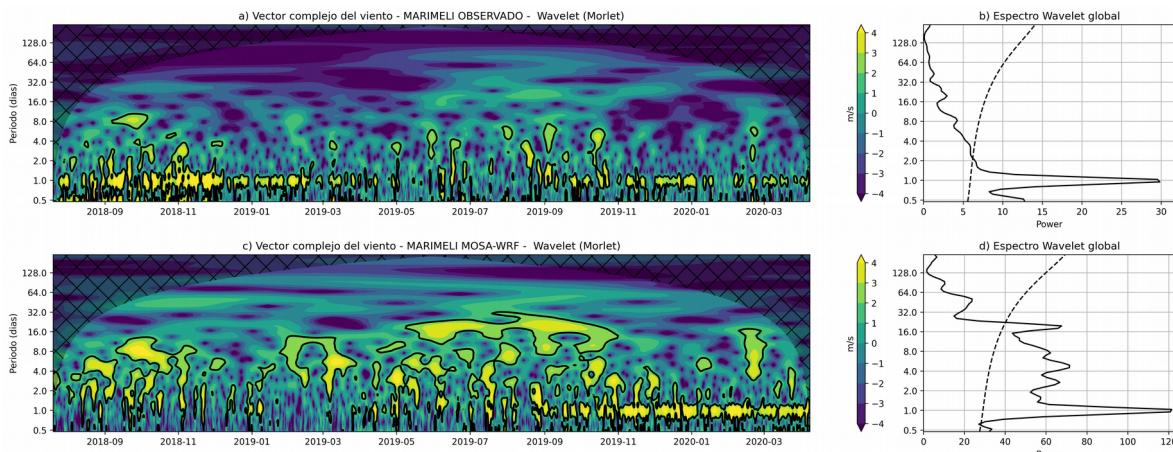


Figura 44: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Merimeli. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.

Por último en la estación meteorológica de Melinka, los pronósticos atmosféricos de MOSA-WRF muestran resultados coherentes con los datos observados. MOSA-WRF resuelve de buena manera las bandas de máxima energía, correspondientes a procesos de escala sinóptica e intra-estacional, a lo largo de todo el periodo que lleva en ejecución MOSA-WRF (Fig. 45). Así mismo, en MOSA-WRF se observa como una banda de energía significativa la banda asociada a periodos diarios, aunque con una menor intensidad de lo observado por los sensores atmosféricos.

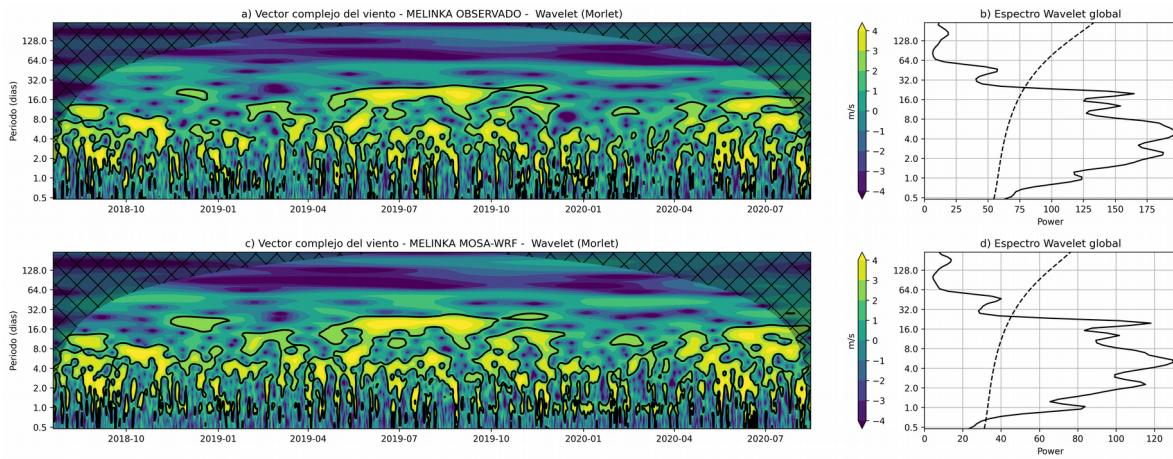


Figura 45: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Melinka. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.

5.3 Resultados objetivo específico 3: Incorporar al modelo lagrangiano de partículas (Parti-MOSA) interacción y respuestas a propiedades físicas.

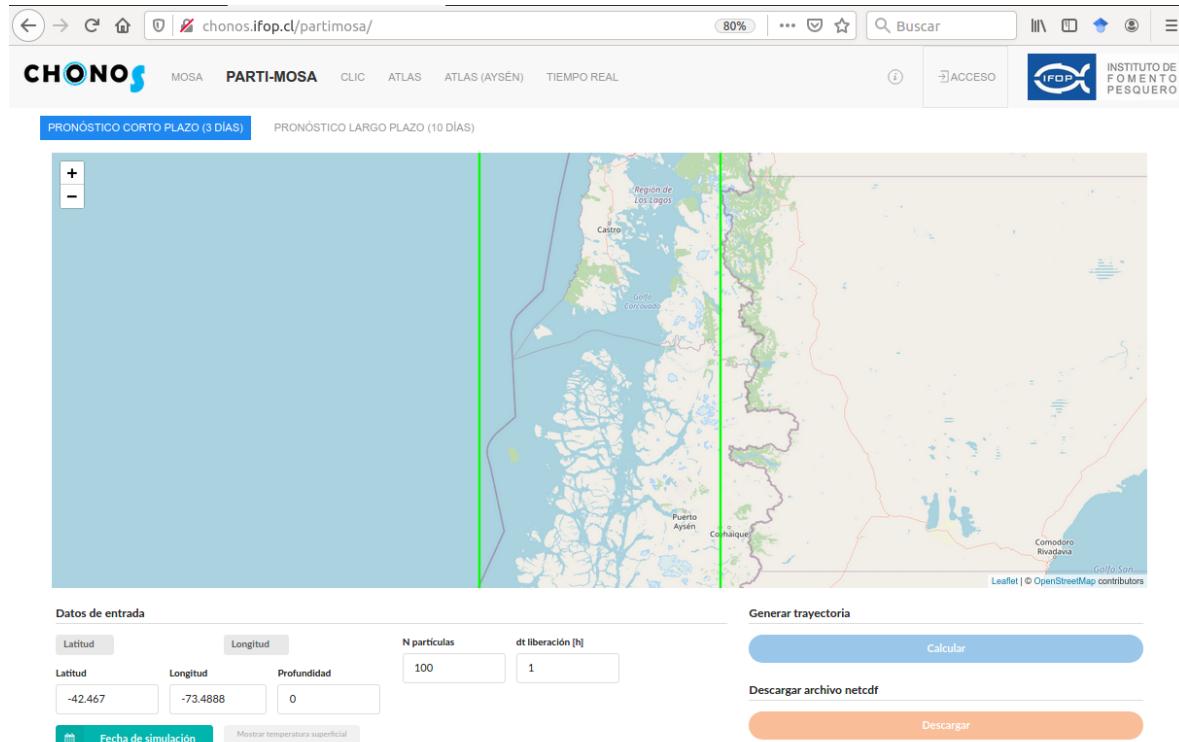


Figura 46: Visualización de la herramienta de dispersión de partículas Parti-MOSA en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos).

La implementación del modulo OpenDRIFT para Parti-MOSA logró una mayor flexibilidad en la definición de la liberación de las partículas. El principal cambio de la versión anterior corresponde al gestor web de mapas georeferenciados, en donde

reemplazamos GoogleMaps por un gestor de mapas de código abierto OpenStreetMap (Fig. 46). Esta nueva versión web permite escoger entre pronósticos a corto plazo de 3 días o a largo plazo de 10 días para la liberación de partículas. Además se mantienen las opciones de la versión anterior para definir la ubicación espacial y profundidad de liberación, la cantidad y frecuencia de liberación de partículas, y el archivo de pronostico de MOSA a utilizar para la simulación. Cabe resaltar que la versión web aún considera a las partículas como inertes, sin masa ni tamaño y sin respuesta a las condiciones ambientales, por lo que estas no se destruyen o mueren al interactuar con diferentes estructuras de densidad, salinidad o temperatura.

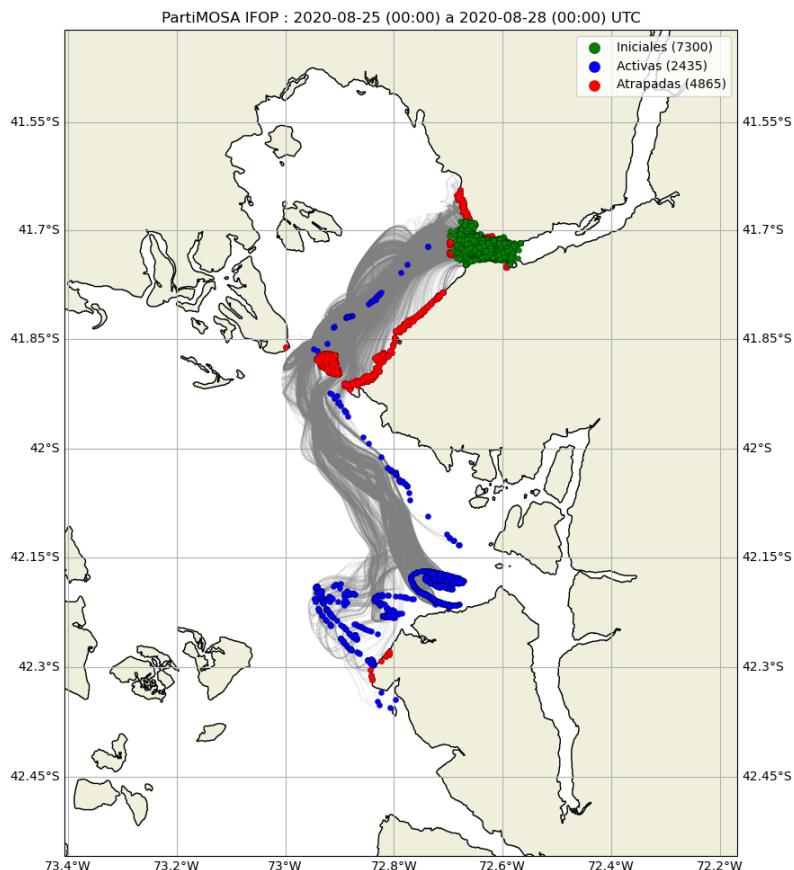


Figura 47: Ejemplo de visualización de una dispersión de partículas usando Parti-MOSA.

Una vez definida las opciones de liberación de partículas, Parti-MOSA muestra un resumen de las trayectorias de cada partícula liberada. Se realizaron cambios estéticos en esta figura que se genera automáticamente en comparación con la versión anterior (Fig. 47). Se modificó el título para que muestre la fecha de inicio y fin de la simulación de dispersión. También se cambió la leyenda para que identifique a las partículas como Iniciales, Activas o Atrapadas. La figura puede ser descargada haciendo clic derecho sobre la figura y escogiendo la opción “guardar imagen como...”. La salida gráfica de los

resultados también puede ser mediante una animación gráfica (formato GIF). Esta opción será agregada en la próxima etapa del proyecto.

El código de OpenDRIFT para considerar respuesta de las partículas al medioambiente fue implementado en el servidor del proyecto CHONOS. Este código está aún en evaluación, por lo que no se encuentra liberado en la plataforma web para que los usuarios puedan acceder y realizar sus propias dispersión de partículas. Como se mencionó en la metodología, se adaptó el código para simular dispersión del parásito Caligus. Específicamente se definió que este muere si encuentra temperaturas menores a 4.2 °C o si encuentra valores de salinidad menores a 20 PSU (Gonzalez & Carvajal, 2003; Bravo, 2010). Se espera contar con la plataforma web para la próxima etapa de este proyecto.

5.4 Resultados objetivo específico 4: Diagnosticar y diseñar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.

5.4.1 Construcción de Dominio y Mascara

Debido a la extensión geográfica de la región se optó por la implementación de un modelo que cubra parcialmente la región. Este dominio abarca por el norte desde el estrecho Nelson (~51 °S), hasta el sur del archipiélago de Cabo de Hornos (~57 °S). A su vez, también contiene las salidas occidentales y orientales del estrecho de Magallanes, por lo que se debe abarcar condiciones de borde para los océanos Pacífico, Atlántico y Antártico, lo que implica un modelo con bordes abierto en los 4 puntos cardinales (Fig. 48).

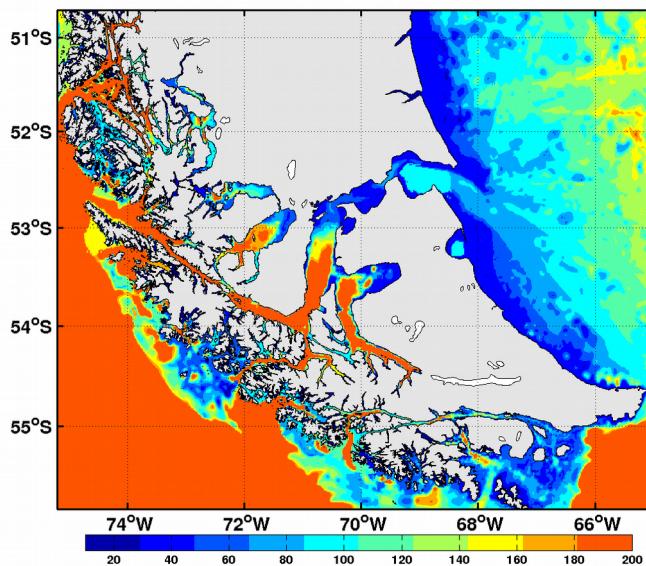


Figura 48: Dominio y batimetría utilizada para construir el modelo MOSAM01. Esta grilla resultó ser estable en simulaciones de un mes de duración.

Consideramos que la extensión del dominio debe contener zonas de interés para futuros modelos anidados de mayor resolución espacial como el seno Otway, seno Skyring y Golfo Almirante Montt, estrecho de Magallanes, canal Beagle e Isla Navarino (Fig. 49). Se ha dejado fuera la zona del Canal Messier, lo que implica una reducción considerable de complejidad al modelo. Este dominio se ha denominado MOSAM01 y para su construcción hemos definido una resolución horizontal que varía entre 1.1 km y 1.7 km. Si bien los elementos del modelo son rectangulares, esta variabilidad responde a la variación latitudinal de los paralelos, la cual se acentúa fuertemente en esta parte del hemisferio. La configuración de la máscara define el número de elementos horizontales que tendrá el modelo, donde solo se utilizan los puntos de agua para los cálculos. MOSAM01 posee 814 elementos de longitud y 520 elementos de latitud. Además, se ha optado por un dominio que permita describir las entradas a los grandes cuerpos de agua interiores presentes en la zona. Si bien la resolución mínima del modelo es de 1.1 km, en muchos casos estos canales presentan angosturas menores a 1 km, por lo que estas tuvieron que ser sobre-dimensionadas para poder ser representadas en el modelo.

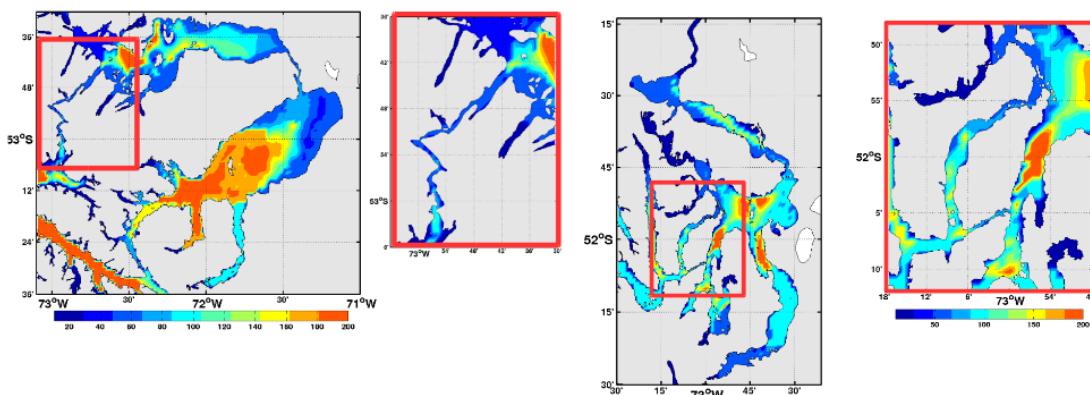


Figura 49: Batimetría empleada en los mares interiores de la región. Izquierda Senos Skyring y Ottway y, en la derecha , Golfo Almirante Montt.

En relación a la batimetría, inicialmente se generó una grilla con la batimetría de la fuente Etopo 2, que es la misma que utiliza CROCO para la generación de grillas de manera predeterminada. Sin embargo, estos valores en la mayoría de los casos son altamente subestimados en las zonas costeras (solo en algunas excepciones son sobreestimados), conduciendo a perfiles poco realistas para la zona. De este modo, reemplazamos la batimetría por datos de la base mundial de datos batimétricos GEBCO_2020 y en zonas interiores se utilizó como referencia datos de sondas de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Notar que este último paso se realiza de forma manual, modificando píxel por píxel lo cual conlleva una trabajo largo y siniuso que ha tomado gran parte del desarrollo.

A la fecha se está utilizando la batimetría presentada en las figuras 48 y 49. Notar que existen grandes zonas donde se ha debido suavizar fuertemente los perfiles barométricos para obtener gradientes de profundidad pequeños. Esto se realiza para lograr que el modelo sea estable en la propagación de condiciones de borde hacia el interior. MOSAM01 usa 42 niveles verticales del tipo sigma, los cuales siguen la batimetría del dominio en base a parámetros lineales. Para la distribución de los niveles verticales, se usaron parámetros que buscan mantener una mayor resolución en superficie, y por ende una menor resolución en capas intermedias y profundas. Esto debido a que en capas superficiales y subsuperficiales ocurren los procesos de mezcla e intercambio más relevantes de la circulación. Un resumen de los parámetros del dominio son presentados en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros de la grilla de MOSA-ROMS01.

Dimensiones		Batimetría		Niveles verticales	
LLm	813	H máxima	5000	theta_s	7
MMm	518	H coast	10	theta_b	2.5
Mínima resolución	1.12 km	H minimo	10	hc	20
Máxima resolución	1.27 km	R target	0.33	Vtransform	2
Niveles verticales	42	N filter deep topo	1		
		N fil hanning	2		

5.4.2 Pruebas de estabilidad

Una vez construido el dominio y luego de revisar que no existan inconsistencias en la batimetría (datos escapados, perfiles poco realistas, suavizados extremos), y que la máscara este bien definida (que no existan píxeles de agua rodeados de tierra) realizamos simulaciones de prueba para evaluar la estabilidad de la grilla recién creada (MOSAM01). Teniendo en cuenta que un objetivo futuro es llevar esta grilla a un modelo operacional, es relevante evaluar su estabilidad en procesos de escalas sinópticas, donde la marea aparece como uno de los rasgos principales a tomar en cuenta. Por lo tanto, en estas simulaciones de prueba se busca evaluar específicamente la batimetría y la marea, lo cual es un aspecto altamente sensible en modelos alojados en zonas con las características de la región de Magallanes. Las simulaciones fueron realizadas en un mes de verano durante un mes de duración, a fin de contener un ciclo mareal completo. Estas pruebas fueron realizadas en un servidor de alto rendimiento de 4 nodos de cálculo con 12 procesadores utilizando paralelización de memoria distribuida (MPI). MPI distribuye el dominio de simulación en

sub-dominios en relación a la cantidad de procesadores, aumentando en muchos casos la eficiencia de los cálculos numéricos.

Si bien se utilizó condiciones iniciales climatológicas en esta prueba, se debe tener en cuenta que estos campos pueden ser fuertemente alterados al introducir fuentes de agua dulce. Uno de los aspectos más relevantes de la zona es la presencia de un considerable ingreso de volumen de agua dulce hacia el sistema marino, ya sea por ríos, precipitación o deshielo, como también el efecto de los grandes cuerpos glaciares presentes en el dominio (Gran campo nevado, Campo de Hielo Sur y Parque Angostini). Se espera integrar en las próximas etapas caudales de los ríos principales en la zona usando climatologías de caudales obtenidas de modelos hidrológicos VIC al modelo MOSAM01 (Lian et al., 1994; Hamman et al., 2018).

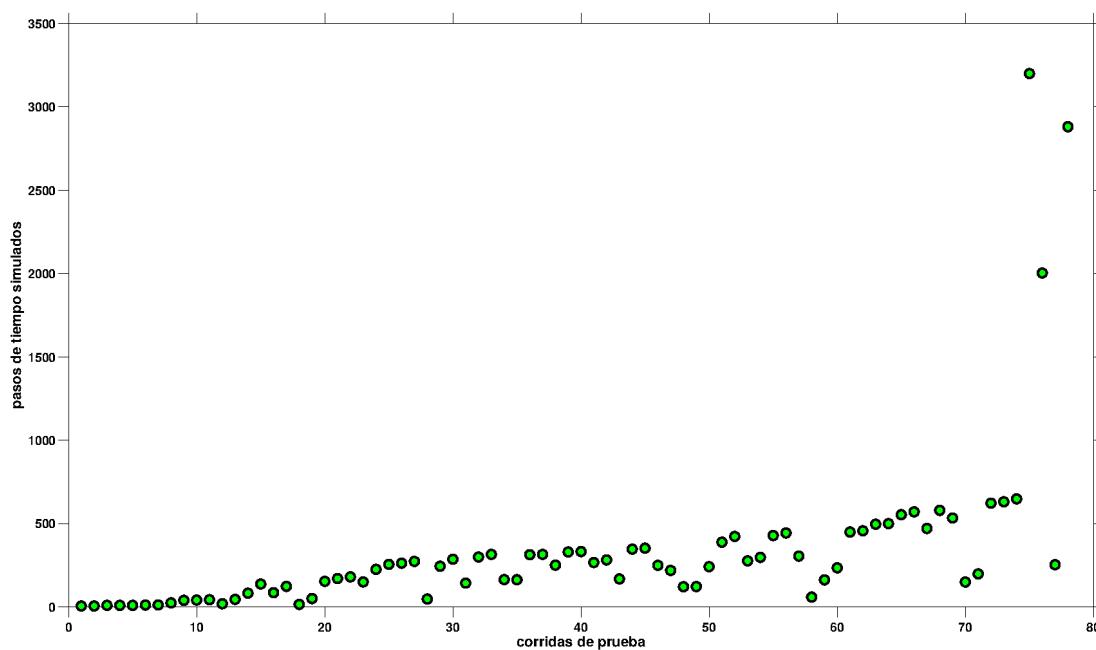


Figura 50: Simulaciones de prueba realizadas con un paso de tiempo de 20 s antes de llegar a una versión estable del modelo.

Inicialmente se utilizó un paso de tiempo (dt) de 10 segundos para resolver las ecuaciones primitivas del modelo, para asegurar la capacidad del modelo de resolver las irregularidades de la batimetría. Este valor puede aumentarse, una vez que el dominio logre ser estable, dado que ocupar un paso de tiempo pequeño implica mayores tiempos de computo. Se realizaron cerca de 80 pruebas de sensibilidad con un dt de 20 s. Consideramos que la simulación es estable si logra simular 24 horas. En cada falla numérica se procedió a identificar el punto de error del dominio y determinar si se debía a la presencia de algún cambio brusco de profundidad o valores erróneos (Fig. 50).

Posteriormente se relajó el paso de tiempo a 20, 30 y finalmente 40 segundos, logrando en esta última configuración un modelo que corrió casi 40 días de manera estable.

Al iniciar las simulaciones de pruebas, aparecieron inmediatamente errores de inestabilidad numérica en determinadas zonas del dominio (Fig. 51). En la mayoría de los casos los errores aparecían por 3 motivos recurrentes:

1. Valores de batimetría menores o iguales a la profundidad mínima configurada (en nuestro caso 10 metros).
2. Presencia de un fuerte gradiente de batimetría costero que podía quedar incluso después de los sucesivos filtros que se aplicaron en la etapa de construcción.
3. Inconsistencias de la máscara al presentar valores de tierra en zonas de agua y viceversa, que aparecen automáticamente después de aplicar correcciones de malla y que no pueden ser advertidos en la etapa de construcción.

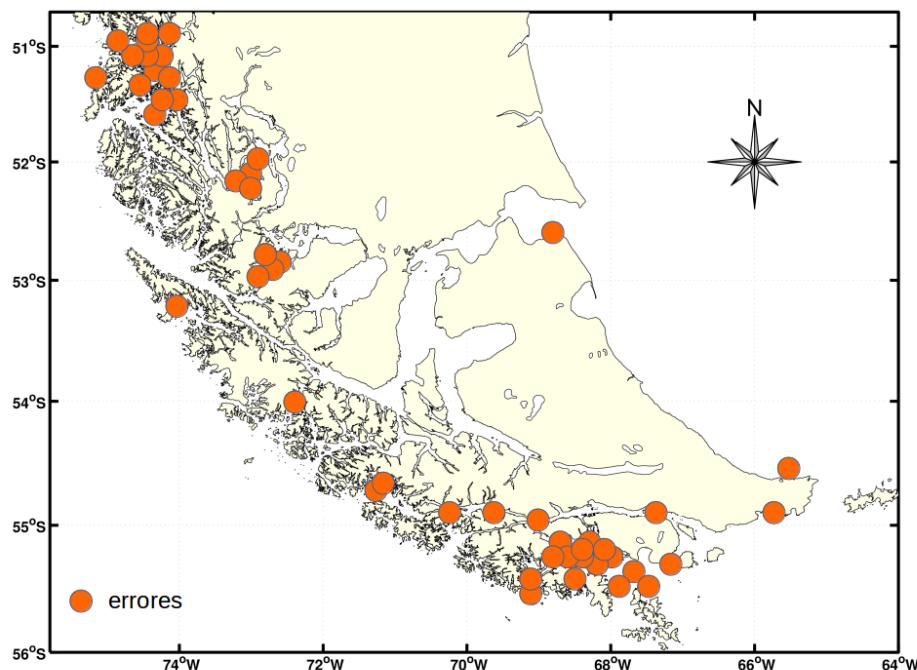


Figura 51: Puntos del dominio donde se registraron errores numéricos.

Una vez lograda una grilla estable, realizamos una prueba de escalamiento. La Tabla 7 muestra un resumen de los tiempos de cálculo para una simulación de 24 horas que guarda registros horarios con cada paso de tiempo utilizado. Hay que destacar que uno de los factores que influye fuertemente en los tiempos de cálculo es la escritura de datos (intervalo de salida). También se presenta el tipo de paralelización ocupada en cada prueba, para evaluar el eficiencia del modelo al utilizar múltiples procesadores. En nuestro caso se encontró que una simulación con un $dt=40$ s en una configuración MPI de 2x12 fue la de

mejor desempeño, demorando poco más de 3 horas. Estos tiempos son relevantes, puesto que se busca que este dominio sea operacional en un futuro, por lo que se deben reducir al máximo los tiempos de computo para tener la capacidad de tener pronósticos diarios.

Tabla 7: Resumen de los tiempos de computo para las pruebas de sensibilidad de estabilidad, así como la paralelización utilizada.

Paso de tiempo (s)	Paralelización	Tiempo requerido para simular 24 horas (h)
10	2x12	7:10
20	2x12	4:20
30	2x12	3:37
30	4x12	5:10
30	6x8	5:30
40	4x6	4:50
40	2x12	3:14

Una vez realizado este análisis de escalamiento, se simularon 40 días de verano con un dt de 40 s y una paralelización de 24 procesadores (2x12). Con el fin de evaluar el desempeño de la marea, utilizamos datos de la red de mareógrafos del SHOA en la región (www.ioc-sealevelmonitoring.org), la cual cuenta con datos en 4 puntos del dominio en territorio nacional, Puerto Williams, Punta Arenas, Caleta Meteoro, (entrada occidental del estrecho de Magallanes) y San Gregorio en segunda Angostura (Fig. 52). Cada una de estas zonas presenta diferentes características topográficas y batimétricas, por lo que nos otorga una mirada relevante de como se comporta el modelo bajo distintas condiciones. Por motivos de optimización de recursos y del tiempo de computo requerido, se optó por una configuración que guarda las salidas del modelo cada 6 horas. Sin bien con esta resolución temporal no se pueden observar bien definidos los constituyentes armónicos, si nos permite tener un idea inicial de como se podría comportar el modelo. También, es relevante recordar que este experimento busca probar la estabilidad de la grilla más allá de sus limitaciones en los procesos oceanográficos.

Para evaluar la estructura vertical del campo de masa comparamos estos resultados con lances de CTD de una campaña oceanográfica del IFOP en verano de 2014, la cual estuvo enfocada en la zona de Canal Cockburn. Hay que destacar que los lances no superaron los 200 metros de profundidad debido a limitaciones técnicas de los sensores utilizados. A grueso modo podemos observar un buen ajuste con la temperatura, mostrando una buena correlación en el desarrollo de la termoclina, aunque en general hay un error de ~1 °C (Fig. 52). Por su parte, la salinidad se presenta totalmente mal representada, dejando en evidencia la falta de agua dulce en los datos climatológicos. Aunque el desajuste es alto, se debe tener en cuenta que el modelo corrió sin fuentes puntuales de ríos ni glaciares, lo

que puede explicar las diferencias en salinidad, especialmente en superficie. Además, sabemos que la temperatura es altamente sensible a la variabilidad interanual, así lo adecuado es validar el modelo con datos climatológicos de largo alcance (los cuales son casi nulos en la zona), o para el caso de simulaciones históricas “hindcast” contar con datos observados del mismo periodo simulado. De todos modos, estos son aspectos que se esperan trabajar en la siguiente etapa del proyecto, donde se busca llevar este dominio o parte de él a un nivel operacional.

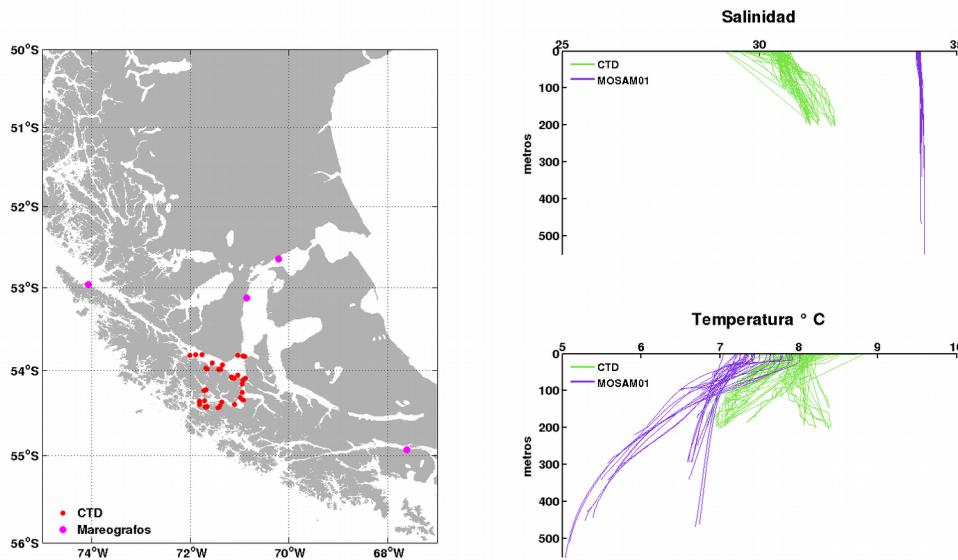


Figura 52: Izquierda, ubicación de los mareógrafos y lances de CTD (verano) utilizados en la evaluación de la simulación de un mes forzada con datos climatológicos.

La Figura 53 presenta las series del nivel del mar junto con los datos de mareógrafo con una frecuencia de muestreo cada 6 horas en ambos casos. La Tabla 8 presenta los valores de correlación y error entre modelo y mareógrafo. Los resultados muestran ajustes pobres y errores significativos con la amplitud de marea. Esto se puede explicar por el periodo de muestreo de 6 horas utilizado. Se espera en la próxima etapa generar un modelo más robusto y de mayor resolución temporal para realizar una evaluación más profunda de los componentes armónicos de marea utilizando los mismo puntos.

Tabla 8: Valores de correlación (R) y error cuadrático medio (RMSS) entre los mareógrafos y las salidas del modelo.

	R	RMSE
Punta Arenas	0.35	1.8
San Gregorio	0.62	3.5
Caleta Meteoro	0.52	1.2

Puerto Williams

0.19

1.8

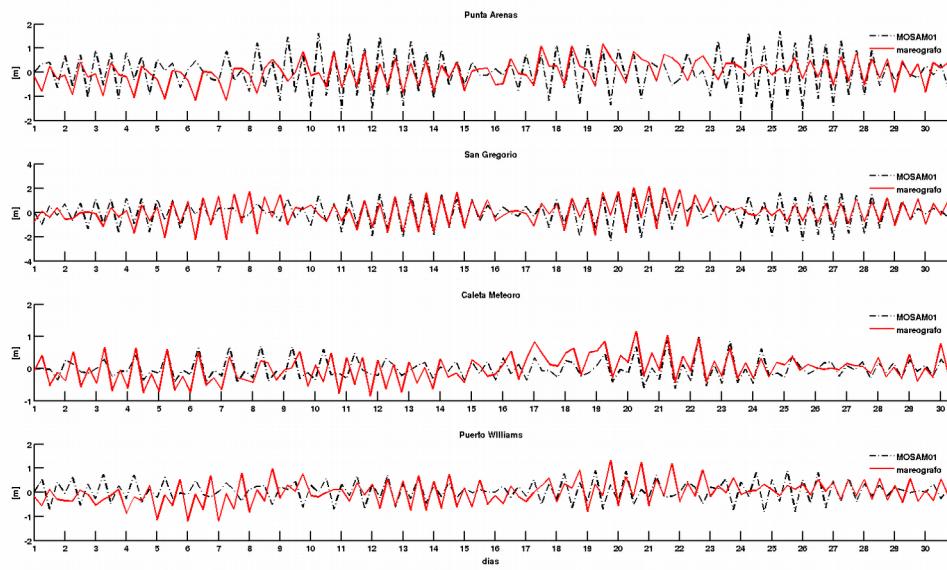


Figura 53: Series de tiempo del nivel de mar observadas y modeladas con una frecuencia de muestreo cada 6 horas.

5.4.3 Pruebas con forzantes sinópticos

A modo de diagnosticar y evaluar un futuro modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes realizamos una simulación de prueba de 3 días de duración utilizando forzantes obtenidos de modelos globales, así como un modelo atmosférico diseñado para la grilla MOSAM01 basado en WRF. Este modelo no cuenta con información de fuentes puntuales de agua dulce, las cuales se espera incorporar en la siguiente etapa. Esta prueba busca replicar un pronóstico de 3 días de temperatura, salinidad y corrientes para el día 3 de julio de 2020. Debido a un problema con el servidor que se usó en las pruebas de sensibilidad, este modelo fue migrado al servidor operacional que usa MOSA-ROMS (Anexo D), el cual tiene un desempeño mejor y disminuye los tiempos de computo en general.

Las condiciones iniciales y de borde utilizadas para la temperatura, salinidad y corrientes fueron obtenidas del modelo operacional global Mercator-Ocean (mismo producto utilizado para MOSA-ROMS). Específicamente se utilizó el producto diario de 1/12° (~9.5 km) de resolución espacial (Fig. 54). Se destaca la presencia de gradientes de salinidad al interior del Golfo Almirante Montt, Seno Almirantazgo y Canal Beagle, todas zonas con presencia de campos Glaciares. Al igual que en las pruebas climatológicas, se utilizaron los 10 primeros constituyentes armónicos de marea calculados a partir del modelo TPX07.

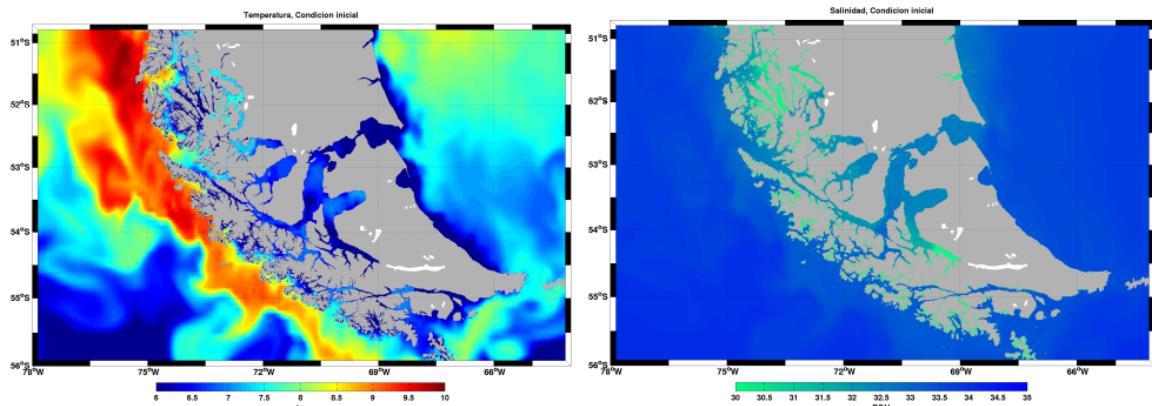


Figura 54: Condiciones iniciales de temperatura superficial (izquierda) y salinidad superficial (derecha) obtenidas del modelo global Mercator-Ocean para el 03/07/2020.

A modo de obtener una representación de mayor resolución de las condiciones atmosféricas, se construyó un modelo basado en WRF, de un solo dominio, con una resolución espacial de 5 km y 28 niveles verticales. Este modelo fue forzado con GFS, modelo global con una resolución de 25 km y una resolución temporal de 6 horas. El proceso de descarga de datos y corrida de este modelo duró 2 horas, si bien necesita ser validado, se espera seguir su desarrollo para su implementación operacional junto con MOSAM01. De este modelo se obtiene el viento a nivel superficial, la temperatura del aire y la radiación, los cuales son utilizados para forzar la superficie de MOSAM01. El campo superficial del viento inicial grillado cada 20 km se muestra en la Figura 55.

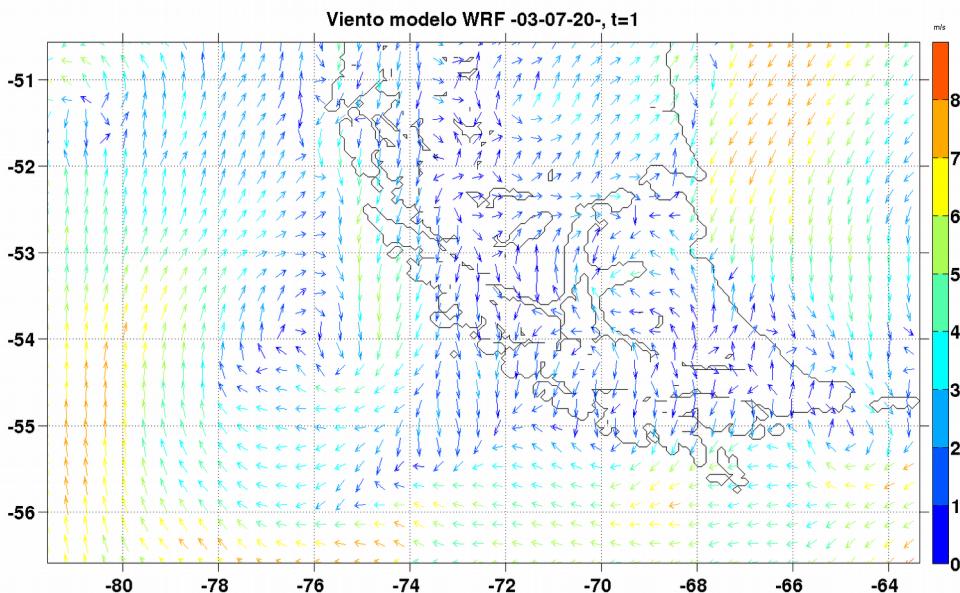


Figura 55: Campo superficial inicial del viento del modelo WRF utilizado para forzar MOSAM01.

La simulación para los 3 días de pronóstico demoró ~3 horas, la descarga de datos y el pre-procesamiento de datos de inicio demora ~58 minutos. A estos tiempos se le deben agregar lo que demora el modelo atmosférico WRF en simular (~2 horas) y pre-proceso (~1 hora), dando un total de ~7 horas para completar todo el proceso. En vista de la escasa o nula disponibilidad de datos operacionales en la zona, se utilizaron datos de imágenes satelitales de TSM para evaluar su desempeño durante la prueba de pronóstico. Por una parte, se utilizó MODIS, el cual es un sensor que alcanza una resolución de 4 km, y aunque tiene una cobertura diaria, se deben utilizar promedios semanales para obtener una cobertura total del dominio. Sin embargo es altamente sensible a la nubosidad, por lo cual se optó por usar un promedio mensual del mes de junio (el mes de julio aun no estaba disponible al momento de elaborar este informe), y se comparó con el promedio de TSM de los 3 días modelados en MOSAM01.

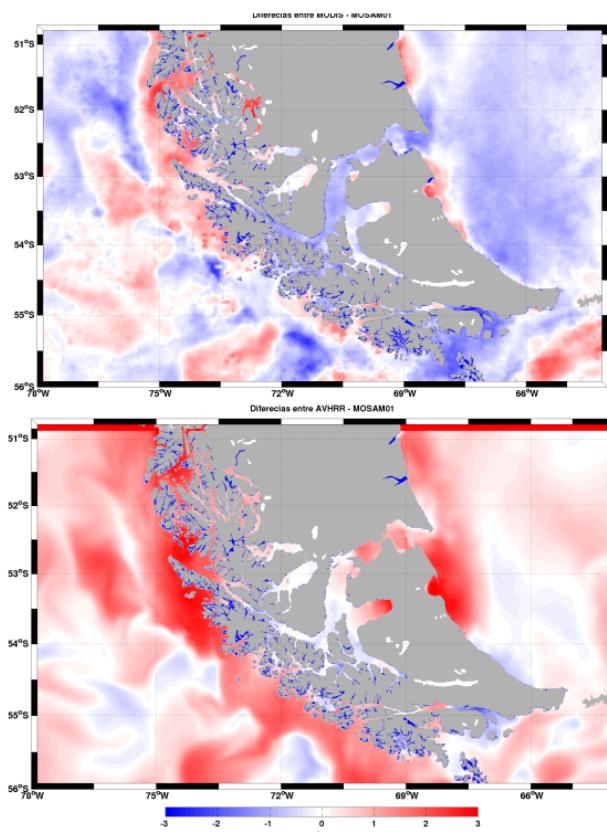


Figura 56: Diferencias entre campos superficiales de TSM de MOSAM01 (arriba) MODIS, y (abajo) OISST-AVHRR.

Del mismo modo se utilizaron datos del producto OISST-AVHRR para comparar con MOSAM01. Al disponer de cobertura total diaria, utilizamos el promedio de las primeras 24 horas del pronóstico (4 julio). Los datos de MODIS muestran que el modelo es en general más frío (Fig. 56), no obstante, hay que considerar que estos corresponden a datos promedio de junio, mientras que la corrida corresponde al día 3 de julio, y principalmente

que el modelo debe alcanzar el equilibrio numérico, es decir, debe satisfacer las leyes de conservación de volumen y energía. También se observan diferencias positivas especialmente en el Golfo Almirante Montt y en la entrada occidental del estrecho de Magallanes. Por su parte las diferencias realizadas con datos OISST-AVHRR presentan un buen ajuste dentro del estrecho de Magallanes y cuerpos interiores (Golfo Almirante Montt, Senos Skyring y Ottway, aunque fuera de estos el modelo se exhibe más cálido. Estos rasgos serán explorados de manera más profunda en la etapa siguiente, cuando el modelo lleve más tiempo simulado.

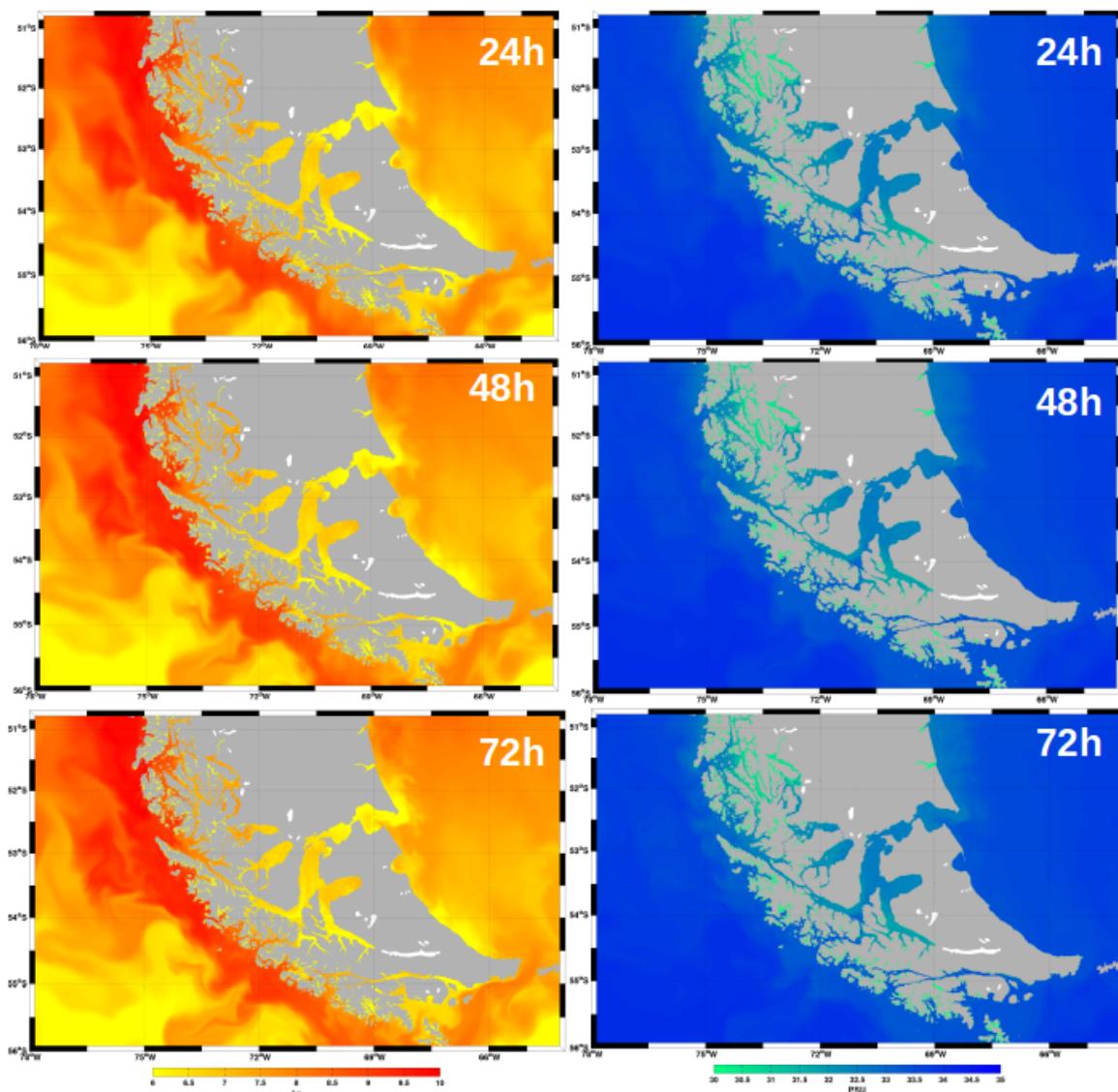


Figura 57: Campos superficiales de temperatura (izquierda) y salinidad (derecha) del pronóstico realizado para el 03/07/2020. Se presentan los resultados a 24, 48 y 72 horas.

Se extrajeron los campos superficiales de temperatura salinidad y corrientes barotrópicas de los promedios diarios de cada día pronosticados. No se aprecian grandes

cambios en la evolución de TSM y salinidad superficial a 24, 48 y 72 horas (Fig. 57), debido a la escala temporal y a la estabilidad del sistema durante invierno. Sin embargo, se destaca que el modelo mantiene las bajas salinidades en las zonas de cuerpos glaciares. Se espera que la integración de fuentes de agua dulce al modelo genere un impacto significativo en los resultados de temperatura y salinidad.

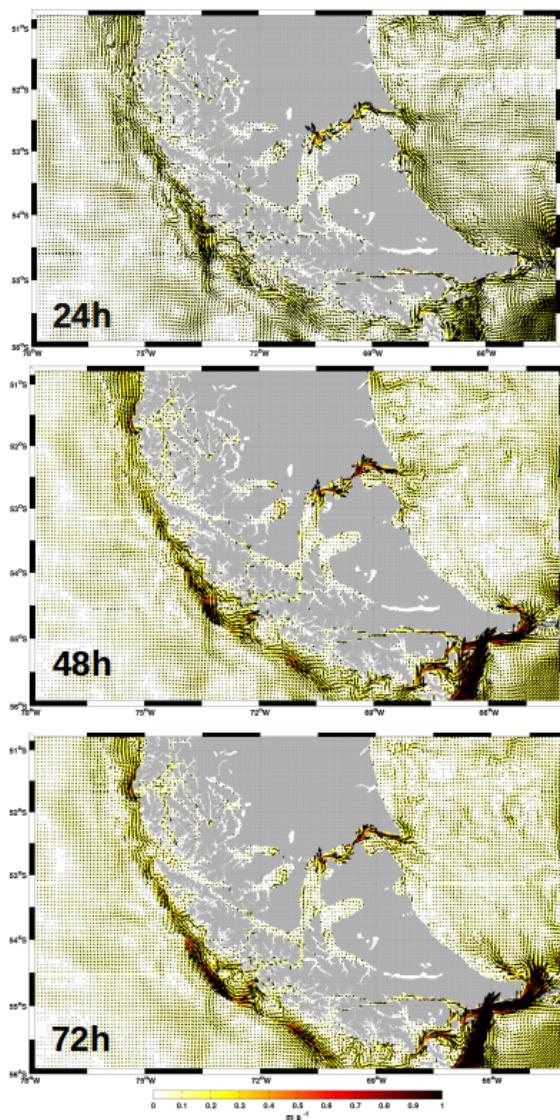


Figura 58: Campo de corrientes barotrópicas promedios a 24, 48 y 72 horas del pronóstico realizado para el 03/07/2020.

La corriente barotrópica resultante del pronóstico a 24, 48 y 72 horas muestra las corrientes más intensas en primera y segunda angostura (Fig. 58). Además se observa un fuerte flujo costero hacia el polo por la zona costera occidental del dominio, el cual presenta un interesante fenómeno a estudiar a futuro. No obstante, el desarrollo de máximos de corriente cerca al este de canal Beagle después del primer día de pronósticos pareciera

responder a efectos del modelo. Se espera en la próxima etapa contar con datos de campañas IFOP en el la zona de seno Skyring, la cual puede ser complementada con datos de satelitales de corrientes geostróficas (e.g AVISO) para una evaluación más profunda del campo de corrientes.

Destacando la importancia del estrecho de Magallanes en la dinámica general del dominio de MOSAM01, se vuelve relevante fijar la atención en los procesos que en él subyacen. Realizamos una transecta a lo largo del estrecho para las variables de temperatura y salinidad, calculadas a partir del promedio de los 3 días simulados. En estas transectas se aprecia la importancia que tiene usar una buena condición inicial y su capacidad de generar estructuras verticales coherentes del campo de masa. Observamos la presencia de un fuerte gradiente oeste-este de temperatura, mientras que la salinidad presenta una estratificación que se mantiene a lo largo del estrecho (Fig. 59). Se destaca que el modelo y las condiciones iniciales conserven este tipo de estructuras verticales. Se espera que al incorporar fuentes de agua dulce, estos flujos produzcan un efecto significativo en la densidad de la columna de agua, especialmente en la salinidad.

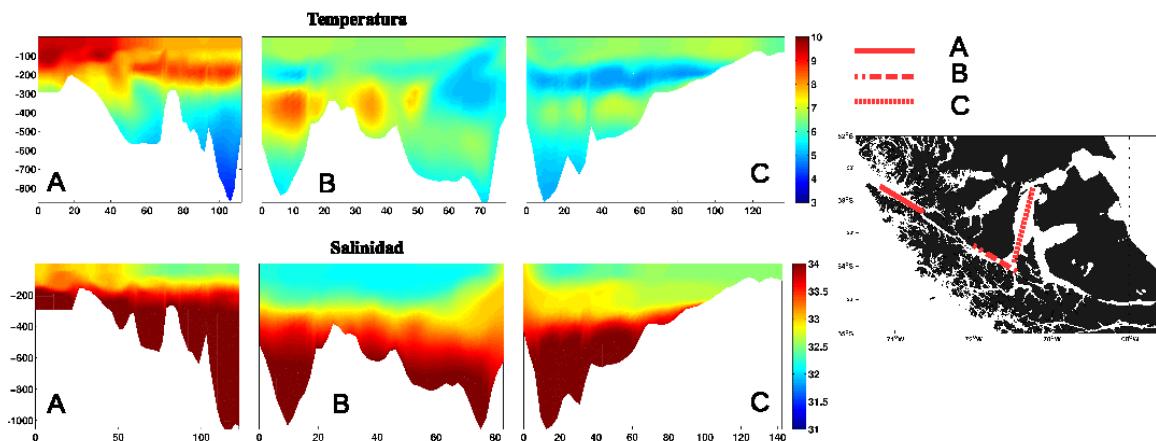


Figura 59: Sección transversal de temperatura (arriba) y salinidad(abajo) extraída del promedio del pronostico de MOSAM01 a lo largo del estrecho de Magallanes.

Si bien la finalidad principal de este objetivo es construir y evaluar la operatividad de un modelo en la región de Magallanes, se espera en la siguiente etapa avanzar hacia un modelo operacional, que cubra la totalidad o parte del dominio de MOSAM01. Para ello se hace indispensable mejorar las condiciones iniciales, de modo que sean capaces de reflejar los procesos locales de la zona, especialmente la influencia de las fuentes de agua dulce, las cuales tiene un profundo impacto en las estructuras termohalinas (y por ende en la circulación residual) de la región. Para ello se debe contar con una fuente de información suficiente sobre los caudales de ríos, y descargas glaciares de la zona. Para ello, a través del modelo hidrológico VIC (Lian et al., 1994; Hamman et al., 2018), implementado por un consultor externo, se cuenta con una valiosa información de caudales históricos de los

últimos 20 años de las principales cuencas de la región, incluyendo las zonas glaciales. La Figura 60 muestra las cuencas que cuentan con valores de caudales horarios, denotando en colores degradados el volumen de agua aportada, siendo el rojo las de mayor aporte. Se espera utilizar los resultados de este modelo en la siguiente etapa del proyecto.

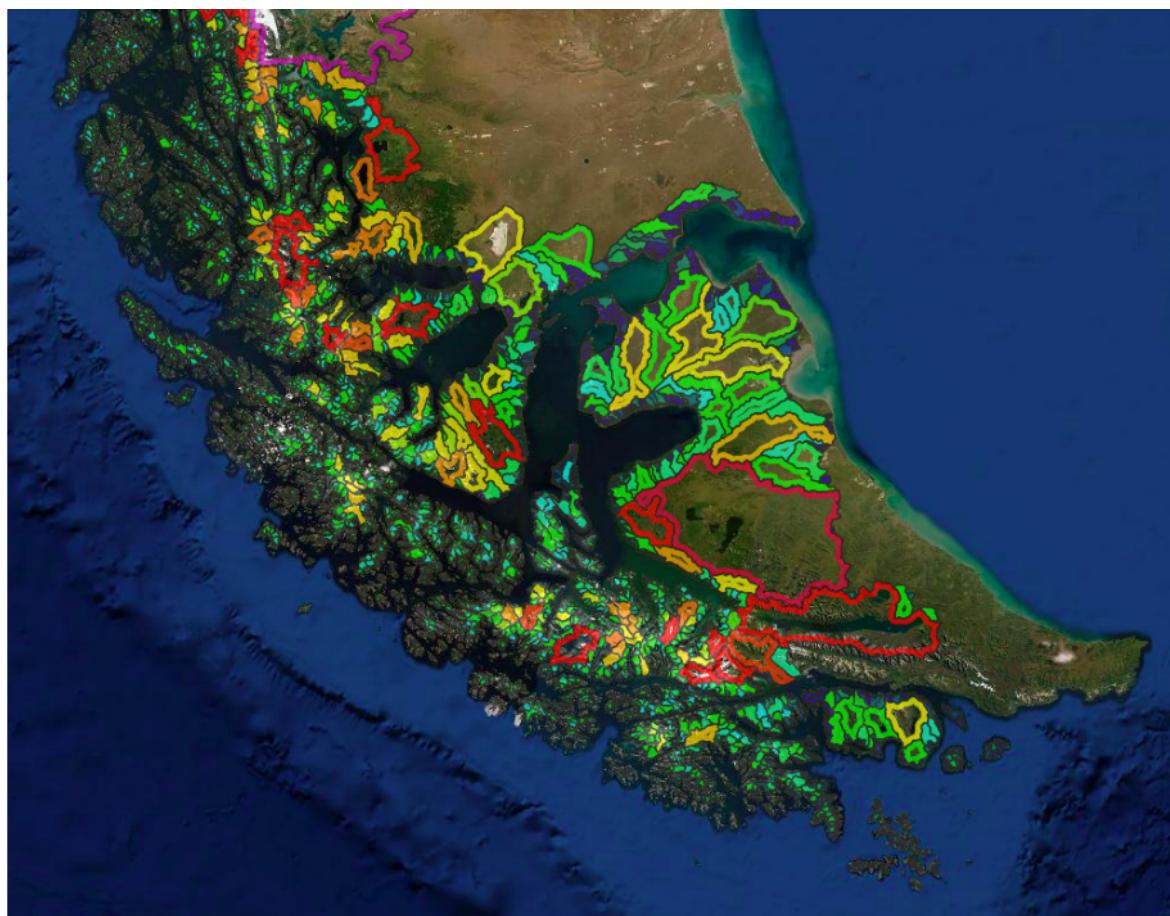


Figura 60: Mapa de las cuencas con información modelada de caudales horarios para ser utilizados en el dominio MOSAM01.

En resumen, se logró implementar un modelo regional para la región de Magallanes de alta resolución espacial (~ 1.5 km), que si bien aún requiere ajustes importantes, especialmente en el campo de masa, ha respondido de manera satisfactoria a las pruebas de estabilidad, manteniendo una batimetría que mantiene los rasgos relevantes de la zona. También se ha podido lanzar una prueba del modo de pronósticos a 3 días, probando que su implementación podría ser factible. Se espera que la incorporación de fuentes de agua dulce genere un fuerte impacto en el campo de masa del modelo. No obstante, la limitada información de datos *in situ* o la falta total de datos en linea no permitan evaluar en tiempo (cuasi) real el grado de error de este producto, por lo que por el momento se seguirá trabajando principalmente con productos satelitales.

5.5 Resultados objetivo específico 5: Diagnosticar y diseñar un modelo biogeoquímico (BGQ) climatológico en el mar interior de Chiloé.

El desarrollo de modelación biogeoquímica se encuentra constantemente en proceso de evaluación, calibración y mejoramiento. Actualmente se está investigando con dos modelos biogeoquímicos: Un modelo simple NPZD y un modelo más complejo PISCES. Para ambos modelos se está utilizando la nueva versión del modelo ROMS, el modelo CROCO (<https://www.croco-ocean.org>). A continuación detallamos los resultados de ambos modelos.

5.5.1 Modelo NPZD

Los resultados del modelo NPZD están enfocados en las variables de estado de este modelo: Oxígeno y Nitrato. La parte oceánica de estas variables fueron analizadas con datos de WOA2018, específicamente con 1 transecta a lo largo de la longitud de 79.5 °O y otra transecta_a lo largo de la latitud de 43.5 °S. La variabilidad local de estas variables fueron analizadas con datos de un anclaje en la boca del Guafo.

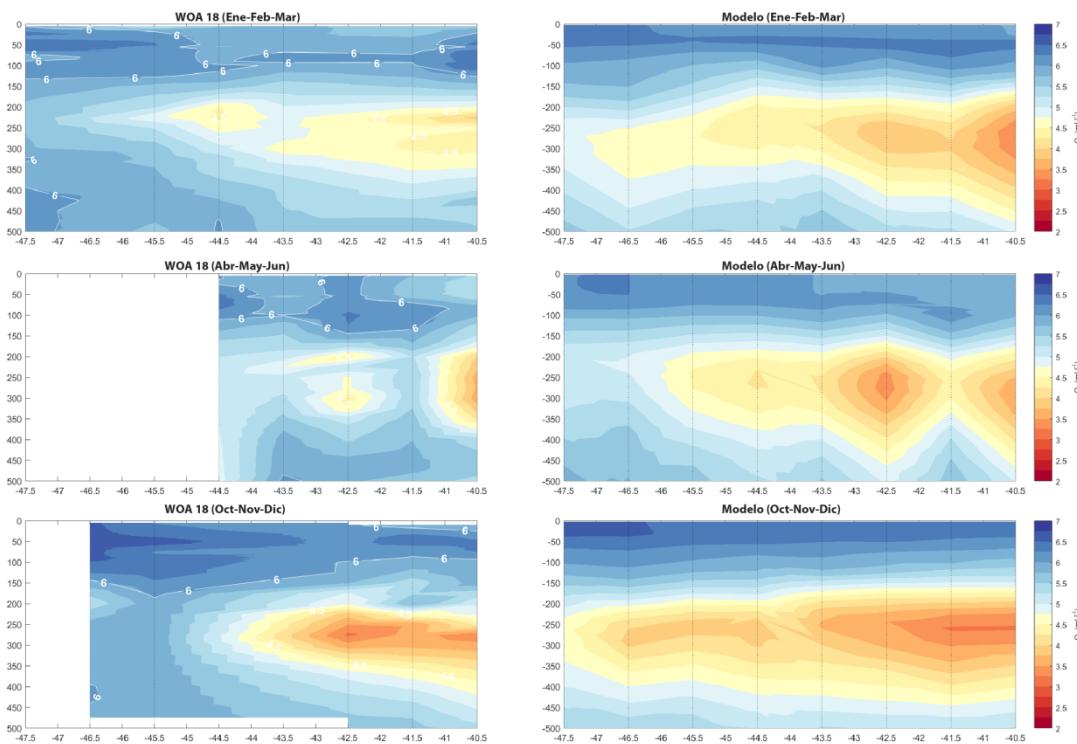


Figura 61: Distribución estacional de oxígeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la longitud 79.5 °O.

La distribución de oxígeno disuelto modelada en la transecta a lo largo de la longitud de 79.5°W registró valores que variaron entre 3 a 7 mL L⁻¹ (Fig. 61), donde las

concentraciones mayores a 5 mL L⁻¹ se ubicaron en los primeros 100 m de la columna de agua, para posteriormente ir descendiendo. Los datos del WOA18 en esta misma transecta registró una estructura ubicada entre los 200 a 300 m de profundidad asociada a valores de oxígeno menores a 4.5 mL L⁻¹, donde se destaca la variación estacional, reflejada en la extensión latitudinal de la estructura. En primavera, la estructura se observó hasta aproximadamente los 44.5 °S, a diferencia de lo observado en otoño donde se aprecio de forma intermitente hasta los 42.5 °S y en verano hasta los 44 °S de manera continua. Otra característica estacional relevante en la estructura observada del WOA18, son los valores de oxígeno disuelto, donde se observó que la estructura se intensifica en primavera, disminuyendo en verano y aún más en otoño.

El modelo también registró la estructura antes descrita, ubicada entre los 200 y 300 m con valores de oxígeno menores a 4.5 mL L⁻¹. Sin embargo, el modelo presentó una sobreestimación de la extensión horizontal de la estructura en casi todas las estaciones del año. En relación a la intensificación de la estructura en primavera y debilitamiento en verano y aún más en otoño, el modelo fue capaz de reproducir esta característica, sin embargo los valores fueron menores a los observados en el WOA18.

La distribución de nitrato modelada a lo largo de la longitud de 79.5 °O registró concentraciones que variaron entre 5 a ~27 µM, donde los valores menores a 15 µM se ubicaron en promedio sobre los primeros 150 m con una leve somerización hacia el sur de la transecta (Fig. 62). Esta característica también se apreció en los datos de WOA18, sin embargo el gradiente es mucho más notorio en los datos observados que en los modelados. Entre los 250 y 400 m de profundidad los datos WOA18, registraron una estructura asociada a concentraciones mayores a 25 µM que abarcó desde el 40.5 °S a 43.5°S de latitud. En cuanto al modelo, este registró una estructura con concentraciones sobre los 25 µM pero la extensión fue de entre 40.5° a 41.5° S.

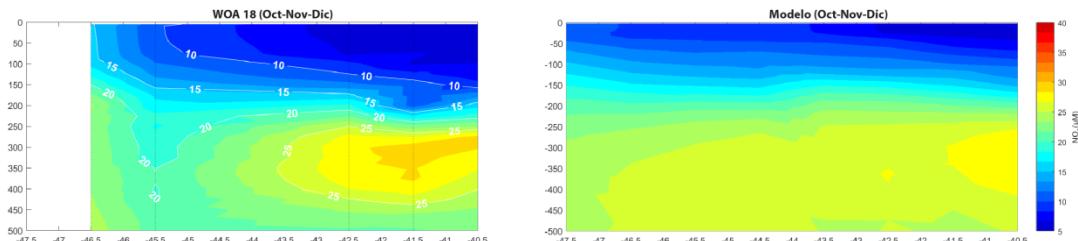


Figura 62: Distribución estacional de nitrógeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la longitud 73.5 °O.

La distribución de oxígeno disuelto modelado en la transecta a lo largo de la latitud 43.5 °S varió entre 3.5 a 6.5 mL L⁻¹, donde en general las concentraciones mayores a 5.5 mL L⁻¹ se ubicaron en promedio sobre los 100 m de profundidad (Fig. 63). Sin embargo

destaca una profundización de esta capa a medida que se aleja de la costa. Esta característica fue concordante con lo observado en los datos de WOA18, no obstante las concentraciones del modelo fueron mayores a las observadas en los datos WOA18. Bajo los 150 m de profundidad los datos del modelo y los observados en datos WOA18, registraron una disminución progresiva de las concentraciones de oxígeno disuelto hasta aproximadamente los 250 m de profundidad donde se ubicaron las mínimas concentraciones. En el modelo las mínimas de oxígeno disuelto fueron de $\sim 3.3 \text{ mL L}^{-1}$ a diferencia de los registrado en los datos WOA18 que alcanzaron valores de 2.2 mL L^{-1} . Esta baja concentración de oxígeno se caracterizó por registrar una variación longitudinal, ya que los menores valores se observaron cerca de la costa aumentando progresivamente hacia el oeste. Esta característica también fue reproducida por el modelo. Además, las bajas concentraciones mencionadas registraron variación estacional tanto en las observaciones como en el modelo, con una estructura cerca de la costa con mayor extensión vertical en verano que en otoño.

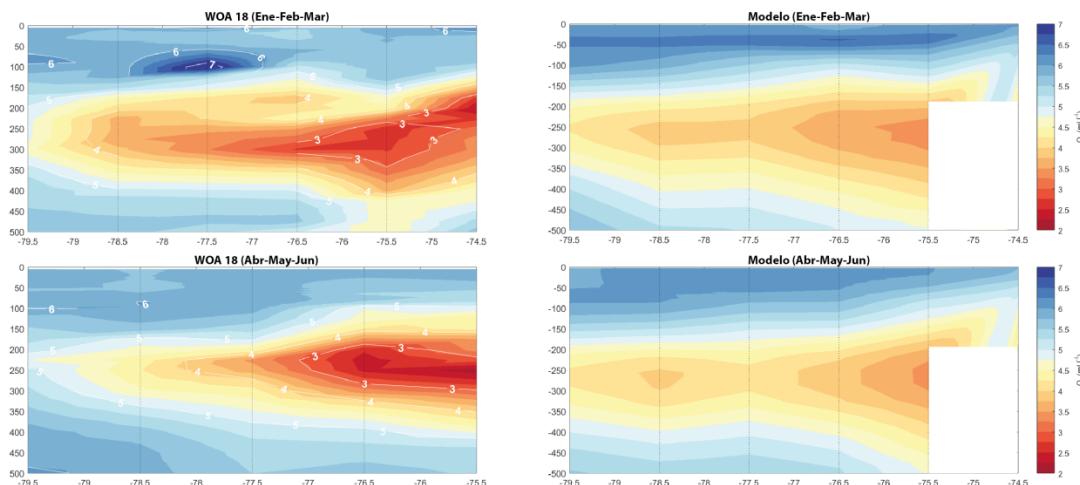


Figura 63: Distribución estacional de oxígeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la latitud 43.5 °S.

En general, las concentraciones de nitrato modeladas en la transecta a lo largo de la latitud 43.5 °S variaron entre 5 a 27 μM , donde los valores menores a 15 μM , se registraron en los primeros 100 m de profundidad y principalmente en el sector oceánico de la transecta (Fig. 64). A diferencia de lo observado en los datos WOA18, los menores valores se ubicaron en la zona costera, sin embargo al igual que los resultados del modelo las concentraciones menores a 15 μM se ubicaron sobre los 100 m. Bajo los 100 m las concentraciones de nitrato observadas en los datos WOA18 y modelados tendieron a aumentar gradualmente. Sin embargo en la zona cercana a la costa, el aumento de nitrato fue más abrupto que la zona oceánica. No obstante, las concentraciones del modelo son menores a las registradas en los datos observados WOA18 y la ubicación de las máximas

concentraciones entre los datos observados WOA18 y modelados se observaron desplazados.

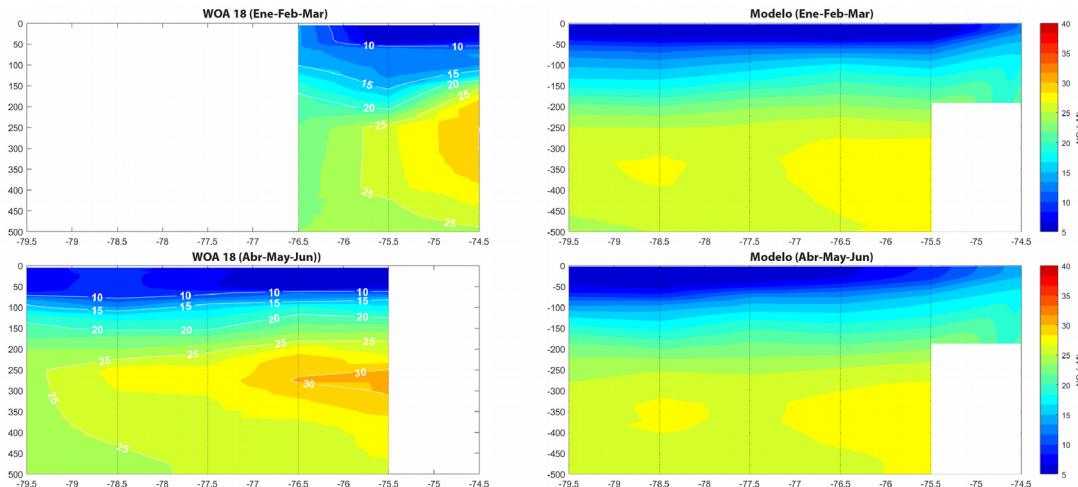


Figura 64: Distribución estacional de nitrógeno disuelto para la transecta ubicada a lo largo de la latitud 43.5 °S.

En la Boca del Guafo, la temperatura potencial y salinidad absoluta observada variaron entre 2 a 11 °C y 32 a 34.8 PSU (Fig. 65). En cuanto a las concentraciones de oxígeno disuelto, estas variaron entre 2 a 6.5 mL L⁻¹, donde las concentraciones mayores a 5 mL L⁻¹ estuvieron asociados a salinidades menores a 33.5 PSU. Además se observó que las concentraciones menores a 3 mL L⁻¹ estuvieron principalmente asociadas cuando la contribución de la AECC en la mezcla de las tres masas de aguas tuvo la mayor participación con un aporte de entre 50 al 75%, en menor grado al AIAA con un 25 a 50% y la ASAA con un 0 a 25%.

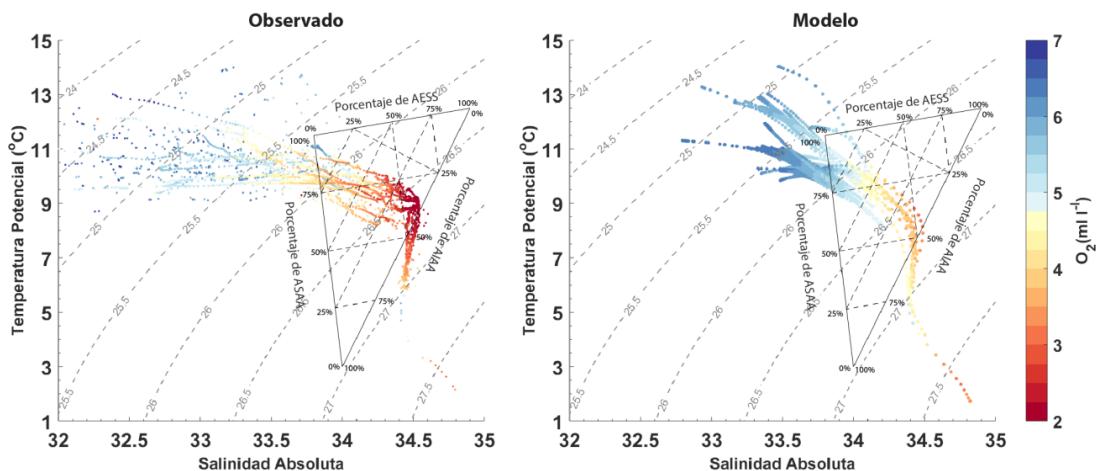


Figura 65: Diagrama de temperatura-salinidad asociado a oxígeno disuelto (mL L⁻¹) para los datos ubicados en boca del Guafo. Las líneas punteadas de color gris se corresponden a las isopicas y en línea negra los porcentajes de contribución de las masas de agua.

En general el modelo sobreestimó la temperatura potencial y salinidad absoluta, ya que la temperatura potencial varió entre 2 a 13 °C y la salinidad absoluta entre 33 a 34.8 PSU. Las concentraciones de oxígeno disuelto, también registraron esta tendencia, ya que variaron entre 2.5 a 6.5 mL L⁻¹. No obstante lo anterior, el modelo presentó cierta similitud con el diagrama de temperatura-salinidad observado, al asociar valores de bajas concentraciones de oxígeno a la mezcla de masas de aguas donde las masas de agua AECC y ASSA tuvieron mayor contribución. Los porcentajes de contribución asociados a las mínimas concentraciones de oxígeno fueron de aproximadamente 15%, 46% y 39% para la AIAA, ASAA y AECC, respectivamente.

Análogamente, las concentraciones de nitrato observadas en la Boca del Guafo aumentaron conforme aumentaba la densidad y variaron entre 5 a 40 µM. Las concentraciones menores a 25 µM estuvieron asociadas en promedio a valores de densidad menores a 26.75 y a principalmente cuando el aporte de la mezcla de las masas de agua fue dominada por la ASAA, sobre el 50%. En cuanto a las concentraciones de nitrato modelado se observó la misma tendencia de los datos observado, es decir un aumento de concentración a medida que aumenta la densidad (Fig. 66). Los valores de nitrato son parecido a los datos observados cuando la densidad es menor a 26.75. Sin embargo cuando la densidad aumenta las diferencias de nitrato observado y modelo son mayores, siendo el nitrato modelado menor a las concentraciones observadas.

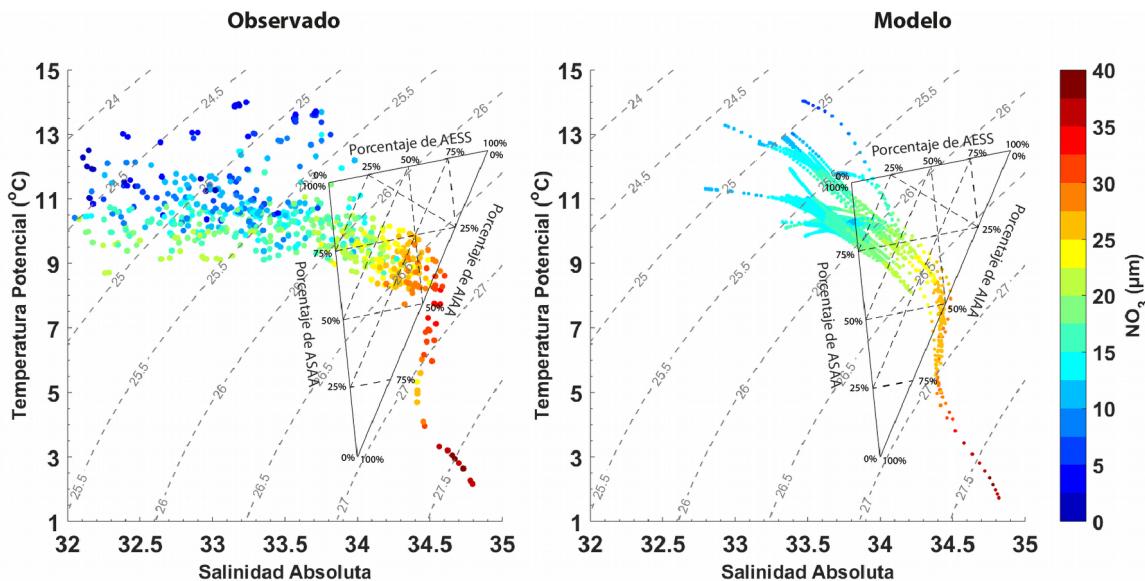


Figura 66: Diagrama de temperatura-salinidad asociado a nitrato disuelto (µM) para los datos ubicados en boca del Guafo. Las líneas punteadas de color gris se corresponden a las isopicas y en línea negra los porcentajes de contribución de las masas de agua.

La serie de tiempo del anclaje ubicada en boca del Guafo registró concentraciones de oxígeno disuelto que variaron entre 2.5 a 6.5 mL L⁻¹, donde se observó una clara variación

estacional en la distribución de concentración en la columna de agua (Fig. 67). Durante enero se registraron a 30 m de la columna de agua bajos valores de oxígeno disuelto. Sin embargo a partir de esta fecha, la columna de agua comenzó a oxigenarse registrando un aumento progresivo en las concentraciones de oxígeno, lo que resultó en una profundización de la isolínea de 4 mL L^{-1} y que durante junio a octubre casi no se observó. A partir de octubre las concentraciones de oxígeno disuelto comenzaron a disminuir progresivamente.

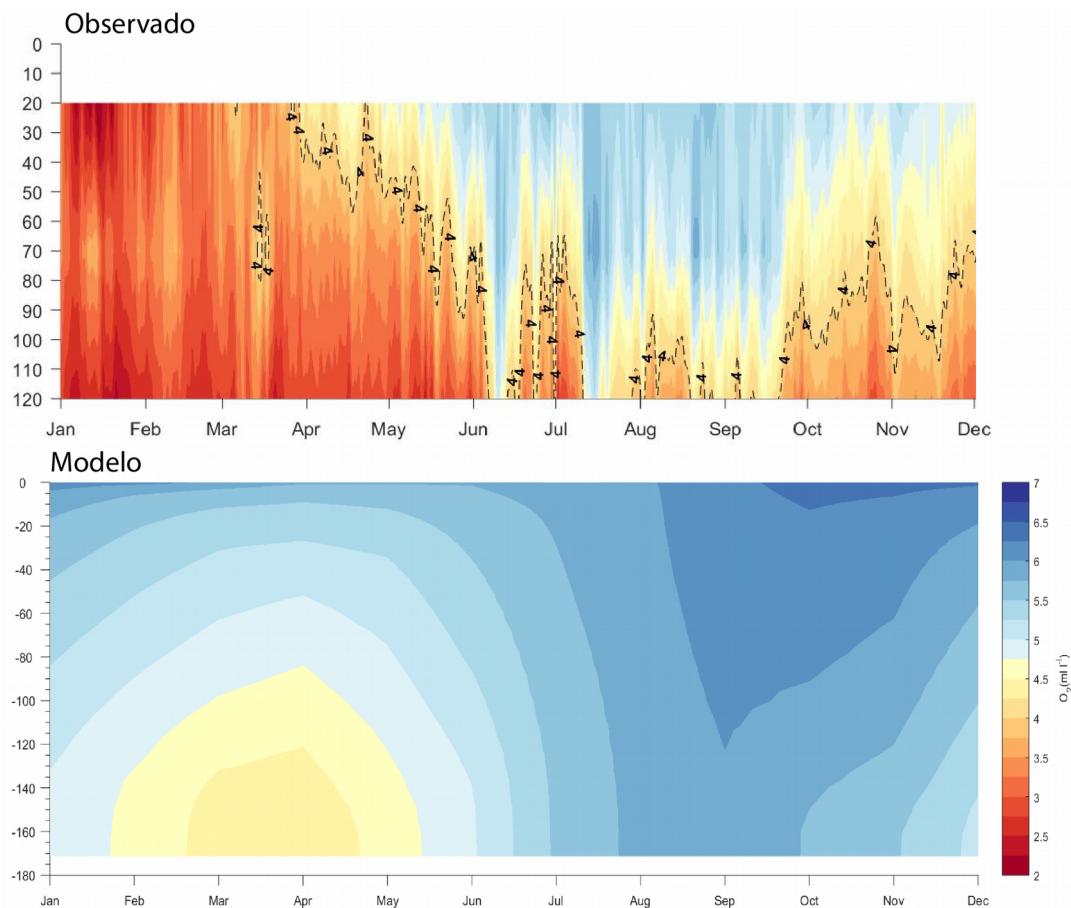


Figura 67: Distribución temporal de oxígeno disuelto observada y simulada en el anclaje ubicado en la boca del Guafo.

Finalmente, la distribución estacional del modelo en un punto cercano al anclaje varió entre 4.3 a 6.5 mL L^{-1} . En términos generales, se pudo identificar una columna de agua bien oxigenada, no obstante los datos de oxígeno disuelto modelados registraron una variabilidad estacional con una tendencia similar a la observada con menores concentraciones de oxígeno entre mediados de enero y mediados de mayo para posteriormente aumentar la concentración de oxígeno y en octubre disminuir progresivamente.

5.5.2 Modelo PISCES

Con el objetivo de observar si la simulación durante todo el periodo realizado se asemeja a los nutrientes y oxígeno de la zona de estudio comparamos los resultados obtenidos con los cruceros CIMAR y los datos del anclaje en la boca del Guafo. PISCES tiene 24 variables de estado, pero a modo de comparación con NPZD solo mostraremos las variables de nitrato y oxígeno disuelto.

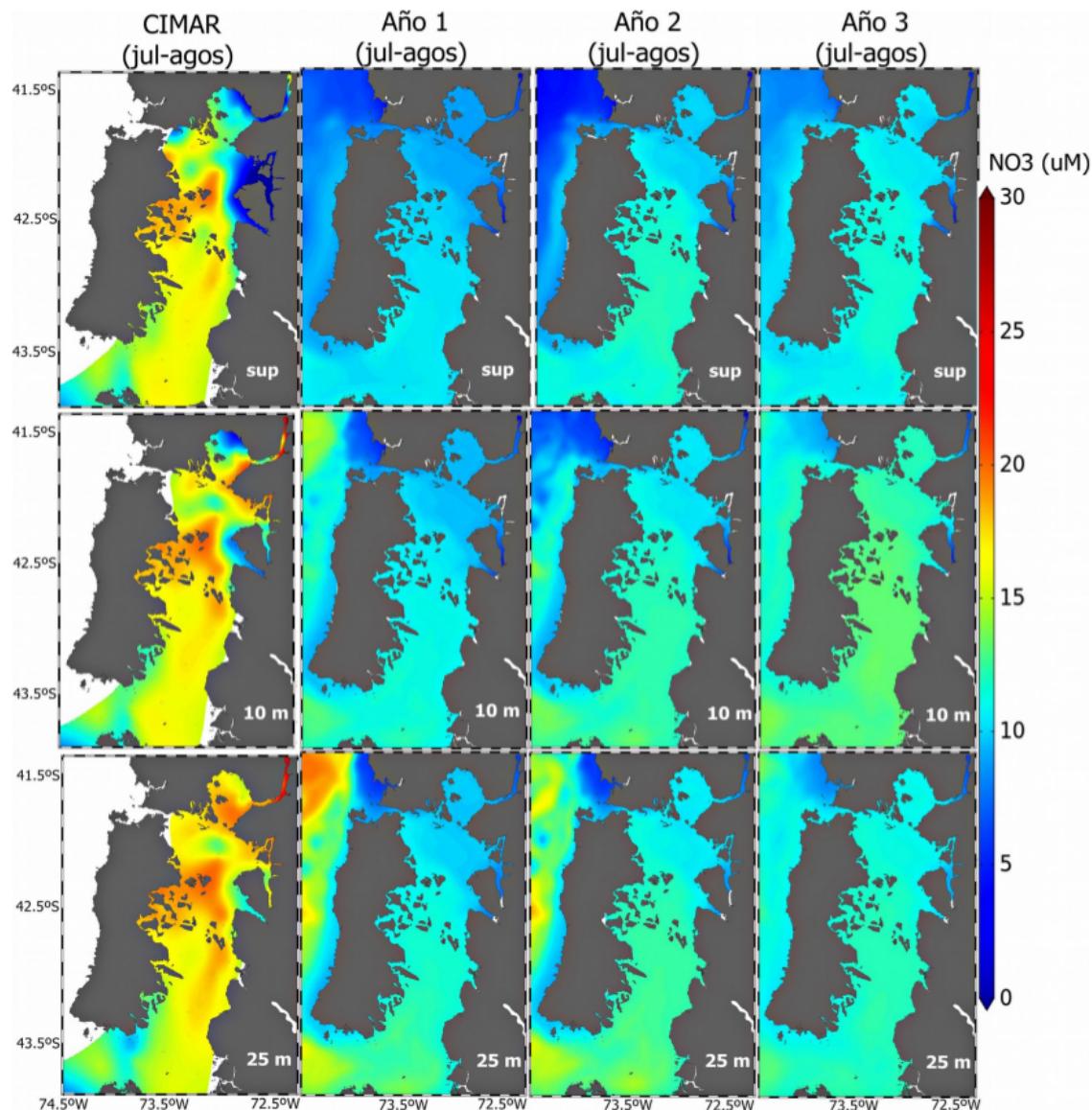


Figura 68: Nitrato en cruceros CIMAR (promedio julio-agosto) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros.

Las concentraciones registradas por los cruceros CIMAR durante invierno en superficie oscilaron entre 0 y 20 μM , presentándose los valores más altos al centro del mar interior de Chiloé y los más bajos en la costa continental. Los años simulados en cambio,

no presentaron los contrastes observados por los datos reales, detectándose en la zona norte del mar interior, valores más bajos que en la zona sur (Fig. 68). Las concentraciones en todo el periodo no superaron los 11 μM . El año 2 presentó valores levemente mayores a 13 μM . En 10 m de profundidad, los cruceros CIMAR presentaron el mismo patrón que en superficie respecto a la simulación. Los años 2 y 3 son los que presentaron valores un poco más altos (entre 11 y 14 μM aproximadamente). En 25 m, los cruceros CIMAR presentaron valores levemente más altos, con ~25 μM en el seno de Reloncaví. Los años 1 y 2 de la simulación, presentaron valores relativamente mayores y similares a los cruceros CIMAR en la Boca del Guafo, los cuales fluctuaron entre (12 y 15 μM).

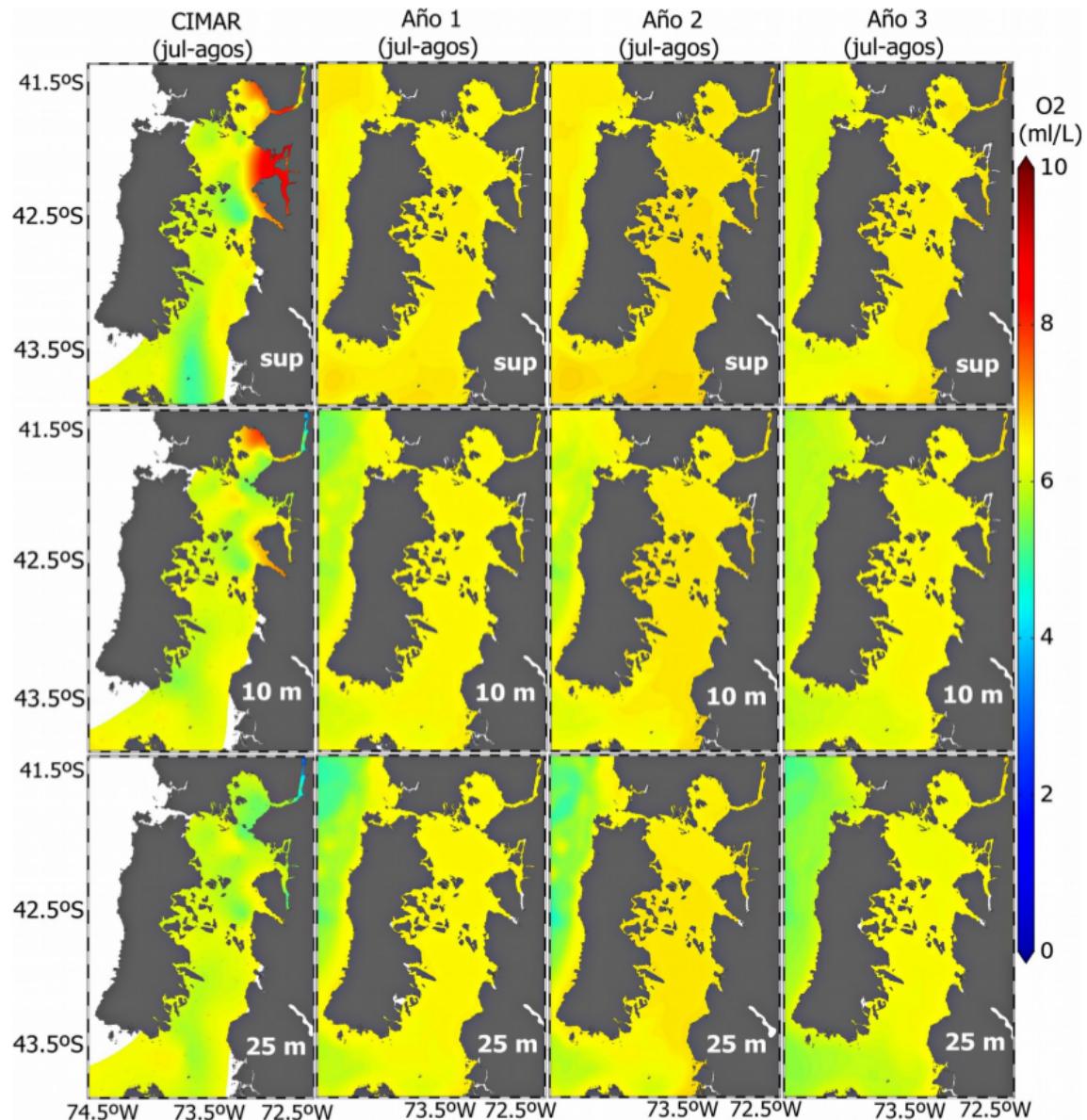


Figura 69: Oxígeno en cruceros CIMAR (promedio julio-agosto) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros.

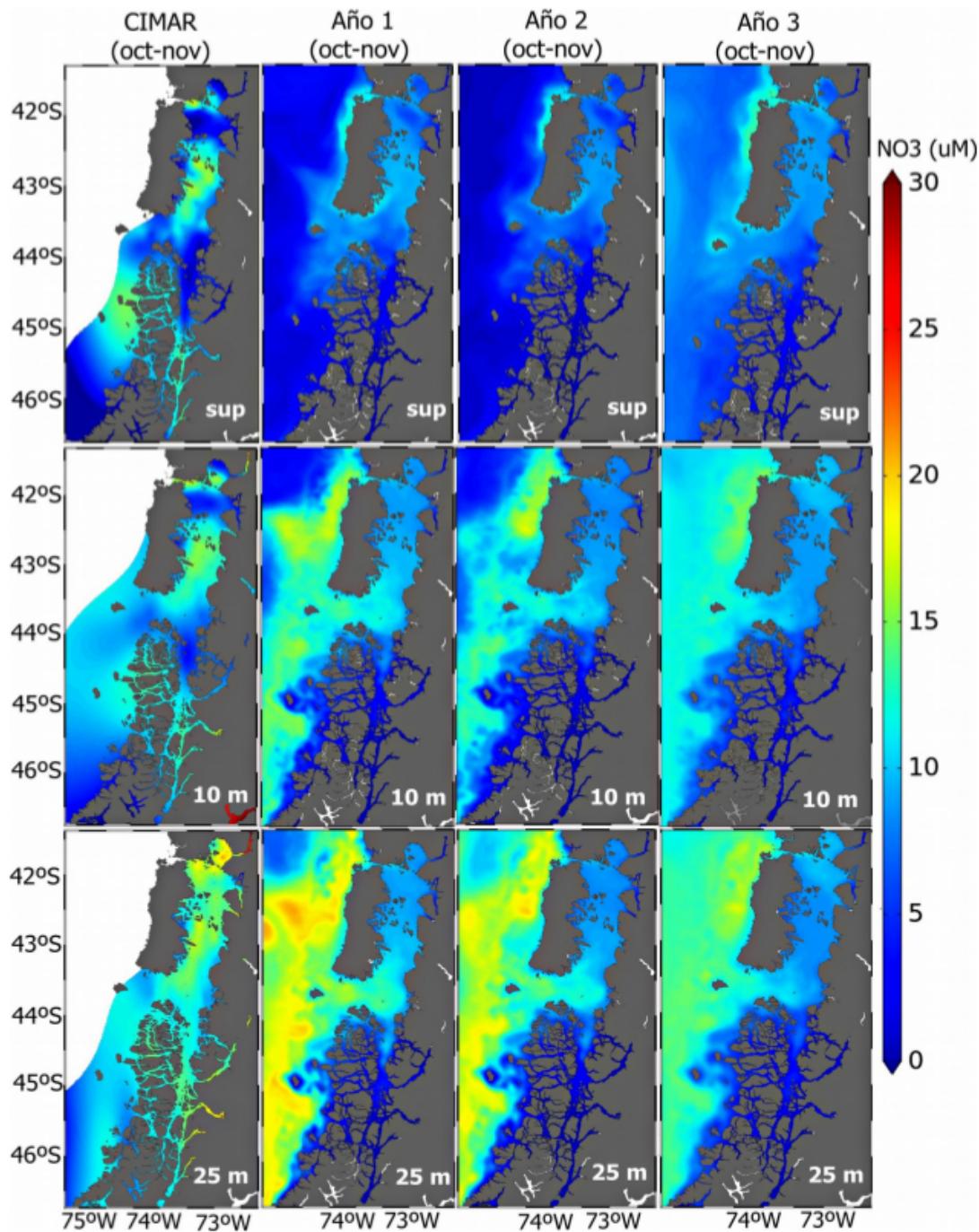


Figura 70: Nitrato en cruceros CIMAR (promedio octubre-noviembre) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros.

Los valores tanto de los datos reales como de los años 1, 2 y 3, presentaron concentraciones de oxígeno disuelto, tanto en 10 como en 25 m muy similares, fluctuando entre ~ 5 y 6 mL L^{-1} (Fig. 69). Bajos valores se detectaron en la boca del Guafo y zona externa al mar interior de Chiloé, especialmente en 25 m. Sin embargo, los cruceros

CIMAR presentaron altos valores de oxígeno disuelto en superficie, sobre todo hacia el Golfo de Ancud y Seno de Reloncaví con concentraciones que llegaron incluso a 10 mL L^{-1} . Las altas concentraciones detectadas en las zonas mencionadas anteriormente, no se reflejan en la simulación.

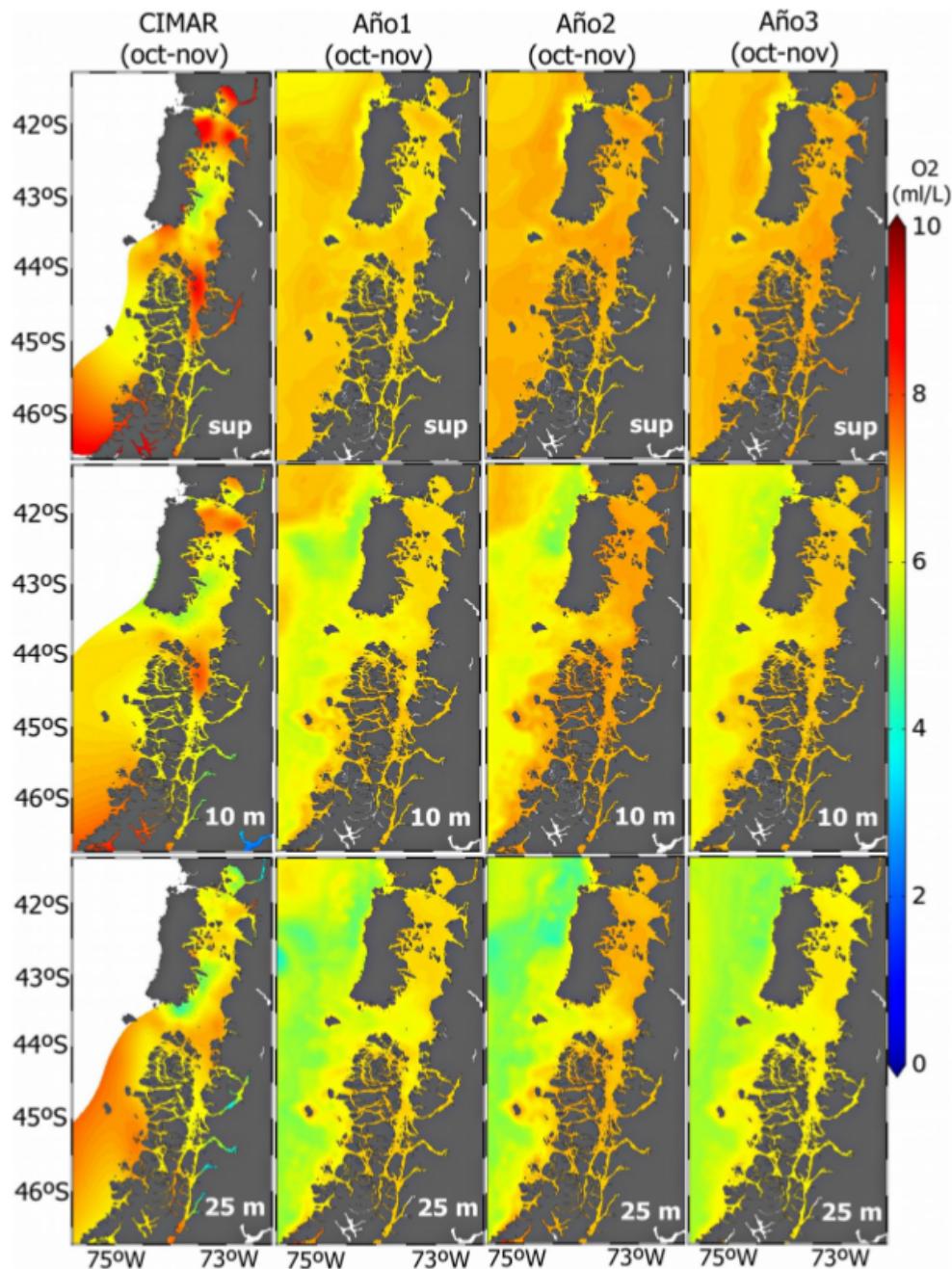


Figura 71: Oxígeno en cruceros CIMAR (promedio octubre-noviembre) versus años 1, 2 y 3 de simulación MOSA-PISCES para el mismo periodo en superficie, 10 y 25 metros.

En los cruceros CIMAR se detectaron altos valores de nitrato en superficie ($\sim 15 \mu\text{M}$) en el mar interior de Chiloé durante primavera, en la zona del canal de Chacao, en el seno de Reloncaví, así como desde los canales Desertores, Apiao e Imelev hacia el sur (Fig. 70). También se observaron altos valores entre 44 y 46 °S. En 25 m, todo el mar interior de Chiloé presentó altas concentraciones, particularmente en el Golfo de Ancud, Seno y fiordo Reloncaví ($> 25 \mu\text{M}$). En el fiordo de Aysén también se presentaron altas concentraciones ($\sim 20 \mu\text{M}$). Los años 1, 2 y 3 de simulación en superficie, presentaron concentraciones más bajas que las observadas en los cruceros CIMAR, con valores que fluctuaron entre 9 y 12 μM aproximadamente en el mar interior de Chiloé. En 10 m de profundidad, los tres años de simulación presentaron valores similares a los datos CIMAR sobre todo en la zona sur del mar interior de Chiloé y Boca del Guafo. En 25 m, concentraciones similares se observaron los años 1 y 2, exceptuando la zona sur del área de estudio (entre 44 y 46.5 °S).

En superficie los cruceros presentaron altos valores de oxígeno disuelto durante primavera, especialmente en la zona norte del mar interior de Chiloé y en la zona sur del área de estudio, con valores que alcanzaron incluso 10 mL L^{-1} (Fig. 71). La simulación en superficie durante los tres años analizados no presentó mayor variabilidad, observándose valores entre 6 y 7.5 mL L^{-1} aproximadamente. En 10 m, el oxígeno de la simulación en los tres años analizados, adquirió valores similares a los cruceros CIMAR, excepto que estos últimos presentaron las más altas concentraciones en la zona norte del mar interior y en el sur de la zona de estudio. En 25 m, la concentración de oxígeno de los cruceros disminuyó en comparación a las otras profundidades. En esta profundidad se registraron mayores similitudes con la simulación, con valores que fluctuaron entre 6.5 y 7 mL L^{-1} .

Finalmente, se compararon los datos de oxígeno disuelto del anclaje instalado la boca del Guafo con la simulación en esta misma zona. Los datos de oxígeno provenientes del anclaje fueron transformados desde las unidades mgL^{-1} a mL L^{-1} ($1 \text{ mg/l} = 0.700 \text{ ml/l}$). Los datos de oxígeno registrados cada 10 minutos iniciaron el 19-08-2018 y finalizaron el 9-02-2020. Con esta información se calculó una climatología anual. Podemos observar que los datos del anclaje en 70 m presentaron bajas concentraciones de oxígeno entre enero y abril (2.8 y 3.8 mL L^{-1}), los mayores valores se registraron entre junio y diciembre, presentando agosto los mayores valores (5 mL L^{-1}). Los tres años de la simulación presentaron concentraciones de oxígeno con una tendencia similar a lo capturado por el anclaje (Fig. 72), aunque con valores mucho más altos durante todo el año (entre 4.9 y 6 mL L^{-1}). En 105 m, el oxígeno del anclaje presentó un patrón similar a lo observado en 70 m, aunque con valores mucho menores, fluctuando entre 2.3 y 4 mL L^{-1} . Los años 1, 2 y 3 de simulación en 105 metros presentaron concentraciones de oxígeno con una tendencia equivalente a lo detectado por el anclaje, con altos valores entre junio y noviembre, pero mucho más altos durante todo el año (entre 4.9 y 5.9 mL L^{-1}).

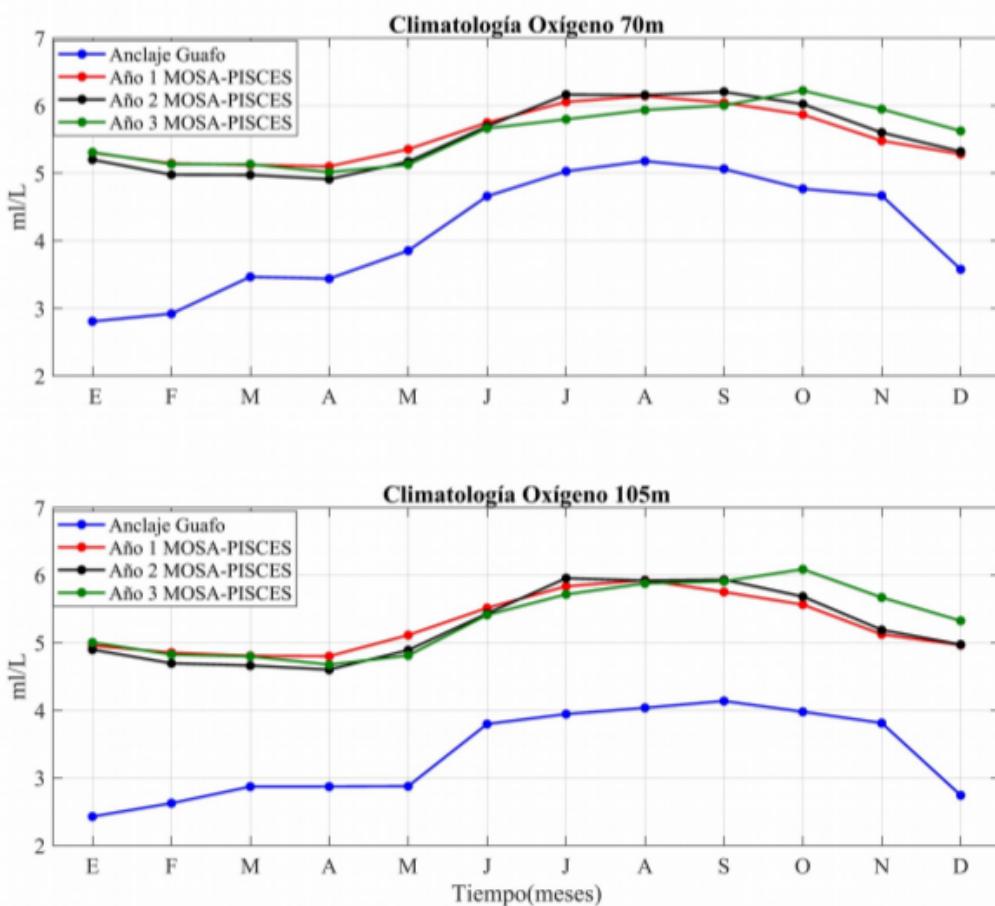


Figura 72: Climatología de oxígeno disuelto (ml/L) en la boca del Guafo versus oxígeno disuelto modelado con PISCES durante los años 1, 2 y 3 de simulación a 70 y 105 metros de profundidad.

Para finalizar, hay que destacar que las simulaciones acopladas del modelo CROCO y PISCES de 2.7 km de resolución espacial tarda aproximadamente 20 días en simular cada año de modelación utilizando 44 procesadores en un servidor de alto rendimiento.

5.6 Resultados objetivo específico 6: Mejorar visualización de resultados en plataforma web 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 en la etapa IV de este proyecto, 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 para 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

(Fig. 73). 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.

The screenshot shows the CHONOS system homepage. At the top left is the IFOP logo and text "INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO". At the top right is a "AREA USUARIOS" button. The main title "CHONOS" is prominently displayed with a blue circular graphic element. Below it is the subtitle "Sistema de Información Oceanográfica". A descriptive text states: "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...](#)". Below this are five cards representing different tools:

- MOSA**: Shows a map with color-coded currents and a vertical color bar legend. Description: "MOSA-ROMS-WRF. Entrega proyecciones sinópticas a 72 horas de corrientes, temperatura, salinidad y variables atmosféricas entre las regiones de los Lagos y Aysén".
- PARTI-MOSA**: Shows a map with complex trajectories. Description: "Modulo de partículas PARTI-MOSA. Modulo desacoplado, que funciona con los resultados de MOSA-ROMS, para simular trayectorias de partículas".
- CLIC**: Shows a map with purple dots representing connectivity statistics. Description: "Estadísticas de conectividad entre parcelas de agua a través de escenarios climatológicos. CONECTIVIDAD CLIC".
- ATLAS**: Shows a map with depth contours and a vertical color bar legend. Description: "Atlas oceanográfico. Base de datos de simulación oceanográfica".
- TIEMPO REAL**: Shows a time-series plot of meteorological observations. Description: "Observaciones meteorológicas en tiempo real".

Figura 73: Pagina de inicio del portal web del sistema de información oceanográfica, CHONOS (www.ifop.cl/chonos).

El portal web se encuentra operativo y se puede ingresar a él en la pagina www.ifop.cl/chonos. Esta pagina además 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.

MOSA-ROMS ha mejorado la visualización de resultados, permitiendo exportar datos y generar transectas de forma mucho más amigable (Fig. 74). 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 es utilizado como forzante atmosférico para el 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.

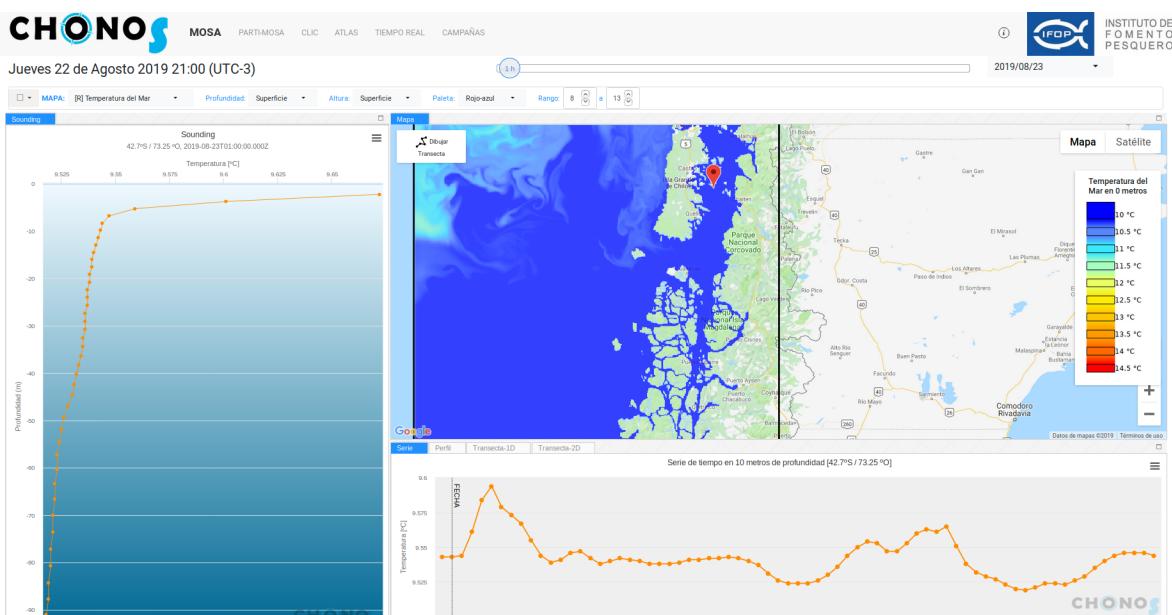


Figura 74: Ejemplo de visualización de los resultados de MOSA-ROMS y MOSA-WRF en la plataforma web del proyecto CHONOS (www.ifop.cl/chonos)

6. DISCUSIÓN

6.1 Modelo operacional MOSA-ROMS.

Desde el comienzo del programa de “Desarrollo de sistema de predicción Sinóptico”, se ha puesto esfuerzo en la constante mejora del modelo operacional MOSA-ROMS, 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 realizamos una actualización de la batimetría del dominio y actualizamos algunas fuentes puntuales de agua dulce. A su vez, se realizaron pruebas para estudiar el comportamiento del modelo con distintas parametrizaciones físicas de esquemas de turbulencia vertical y de advección lateral. Todo esto con el fin 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.

Se corrigieron valores de batimetría en zonas donde existían perfiles de fondo poco realistas, y que podrían ser sensibles en la calidad de los resultados. Estos cambios fueron acompañados con procesos de suavizado necesarios para hacer funcional las grillas en ROMS, y que le otorgan estabilidad numérica a las simulaciones. 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 Aysen, los procesos de suavizado tendieron a modificar levemente la batimetría original, por lo que se deberá revisar el impacto de estos cambios. Un aspecto relevante de utilizar esta nueva batimetría es que nos permitió migrar el modelo base de pronóstico desde el modelo ROMS-AGRIF al modelo CROCO. Esta cambio fue realizado en Octubre del 2019 y se ha mostrado que el modelo es estable con esta nueva batimetría.

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 profundidad de la batimetría los niveles tienden a separarse, ya que se debe mantener su grado de distribución, y esto puede causar una perdida de resolución en superficie y eventualmente una pérdida de calidad de los resultados. Esto sigue siendo una

actividad para evaluar y de momento se mantienen los mismos valores de configuración de los niveles verticales.

Con respecto a las pruebas realizadas con las diferentes esquemas de turbulencia vertical y de advección lateral. Si bien, estos resultados mostraron diferencias significativas en la reproducción de procesos de mezcla y estratificación, la configuración actual del modelo operacional MOSA-ROMS es la que más se ajusta a los datos observados. Por esta razón no se realizaron cambios en estas parametrizaciones. De todos modos, cabe destacar que las parametrizaciones numéricas están en constante desarrollo por la comunidad científica y por lo tanto, cualquier nueva versión o actualización de estas debe ser analizada.

Un objetivo permanente de este proyecto es evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico operacional MOSA-ROMS. Las evaluaciones que se han realizado a través de las distintas etapas de desarrollo de este 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.

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 rangos de valores consistentes con la precipitación de la zona. En términos generales, MOSA-ROMS fue capaz de reproducir las estructuras termohalinas típicas de la zona para cada una de las estaciones del año en comparación con datos observados de CTD. Las mayores diferencia se dieron en profundidades someras, donde el modelo carece de valores bajos de salinidad en superficie debido a las dificultades ya mencionadas.

Un factor importante a mencionar es que se debe tener precaución al 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 siempre un equilibrio entre la calidad de las simulaciones y la estabilidad del modelo. Nosotros priorizamos que el modelo “siempre esté operativo”. Esto nos lleva a ser bastante rigurosos con los cambios a realizar, por lo que se ha optado por un ingreso gradual de datos de ríos, a medida que se tiene información disponible. En esta etapa incorporamos información de un modelo hidrológico basado en el modelo VIC. De este

modo, MOSA-ROMS ahora funciona con 35 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.

La evaluación de las corrientes en el presente informe muestran una buena correlación con los datos de ADCP en la boca del Guafo y el canal Moraleda. Si bien se observa una sobreestimación de la intensidad del flujo (más evidente en Boca del Guafo y particularmente hacia el norte en canal Moraleda), la mayor densidad de las mediciones se ajustan de manera correcta. Un aspecto a mencionar es que las corrientes simuladas mostraron máximos de variabilidad en las escalas diurna, semi-diurna y estacionales, tal como era esperable al analizar espectros de coherencia y fase.

Finalmente, hay que destacar el enorme esfuerzo desarrollado en mantener operativo el sistema y en lograr disminuir gradualmente los errores en las diferentes variables oceanográficas. Al comienzo la mirada estaba centrada en procesos regionales, pero con el paso del tiempo el modelo ha mostrado un gran desempeño en reproducir procesos locales e incluso procesos de escala sinóptica, como lo demuestra la comparación con una boyta oceanográfica ubicada en el seno del Reloncaví.

6.2 Modelo operacional MOSA-WRF

En el caso de MOSA-WRF, podemos evidenciar que el modelo ha logrado un alto grado de estabilidad, alcanzando una operatividad de más de 2 años, con un rendimiento del ~98%. Los pocos fallos que se han experimentado, se dieron en etapas iniciales del proyecto, principalmente debido a problemas relacionados con los servidores desde donde se descarga la información global que alimenta las condiciones de borde del modelo. Sin embargo, este obstáculo fue superado mediante la búsqueda exitosa de un forzante alternativo, CFS, en el caso de que GFS no estuviera disponible y de esta manera lograr continuidad en la operatividad de MOSA-WRF. En ocasiones puntuales, el sistema también 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. Con estas mejoras el rendimiento de MOSA-WRF a progresado notablemente en esta última etapa.

En términos de sus resultados, MOSA-WRF logró resolver de manera aceptable la variabilidad del viento a lo largo del periodo que lleva activo. Esta variable juega un rol fundamental en el sistema hidrodinámico ya que es uno de los principales forzantes de la superficie del océano y por lo tanto toma vital relevancia a la hora de evaluar el pronóstico atmosférico. En esta oportunidad se utilizó el método de la Transformada de Wavelet para

identificar las periodicidades más importantes de la circulación del viento. Para el caso de Cucao, Melinka y Apiao (zonas con mayor influencia oceánica y topografía abierta), el modelo obtuvo una importante aproximación a las observaciones, reproduciendo de buena manera las bandas de frecuencia de mayor energía para las distintas escalas temporales, tales como escala diaria, sinóptica e inter-estacional. No obstante, existe un mayor grado de desajuste para las estaciones ubicadas en sectores con topografía compleja, como Huinay e isla Marimeli, en donde las estaciones registran principalmente una variabilidad de escala local, en términos espaciales. En ambos casos el modelo, además de reproducir ciclos diarios, describe una importante influencia de procesos de mayor escala temporal. Una de las tareas pendiente para etapas próximas, es precisamente re-localizar estas estaciones llevándolas a terrenos en donde se puedan medir de manera más representativa la dinámica atmosférica por sobre la escala diaria en términos temporales.

Paralelo a estos resultados y con el fin de resolver de manera más realista las características del terreno presente en los sectores con topografía irregular, se desarrolló un dominio de mayor resolución espacial (MOSA-WRF de 3 km). Con esto se buscó mejorar la circulación atmosférica de MOSA-WRF, la cual está altamente regulada por estas características. Luego de evaluar el sistema MOSA-WRF y MOSA-WRF3km contra las observaciones, se puede concluir que se obtuvieron buenos resultados para el dominio de mayor resolución espacial, ya que este logró afirmar la hipótesis sostenida.

Por un lado, en la estación de Huinay, ubicada en la boca de un valle cordillerano y rodeada de terreno irregular MOSA-WRF3km logró representar una circulación orientada en el mismo sentido de este valle, que MOSA-WRF no logró resolver. Y por otro lado, la presión atmosférica mostró una notable mejoría luego de aumentar la resolución espacial del pronóstico a 3 km, siendo Huinay y Marimeli las estaciones que presentaban un error de mayor magnitud, principalmente relacionado con el sesgo derivado de la incorrecta representación de la topografía. Dicho error fue minimizado por el modelo de resolución más fina, lo que nos permite afirmar que existe mayor precisión a la hora de resolver este terreno montañoso y así representar de manera más realista la altura del terreno y por lo tanto los procesos modulados por este factor.

Finalmente con respecto a la implementación del método de asimilación de datos, quedó una tarea pendiente relacionada a la indagación y aplicación del módulo de WRF que resuelve esta técnica (WRFDA), ya que la emergencia sanitaria relacionada al brote de una pandemia (covid-19) imposibilitó en gran parte este objetivo, ya que estaba agendada una visita a Estados Unidos, junto a los desarrolladores del modelo WRF. No obstante, con el experimento simple de asimilación de datos desarrollado pudimos observar que un sistema de esta naturaleza, para que tenga influencia significativa en los resultados, debería tener una frecuencia al menos de 6 horas, ya que esta es la frecuencia de ingreso de las condiciones de borde obtenidas de los modelos de pronóstico global.

6.3 Modelo biogeoquímico.

Se lograron implementar dos modelos biogeoquímicos de 2.7 km de resolución espacial para las regiones de Los Lagos y de Aysén. El primer modelo consistió en un modelo simple NPZD y el segundo a el modelo PISCES, el cual 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). Debido a los tiempos de computo y a los recursos computacionales disponibles se simularon 8 años de con el modelo NPZD y 4 años con el modelo PISCES. El modelo NPZD demora aproximadamente 5 días en simular 1 año, mientras que PISCES tarda alrededor de 20 días en simular la misma cantidad de tiempo utilizando 44 procesadores en un servidor de alto rendimiento. Esta diferencia en los tiempos de computo se debe a la cantidad de variables de estado extras que calcula el modelo PISCES en comparación con NPZD.

Con el fin de tener modelos comparables ambos modelos utilizaron las mismas condiciones de borde oceanográficas, forzantes atmosféricos y fuentes de información de agua dulce. Las condiciones de borde hidrodinámicas fueron obtenidas de una climatología del producto Mercator-Ocean. Las condiciones de borde biogeoquímicas fueron obtenidas de la base de datos WOA-PISCES. La clorofila fue extraída desde SeaWifs. Los flujos de calor atmósfera-océano fueron obtenidos de COADS. Los vientos superficiales de una climatología diaria del producto QuickSCAT. La fuente de información de caudales de ríos fueron obtenidos de datos de la DGA y un modelo hidrológico basado en VIC. Del mismo modo, ambos modelos utilizaron las mismas parametrizaciones físicas.

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. PISCES cuenta con 24 variables estado y más de 60 constantes y coeficientes para modificar (Aumont y Bopp, 2006). 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.

En relación a los resultados, tanto los modelos NPZD y PISCES fueron capaz de reproducir las variaciones estacionales de la estructura de bajo contenido de oxígeno ubicada entre los 200 y 300 m de profundidad observadas en las transectas latitudinal y longitudinal realizada con datos WOA18. A su vez, en la boca del Guapo se pudo identificar una columna de agua bien oxigena con una variabilidad estacional en ambos modelos

biogeoquímicos. Ambos modelos mostraron una tendencia similar a los datos observados con menores concentraciones de oxígeno disuelto entre mediados de enero y mediados de mayo, para posteriormente aumentar la concentración de oxígeno y en octubre disminuir progresivamente.

6.4 Modelo regional para la región de Magallanes.

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

Aunque se han realizado diversos estudios que han abordado la hidrodinámica de la región, generalmente se opta por enfoques altamente locales, o sobre la incidencia de las propiedades conservativas del agua sobre organismos específicos, considerando que la región posee una importante industria pesquera y una creciente salmonicultura. Estos estudios generalmente son acotados espacial y temporalmente en alguno de los micro sistemas presentes en la región. No obstante, existen estudios que han englobado una mirada regional sobre procesos en la zona cuyos trabajos identifican patrones hidrográficos y de propagación de marea en la zona (Calvete & Silva, 2002; Salinas et al., 2004), así como también algunos estudios basados en modelos numéricos (Aiken, 2008; Brun et al., 2020). No obstante, se carece de herramientas que permitan conocer la evolución sinóptica del sistema. Es ahí donde recae el valor de la iniciativa del proyecto, donde un modelo operacional en la zona puede lograr un aporte considerable al conocimiento de los procesos presentes, como también de permitir adelantar escenarios críticos ambientales, haciendo de MOSAM01 una herramienta potencialmente valiosa.

Los resultados de este estudio muestran que es posible generar pronósticos oceanográficos a un horizonte de 3 días con el modelo MOSAM01 de 1.5 km de resolución horizontal, el cual incluye temperatura, salinidad y corrientes (como también variables atmosféricas a través del modelo WRF diseñado para este dominio). El tiempo total del pronóstico es de ~7 horas considerando los tiempos de descarga de datos y de simulación

en un servidor de alto rendimiento. A su vez, el modelo operacional global Mercator-Ocean se presenta como una opción valida para forzar los bordes del modelo, y podría ayudar a la construcción de una condición inicial, que podría ser modificada eventualmente. En la eventualidad de realizar dicha implementación, se sugiere aumentar la capacidad de computo, de modo que permita incursionar en el desarrollo de modelos anidados mas pequeños, que sean alimentados por este modelo regional, y así aumentar la resolución en áreas específicas, especialmente en las áreas que a día de hoy demandan mayor interés en la región, como lo son el Seno Skyring o el golfo Almirante Montt, los cuales a su vez se presentan como sistemas altamente frágiles y fuertemente influenciados por masas glaciares de los cuales se dispone de escasa información oceanográfica.

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

De todos modos, se espera mejorar considerablemente las condiciones iniciales del modelo incorporando fuentes de agua dulce. Las fuentes de agua dulce influyen en el flujo baroclínico que conducen la circulación en regiones dinámicamente complejas de influencia del agua dulce (ROFI) y corrientes costeras (O’dea et al., 2012). Estas están disponibles de un modelo hidrológico de alta resolución, elaborado por un consultor externo, que entrega caudales de todas las cuencas presentes en el dominio. Hay que tener en cuenta que el ingreso de volumen extra al modelo podría generar una perdida de la estabilidad de este. Se espera en la siguiente etapa generar pruebas de sensibilidad que logren una versión estable con dichas fuentes.

En resumen, se cuenta con un modelo regional para la región de Magallanes de ~1.5km de resolución espacial, el cual se encuentra en etapas iniciales de desarrollo, pero que ya ha demostrado ser estable, y que podría ser utilizado para un futuro modelo operacional de pronósticos oceanográficos. Sin embargo aún quedan desafíos pendientes en cuanto a la calidad de los resultados, así como también trabajar en mejorar sus condiciones iniciales, lo cual será abordado en la etapa siguiente a través de la incorporación de fuentes

de agua dulce disponibles de un modelo hidrológico. También se hace hincapié en la falta de datos de monitoreo disponibles, lo cual podría dificultar su eventual implementación.

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. En el caso de MOSA-ROMS se migró a la nueva versión de ROMS, CROCO. A su vez, se mejoró la batimetría y actualizaron algunas fuentes puntuales de agua dulce. También se realizaron pruebas no operacionales con diferentes esquemas de turbulencia vertical y advección lateral. Para MOSA-WRF se trabajó en la mejora del forzante atmosférico de 5 km y en evaluar de manera no operacional un nuevo modelo 3 km. Del mismo modo se trabajó en la confección de un modelo biogeoquímico no operacional de 2.7 km y de un modelo físico de ~ 1 km para la región de Magallanes.

Se ha evaluado el desempeño del modelo operacional mediante una validación espacio-temporal de las variables pronosticadas entre 2017 y 2020. Los resultados reflejan la habilidad del modelo de reproducir de manera óptima la variabilidad estacional de la temperatura superficial, tanto en fase como en amplitud, evidenciando un mayor ajuste en el sector de mar abierto disminuyendo gradualmente hacia mar interior alcanzando correlaciones entre 0.8-0.9. De igual manera, se nota un alto ajuste en la variabilidad estacional de la salinidad superficial en mar abierto y una buena habilidad para reproducir los patrones observados de las estructuras termohalinas, pero con subestimaciones en la región más somera. Por otro lado, al comparar el pronóstico operacional con la boya oceanográfica ubicada en el Seno de Reloncaví se observó una relación significativa en la temperatura superficial, con un índice de correlación de 0.9 y una raíz del error cuadrático medio inferior a 1.3 °C. Finalmente las componentes de la corriente evaluadas en dos puntos del dominio por medio de anclajes ADCP muestran que en ambos casos los ejes de máxima varianza prácticamente coinciden entre el modelo y las observaciones, con desviaciones leves menores a 3°. También los máximos espectrales se encuentran bien definidos en ambas bases de datos, resaltando la importancia de la marea en estas zonas y la capacidad del sistema operacional de reproducir este fenómeno de manera óptima.

En el caso de MOSA-WRF, logramos observar que el modelo de mayor resolución (MOSA-WRF3km) puede resolver de mejor manera ciertos patrones atmosféricos en sectores de topografía compleja que otros modelos de menor resolución como lo son MOSA-WRF o modelos globales como GFS. Por lo tanto el siguiente paso será, implementar el pronóstico operativo MOSA-WRF3km como el oficial, para ser exhibido en la plataforma CHONOS y además como forzante atmosférico de MOSA-ROMS.

En el caso de los modelos biogeoquímicos ambos modelos implementados resultaron satisfactorios. El modelo biogeoquímico NPZD simuló de manera cualitativa la distribución espacial y estacional de la concentración de oxígeno disuelto, pudiendo replicar la estructura de mínima de oxígeno disuelto observada. No obstante, el modelo no fue capaz de reproducir las bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Estos procesos también fueron reproducidos con el modelo PISCES. La diferencia entre modelos radica en los tiempos de computo y en las variables de estado que se calculan.

Análogamente al desarrollo de MOSA-ROMS para las regiones de Los Lagos y de Aysén, se logró implementar un modelo físico de alta resolución (~1.5 km) en la región de Magallanes. Si bien este modelo aún requiere ajustes importantes, especialmente en el campo de masa, ha respondido de manera satisfactoria a las pruebas de estabilidad, manteniendo una batimetría que mantiene los rasgos relevantes de la zona. También se ha podido realizar un pronóstico de prueba, probando que podría ser factible su implementación a futuro. Se espera que la incorporación de fuentes de agua dulce genere un fuerte impacto en el campo de masa del modelo. No obstante, aún se adolece de la falta de datos *in situ*, y especialmente datos en linea que permitan evaluar en tiempo (cuasi) real el grado de error de este, por lo que por el momento se seguirá trabajando mayormente con productos satelitales.

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. Por último, la herramienta de dispersión de partículas PartiMOSA fue migrada al mismo servidor donde está alojada la pagina web y a su vez, se cambió el motor de mapas de GoogleMaps por OpenStreetMap.

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

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (8)$$

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.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

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

$$\rho = \rho_0 = cte \quad (10)$$

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

$$\vec{u} \cdot \nabla (-H) = w \quad (11)$$

5. **Conservación de momento horizontal.**

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| u}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| v}{\rho_0}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v + fu = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla_h (K_{Mh} \cdot \nabla_h v) + \frac{\partial}{\partial z} K_{Mv} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

6. Ecuaciones conservativas de trazadores temperatura y salinidad

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla_h (K_{Th} \cdot \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = \nabla_h (K_{Sh} \cdot \nabla_h S) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (15)$$

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:

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

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

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

$$K_{sv} \frac{\partial S}{\partial z} = 0$$

Flujo de sal

ANEXO B: MODELO OPERACIONAL MOSA-WRF

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

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

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

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{\mu} \quad (16)$$

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 (16) 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. 75). 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:

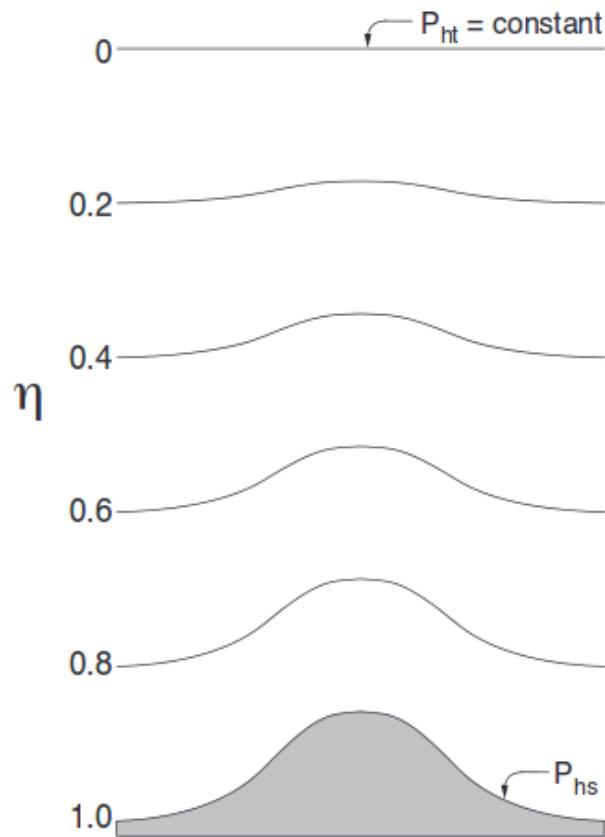


Figura 75: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno.
Fuente Skamarock et al. (2005)

$$V = \mu v = (U, V, W), \Omega = \mu \eta', \Theta = \mu \theta \quad (17)$$

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

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\varphi_\eta) + \partial_x(p\varphi_x) = F_U \quad (18)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\varphi_\eta) + \partial_y(p\varphi_y) = F_V \quad (19)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (20)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\theta \quad (21)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (22)$$

$$\partial_t \varphi + \mu^{-1} [(V \cdot \nabla_\varphi) - g W] = 0 \quad (23)$$

Junto con la relación de diagnóstico para la densidad inversa:

$$\partial_\eta \varphi = -\alpha \mu \quad (24)$$

y la ecuación de estado

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad (25)$$

Entre (18) - (25), los subíndices x, y y η denotan diferenciación,

$$\nabla \cdot V_a = \partial_x (U a) + \partial_y (V a) + \partial_\eta (\Omega a) \quad (26)$$

y

$$V \cdot \nabla_a = U \partial_x a + V \partial_y a + \Omega \partial_\eta a \quad (27)$$

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

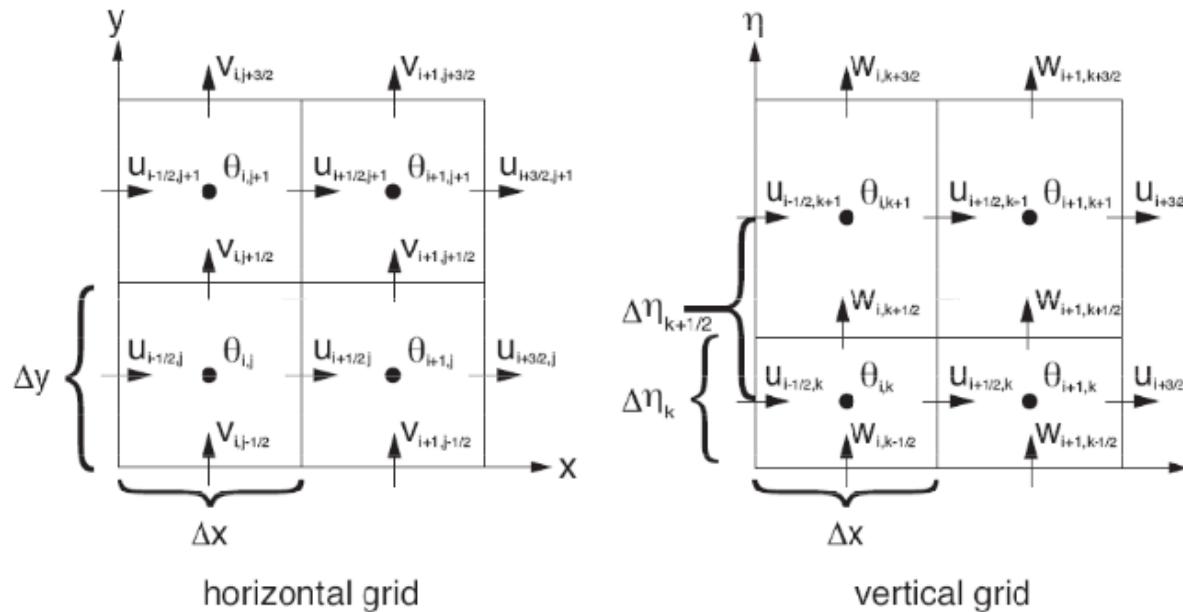


Figura 76: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).

Por otro lado, la discretización espacial en el núcleo ARW esta dada por la grilla Arakawa-C (Fig. 76), 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).

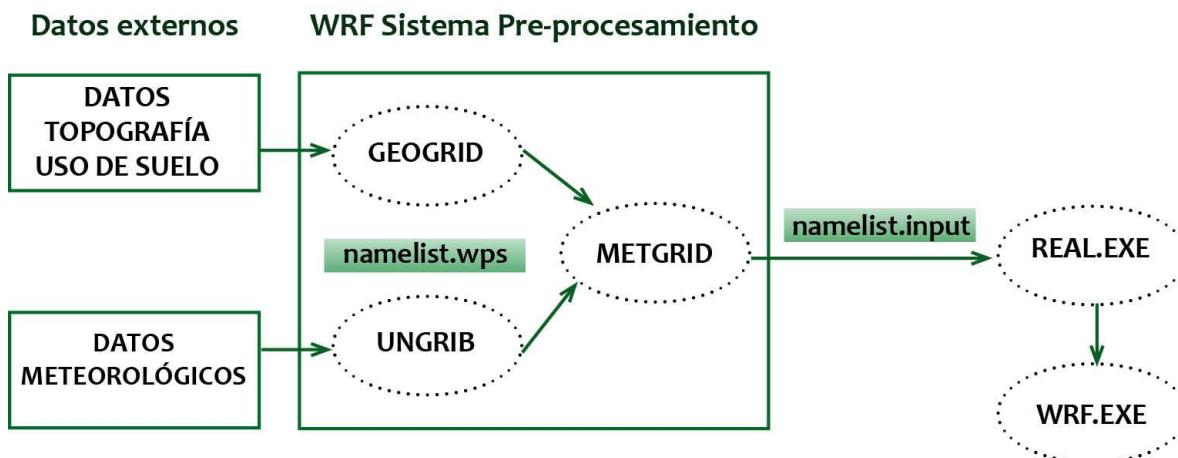


Figura 77: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.

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

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

ANEXO C: ESTADÍSTICOS PRINCIPALES PARA VALIDACIÓN

Para llevar a cabo la validación de un modelo numérico se deben comparar dos señales: La simulada (Y) y la observada (O), para un numero 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).

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

Coeficiente de correlación de Pearson: El coeficiente de correlación de Pearson es una medida que nos advierte como covarian 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} .

$$r_{yx} = \frac{cov_{yx}}{s_y s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})(X_k - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2}} \quad (29)$$

- 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.

$$COCIENTE_{s_x s_y} = \frac{s_y}{s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})}{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (30)$$

Error medio absoluto: Este error conocido como MAE (por sus siglas en inglés), 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.

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^N |Y_k - X_k|}{N} \quad (31)$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): También conocido por RMSE (por sus siglas en inglés) 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).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(Y_k - X_k)^2}{N}} \quad (32)$$

ANEXO D: RECURSOS COMPUTACIONALES

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 9.

Tabla 9: 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 modelo 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 través de switch S4128f)	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 switch S4128f)	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

Por otra parte, para el sistema de información oceanográfica CHONOS, se adquirió un servidor web con las siguientes características (Tabla 10)

Tabla 10: 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)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiken, C. M. (2008). Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).
- Albert, A., Echevin, V., Lévy, M., & Aumont, O. (2010). Impact of nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary productivity in the Peru upwelling system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12).
- Albretsen, J. (2011). NorKyst-800 report no. 1: User manual and technical descriptions. *Fisk 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., 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).
- Aumont, O., & Bopp, L. (2006). Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(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.
- Baird, M. E., Leth, O. and J. F. Middleton. 2007. Biological response to circulation driven by mean summertime winds off central Chile: A numerical model study. *J. Geophys. Res.* 112, C07031, doi:10.1029/2006JC003655.
- Bravo, S. (2010). The reproductive output of sea lice *Caligus rogercresseyi* under controlled conditions. *Experimental parasitology*, 125(1), 51-54.

- Bottjer, D., and C. E. Morales. 2005. Microzooplankton grazing in a coastal embayment off Concepción, Chile, (~36°S) during non-upwelling conditions. *Journal of Plankton Research*, 27(4): 383-391.
- Boyer, T., Locarnini, R. A., Baranova, O., Garcia, H. E., Mishonov, A. V., Paver, C., ... & Zweng, M. (2018). The World Ocean Atlas 2018: Improvements and Uses of Climatological Mean Fields. *AGU FM, 2018*, OS13D-1506.
- Brun, A. A., Ramirez, N., Pizarro, O., & Piola, A. R. (2020). The role of the Magellan Strait on the southwest South Atlantic shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106661.
- Buschmann, A. H., Cabello, F., Young, K., Carvajal, J., Varela, D. A., & Henríquez, L. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean & Coastal Management*, 52(5), 243-249.
- Calvete, C. (2002). Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero Cimar-Fiordo 2). *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 25, 1.
- Chassignet, E. P., & Verron, J. (1998). Ocean Modeling and Parameterization, vol. 516 of Mathematical and Physical Sciences.
- Cuevas, L.A., Daneri, G., Jacob, B. and P. Montero 2004. Microbial abundance and activity in the seasonal upwelling area off Concepción (~36°S), central Chile: a comparison of upwelling and non-upwelling conditions. *Deep-Sea Research II*, 51: 2427–2440.
- 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.
- Drévillon, M., Bourdallé-Badie, R., Derval, C., Lellouche, J. M., Rémy, E., Tranchant, B., ... & Garric, G. (2008). The GODAE/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: results, applications and prospects. *Journal of Operational Oceanography*, 1(1), 51-57.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183-204.

Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Ledesma, J., Vásquez, L., Graco, M. 2017). Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122: 5423–5444. doi:10.1002/2016JC012439.

Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Gutierrez, D., Graco, M., Ledesma, J., Quispe-Ccalluari, C. 2019. Oxygen Variability During ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Front. Mar. Sci.* 5:526. doi: 10.3389/fmars.2018.00526.

Flather, R. A. (2000). Existing operational oceanography. *Coastal Engineering*, 41(1-3), 13-40.

Fernández, C., and L. Farias. 2012. Assimilation and regeneration of inorganic nitrogen in a coastal upwelling system: ammonium and nitrate utilization. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 451: 1-14.

Garavelli, L., Colas, F., Verley, P., Kaplan, D. M., Yannicelli, B., & Lett, C. (2016). Influence of biological factors on connectivity patterns for *Concholepas concholepas* (loco) in Chile. *PloS one*, 11(1), e0146418.

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.

Gómez, F. A., Spitz, Y. H., Batchelder, H. P. and M. A. Correa-Ramirez 2017. Intraseasonal patterns in coastal plankton biomass off central Chile derived from satellite observations and a biochemical model. *Journal of Marine Systems*, 174: 108-118.

González, H.E., Menschel, E., Aparicio, C., Barria, C., 2007. Spatial and temporal variability of microplankton and detritus, and their export to the shelf sediments in the upwelling area off Concepción, Chile (36°S), during 2002– 2005. *Prog. Oceanogr.* 75, 435–451.

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

Hamman, J. J., Nijssen, B., Bohn, T. J., Gergel, D. R., & Mao, Y. (2018). The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility. *Geoscientific Model Development (Online)*, 11(8).

Hooker, S. B., & McClain, C. R. (2000). The calibration and validation of SeaWiFS data. *Progress in Oceanography*, 45(3-4), 427-465.

- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.
- IOC, SCOR y IAPSO. 2010. The international thermodynamic equation of seawater. 2010: Calculation and use of thermodynamic properties, Intergov. Oceanogr. Comm. Manuals Guid. No. 56, (June), 196pp.
- Kane, A., Moulin, C., Thiria, S., Bopp, L., Berrada, M., Tagliabue, A., ... & Badran, F. (2011). Improving the parameters of a global ocean biogeochemical model via variational assimilation of in situ data at five time series stations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C6).
- 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.
- Levitus, S., Locarnini, R. A., Boyer, T. P., Mishonov, A. V., Antonov, J. I., Garcia, H. E., ... & Seidov, D. (2010). World ocean atlas 2009.
- Li, J. G. (2008). Upstream nonoscillatory advection schemes. *Monthly Weather Review*, 136(12), 4709-4729
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14415-14428.
- 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.
- O'Dea, E. J., Arnold, A. K., Edwards, K. P., Furner, R., Hyder, P., Martin, M. J., ... & Liu, H. (2012). An operational ocean forecast system incorporating NEMO and SST data assimilation for the tidally driven European North-West shelf. *Journal of Operational Oceanography*, 5(1), 3-17.
- 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 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).
- Pantoja, S., Sepúlveda, J. H. E. González. 2004. Decomposition of sinking proteinaceous material during fall in oxygen minimum zone off northern Chile. *Deep-Sea Res. I* 51: 55-70.
- Pantoja, S. 2006. Biogeochemistry of the OMZ of Chile. *Gayana* 70: 62-67.
- 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-Aragón, M., Fernández, C., Escribano, R. 2011. Nitrogen excretion by mesozooplankton in a coastal upwelling area: Seasonal trends and implications for biological production. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 406: 116–124.

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 contenido de 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 meterorological 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.

Pizarro-Koch, M., Pizarro, O., Dewitte, B., Montes, I., Ramos, M., Paulmier, A., & Garçon, V. (2019). Seasonal Variability of the Southern Tip of the Oxygen Minimum Zone in the Eastern South Pacific (30°-38° S): A Modeling Study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12), 8574-8604.

Rabalais, N.N., Turner, R. E., Díaz, R. J. & Justić, 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.

Salinas, S., Contreras, M., & Fierro, J. (2004). Propagación de la onda de marea en el estrecho de Magallanes. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 27(2), 5-20.

Schiller, A., & Brassington, G. B. (Eds.). (2011). *Operational oceanography in the 21st century*. Springer Science & Business Media.

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.
- Sweby, P. K. (1984). High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws. *SIAM journal on numerical analysis*, 21(5), 995-1011.
- 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.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.
- Trenberth, K. E. (2008). Necesidades de observación para la predicción y adaptación climáticas. *Boletín de la OMM*, 57(1), 17-21.
- Vergara, O., Echevín V., Sepúlveda, H. H., Quiñones, R. 2017. Controlling factors of the seasonal variability of productivity in the Southern Humboldt Current System (30°-40°S): A biophysical modeling approach. *Continental Shelf Research*, 148:89-103.
- 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.

Yáñez, S., Hidalgo, P., Escribano, E. 2012. Natural mortality of Paracalanus indicus (Copepoda: Calanoida) in coastal upwelling areas associated with oxygen minimum zone in the Humboldt Current system: implications for the passive carbon flux. Revista de Biología Marina y Oceanografía, 47: 295-310

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

A wide-angle photograph of a vast ocean under a dramatic sky. The horizon is visible in the distance, where the deep blue ocean meets a sky filled with scattered clouds. A bright, warm glow from the sun on the right side of the frame creates a vibrant rainbow-like lens flare that sweeps across the upper right portion of the image.

www.ifop.cl