INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2016

Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de circulación marina para apoyo a la acuicultura, III Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Noviembre 2017

INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2016

Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de circulación marina para apoyo a la acuicultura, II Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Noviembre 2017

REQUIRENTE
SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

Subsecretaria de Economía y Empresas de Menor Tamaño
Natalia Piergentili Domenech

EJECUTOR
INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Jefe División Investigación en Acuicultura
F. Leonardo Guzmán Méndez

Director Ejecutivo
Leonardo Núñez Montaner

JEFE PROYECTO
Elías Pinilla Matamala

AUTORES
Cristian Ruiz Soto
Elías Pinilla Matamala
Oliver Venegas Mella

COLABORADOR
Milton Salas Salas

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL..... **3**
ÍNDICE FIGURAS..... **4**

RESUMEN EJECUTIVO..... **8**

1. ANTECEDENTES..... **14**

2. OBJETIVOS..... **32**

2.1 Objetivo general..... **32**
2.2 Objetivos específicos..... **32**

3. METODOLOGÍA..... **33**
3.1 Objetivo específico 2.2.1 ---------- **33**
3.2 Objetivo específico 2.2.2 ---------- **33**
3.3 Objetivo específico 2.2.3 ---------- **34**
3.4 Objetivo específico 2.2.4..... **34**

4. GESTIÓN DEL PROYECTO..... **39**

5. RESULTADOS..... **46**
5.1 Objetivo específico n°1..... **46**
5.2 Objetivo específico n°2..... **60**
5.3 Objetivo específico n°3..... **90**
5.4 Objetivo específico n°4..... **92**

6. DISCUSIÓN..... **94**
7. CONCLUSIONES..... **103**
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA ---------- **104**

ÍNDICE FIGURAS

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

Figura 2. Análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo

Figura 3. Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo de MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo

Figura 4. Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional en tres etapas (2014-17).

Figura 5. Distribución de elementos horizontales en MOSA, se divide la figura por región para que se puedan apreciar los elementos, los cuales poseen una resolución de ~ 1km

Figura 6. Dominio con la batimetría que usa MOSA actualmente

Figura 7. Cluster utilizado para las simulaciones de los pronósticos de MOSA

Figura 8. Fuentes de agua dulce ingresadas a MOSA

Figura 9. Fuentes de agua dulce de MOSA con caudales diarios, promediados de 5 años de datos 2011-2015

Figura 10. Caudales mensuales para 6 fuentes de agua dulce ocupadas en MOSA. Estas series se construyeron a partir de Balance Hidrológico de cuencas de la DGA, 1987. Se espera actualizar algunas las series con datos medidos por IFOP durante 2016-2017

Figura 11. Zonas que presentaron errores “Blow Up” con 10 fuentes de agua dulce con un paso de integración temporal barotrópico de 60 segundos

Figura 12. Numero de fuentes utilizadas en el pronóstico por cada día junto a días de caída del modelo por "blow up" entre julio 2016 y enero 2017

Figura 13. Pruebas para evaluar la estabilidad de modelo con distintos dominios, donde MOSAv3 presento mayor estabilidad, menos caídas y más fuentes disponibles

Figura 14. Ubicación de punto de ingreso de caudal en forma de precipitación par el deshielo de Campos de Hielo norte en Laguna San Rafael

Figura 15: Primer escenario WRF operacional con 1 dominio de 5km de resolución horizontal.

Figura 16. Segundo escenario WRF operacional con 2 dominios. Dominio padre 9km e hijo 3km de resolución horizontal

Figura 17. Tercer escenario WRF operacional con 2 dominios. Dominio padre 9km e hijo 1.8km de Resolución horizontal

Figura 18. Cuarto escenario WRF operacional con 2 dominios. Dominio padre 5km e hijo 1km de resolución horizontal

Figura 19. Mapa con futura red de estaciones meteorológicas para la X y XI Región. Los círculos corresponden a estaciones IFOP, los cuadrados a Armada de Chile, rombo ULA y triángulo COPAS

Figura 20. Estación meteorológica instalada sobre torre de agua en terreno particular de Cucao (42.601ºS, 74.123ºW), compuesta por sensor de intensidad del viento, dirección del viento, radiación solar, luz PAR, precipitación, temperatura y humedad relativa

Figura 21. Estación meteorológica instalada en el borde costero dentro de terreno de la Armada de Chile (43.897ºS, 73.749ºW), compuesta por sensor de intensidad del viento, dirección del viento, radiación solar, luz PAR, precipitación, temperatura y humedad relativa

Figura 22. Captura de pantalla de sitio web www.iproach.cl con monitoreo en tiempo real. La imagen muestra estación de Cucao con serie de tiempo de precipitación y magnitud del viento

Figura 23. Diagnóstico del primer día pronosticado durante 6 meses en MOSA (julio 2016.julio2017), arriba, anomalía de volumen en todo el dominio en km^3, en centro energía cinética promedio de volumen en $cm^2\ s^{-2}$, y abajo la energía cinética promedio superficial en $cm^2\ s^{-2}$. Este cálculo se realizó con datos horarios

Figura 24. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Puerto Montt, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo

Figura 25. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Puerto Montt entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo).

Figura 26. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Ancud, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo

Figura 27. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Castro, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo

Figura 28. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Castro entre julio y septiembre de 2016 para MOSA(negro) y mareógrafo (rojo)

Figura 29. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Melinka, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo

Figura 30. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Melinka entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo)

Figura 31. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo en Puerto Chacabuco, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo

Figura 32. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Puerto Chacabuco entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo)

Figura 33. Separación del dominio de MOSA en una zona oceánica y otra costera para evaluar la temperatura superficial del mar de los pronósticos con datos MODIS

Figura 34. Series de tiempo de pro medios de la temperatura superficial mar (TSM) para MOSA y datos satelitales de MODIS, promedios semanales con una resolución espacial de 4 km. Arriba, todo el dominio, abajo-izquierda región oceánica del dominio, y abajo-derecha, región costera del dominio.

Figura 35. Variabilidad espacial del primer modo de componentes principales de la temperatura superficial del mar de datos de MOSA y de datos satelitales MODIS, con una resolución de 4 km, este modo explica 96,1% de la varianza en MODIS y un 94,8% en MOSA

Figura 36. Series de tiempo de los 4 primeros modos EOF en los datos de MODIS y MOSA entre julio y diciembre de 2016

Figura 37. Diagramas de Hovmoller de la temperatura superficial de mar a lo largo del paralelo 43,28S ubicado en la boca del Guafo para datos MOSA y datos MODIS entre julio 2016 y febrero 2017

Figura 38. Promedios mensuales de la temperatura superficial del mar pronosticados por MOSA entre julio de 2016 y junio de 2017

Figura 39. Diagrama de Hovmoller para la temperatura superficial de mar pronosticada por MOSA a lo largo del paralelo 43,28S desde julio 2016 a julio 2017

Figura 40. Estaciones 1, 4, 7 y 52 ubicadas entre zona de Chacao y Chiloé Central. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD

Figura 41. Estaciones 16, 24, 37 y 38 ubicadas entre zona de Comau y Desertores. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD

Figura 42. Estaciones 43, 44, 14 y 28 ubicadas entre zona de Guafo, Reloncaví y Reñihue. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD

Figura 43. Estaciones 4, 6, 11 y 16ubicadas entre zona de Estero Elefantes y Quitralco. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD del año 2016

Figura 44. Estaciones 17, 15, 18 y 19 ubicadas entre zona de Estero Elefantes y Quitralco. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD del año 2016

Figura 45: Interfaz web del sistema de deriva de partículas lagrangianas montado sobre resultados de MOSA-ROMS

Figura 46.: Ejemplo de trayectorias de partículas utilizando el software OpenDrift montado sobre campos de corrientes del modelo operacional MOSA

Figura 47. Portal web www.chonos.org

TABLAS

Tabla 1. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Puerto Montt……67

Tabla 2, Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Ancud……68

Tabla 3. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Castro……..69

Tabla 4. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Melinka……71

Tabla 5. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Puerto Chacabuco……..72

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio detalla la III etapa del desarrollo de un sistema operacional de pronósticos oceanográficos para la X y XI región. Este sistema está dirigido a proporcionar herramientas de análisis y predicción que permitan generar información de valor, que entre otras cosas sirva para gestionar problemas, en el corto plazo y que pueda ser utilizado por distintos tipos de usuarios, tales como: tomadores de decisiones, comunidad científica y actividades productivas como la acuicultura, entre otras. Esta herramienta es capaz de entregar información ambiental relevante en casos de dispersión de patógenos, vertidos de hidrocarburos, deriva de objetos flotantes, naufragios y su vez otorga una mayor comprensión de la dinámica oceánica y estuarina de la región Austral Chile.

El sistema operacional de pronósticos oceanográficos, denominado MOSA (Modelo Operacional Sur Austral), entro en funcionamiento a mediados del año 2015, como parte de las etapas anteriores de este proyecto. El foco de las primeras etapas estuvo puesto en generar la mecánica computacional automatizada que requiere un sistema como este. Esto es, ejecutar diariamente un conjunto de códigos computacionales que permitan descargar y procesar las condiciones iniciales y de borde basado en productos de modelos globales oceanográficos (Mercator Ocean) y atmosféricos (GFS-Global Forecast System) y también, productos locales como el modelo operacional atmosférico (WRF) de la Dirección Meteorológica de Chile.

Este desarrollo se ha realizado en conjunto entre el Instituto de Fomento Pesquero y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción y consta de un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS AGRIF capaz de realizar pronósticos a 72 horas de las condiciones oceanográficas en la zona sur de Chile, específicamente de variables como: temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar. El modelo cubre las regiones de Los Lagos y de Aysén a una resolución horizontal aproximada de 1 kilómetro. La resolución alcanzada en estas etapas representa una limitante en cuanto a que muchos canales con un tamaño menor, no podrán ser resueltos por la resolución del modelo, por esta razón y tomando en cuenta las limitantes computaciones existentes, se considera la implementación de a lo menos dos modelos anidados en MOSA que alcancen resoluciones menores a 300 metros, uno en la zona de Chiloé Aysén, conteniendo los canales Dalcahue y Lemuy, y otro modelo anidado que contenga íntegramente el sistema de fiordos Jacaf y Puyuhuapi, siendo estos modelos alimentados en su borde por MOSA. Se espera en la siguiente

etapa del proyecto integrar dichos modelos anidados que permitan mejorar la resolución de los pronósticos, y disminuir el error en ellos.

Se debe considerar que el mar interior entre Los Lagos y Aysén se caracteriza por ser una región estuarina de gran escala, es decir, una zona donde se conectan aguas de origen continental de baja densidad con aguas de origen oceánico de mayor densidad. La diferencia de densidad entre ellas produce la circulación estuarina, también llamada gravitacional o boyante. Este mecanismo conduce un flujo a través de un gradiente presión que en su camino es perturbado por procesos de mezcla que son forzados por diversos agentes, algunos mecánicos como la marea y el viento y otros advectivos como las ondas internas. Justamente, son estos procesos de mezcla el mayor desafío para la modelación, pues responden a una conducta altamente no-lineal, producto de la interacción de múltiples procesos que resultan de la interacción de forzantes locales y remotos. Esto nos obliga a evaluar MOSA desde una perspectiva múltiple que haga balance entre la consistencia, calidad y valor del modelo.

Desde el punto de vista de la calidad, asociado a índices estadísticos, los resultados presentaron un mejor desempeño en las zonas oceánicas y en mar interior de Chiloé, y un menor ajuste en zonas más internas. Sin embargo, presentó consistencia en representar los grandes procesos que dominan la dinámica de gran escala, otorgando un gran valor a la información que podría generar en un futuro.

Los resultados de MOSA, junto con otros productos de modelación, son presentados en el sitio web CHONOS (www.chonos.org), una página diseñada especialmente para navegar e interactuar con los datos, cuya puesta en marcha blanca comienza al final de este proyecto y se espera que dure unos 6 meses.

Finalmente, el desarrollo de este sistema operacional, que lleva a cabo IFOP, ha sido concebido en una estructura cooperativa entre instituciones. De esta manera, en el componente de modelación hidrodinámica, existe un estrecho vínculo con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, a su vez, el forzamiento atmosférico contiene un aporte sustantivo por parte de la Dirección Meteorológica de Chile. Además, instituciones como la Dirección General de Aguas y Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada cuentan con información muy relevante en cuanto a caudales de ríos y batimetría respectivamente. Respecto de los sistemas de observación, tanto Copas-Sur Austral, como el Núcleo Milenio Musels, han asistido con datos que son esenciales para una correcta evaluación del modelo.

1. ANTECEDENTES

Contexto

Los sistemas costeros marinos de la zona sur de Chile se encuentran insertos en un proceso de industrialización que lleva creciendo durante los últimos 20 años gracias al auge de la salmonicultura, presionando diversos aspectos sociales, económicos y ambientales, y a su vez, elevando la necesidad de establecer los límites ambientales del entorno natural, lo cual obliga a tratar el tema a través de 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 del medioambiente donde se encuentra inserta la industria, se torna en un eje principal de planificación.

Sin embargo, los desafíos ambientales en la zona son de mayor escala, e involucran a un amplio espectro de actores presentes, que van desde zonas portuarias, pescadores artesanales, miticultores, salmoneros a operadores turísticos, entre otros. 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; Clément et al. (2002), 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 (Ávila et al, 2015). 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 ella y al ambiente. Estos eventos han dejado en manifiesto carencias en la disponibilidad oportuna de información de calidad del sistema natural que contribuya a un mayor entendimiento de la situación ambiental para la toma de decisiones.

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

zonas más alejadas de la costa, lo cual tiene sus ventajas, tanto para la Industria, como para el medio ambiente, donde se espera mayor bienestar de los peces debido a una mayor calidad del agua con menos influencia de escorrentía terrestre, actividades costeras, y de residuos procedentes de la actividad antropogénica de la costa (Holmer, 2010). Si bien en Chile, aún se encuentra en fase de estudio sobre este último punto, las etapas de diseño deben considerar herramientas operacionales cuantitativas que otorguen información relevante del estado del mar, tales como oleaje significativo, vientos, anomalías térmicas, flujos de oxígeno disuelto, etc., a fin de garantizar una operación segura.

Modelos operacionales

Dentro de este contexto, cuyo fin es elevar la calidad de la información disponible y con énfasis en la modernización del estado, es donde los modelos números constituyen una línea de desarrollo necesaria a implementar, siendo un campo que cuenta entre sus fortalezas con la capacidad de extender la cobertura espacial y temporal de la información oceanográfica disponible, permitiendo de este modo generar herramientas y aplicaciones orientadas a mejorar la toma de decisiones en casos de contingencias sanitarias, como también de planificación territorial, y en un nivel más avanzado permite además, adelantarse ante posibles escenarios ambientales críticos a través de los pronósticos.

La oceanografía operacional es hoy en día la ciencia del océano que utiliza observación de alta calidad y datos de modelos numéricos para estudios fundamentales y aplicaciones prácticas (Pinardi & Coppini, 2010). Esta disciplina se desarrolla como una continuación al exitoso y extenso programa Global Ocean Observing System (GOOS) iniciado en 1998, cuyo énfasis se encuentra en obtener y procesar información de los océanos (y también de la atmósfera) en tiempo real. Las observaciones son la base para construir un modelo operacional, son la fuente de los forzantes y condiciones iniciales de los modelos numéricos, que pueden integrar estos datos para mantenerse lo más próximo posible en su evolución al estado real del océano tal como es observado y finalmente servirán para validar los resultados de los modelos.

Un sistema de pronóstico oceanográfico se fundamenta en los mismos principios que sus antecesores atmosféricos/climáticos, estos son: la integración de modelos numéricos junto con observaciones a través de la asimilación de datos con el fin de obtener resultados predictivos en la escala espacial y temporal deseada (Schiller y Brassington 2011). Una amplia gama de resultados pueden ser obtenidos, incluyendo campos de vectores y series de tiempo para estudio euleriano de

corrientes. Esto tiene aplicaciones de gran relevancia, en el seguimiento de partículas, gestión ambiental, climatología oceánica, dispersión de antibióticos o hidrocarburos, eventos de anomalías térmicas, oleaje crítico, deriva de objetos, y aplicaciones industriales entre otras. También abre el camino para la implementación de módulos biogeoquímicos que ayuden a establecer los límites de capacidad de carga de los sistemas estudiados. Este es un recurso ya ha implementado en distintos lugares del mundo para resolver algunos problemas específicos y otros generales. Comenzando en países desarrollados, progresivamente se ha ido implementado en varios países en vías de desarrollo, entendiendo que es una inversión que tarde o temprano impactará de forma beneficiosa las actividades económicas, el medio ambiente y la sociedad en general bajo en concepto de enfoque ecosistémico.

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

En Canadá, existe una serie de programas orientados a desarrollar modelos operacionales amparados bajo el alero del “Centre for Ocean Model Development for Applications” (COMDA), de la que destaca la iniciativa CONCEPTS, que en asociación con MERCATOR (Francia) busca establecer una capacidad de investigación para desarrollar y poner en práctica operativa un sistema acoplado atmósfera-océano-hielo y la capacidad de predicción operativa acoplada para la costa de Canadá con un dominio en los océanos Ártico, Atlántico Norte y la zona de Grandes Lagos. En Escocia, además de la industria salmonera, la presencia una creciente industria de energía mareomotriz presente al norte del Reino Unido ha impulsado el desarrollo de sistemas operacionales, entre los que destaca el NCOF (National Centre of Ocean Forescast).

Sin embargo, cabe destacar que la implementación de un modelo operacional requiere asumir elevados costos, entre ellos la adquisición y mantención de computadores de alto rendimiento (High

Performance Computers), un red observacional en terreno suficiente que permita cubrir el área a modelar, y un centro de control de calidad y asimilación de datos, elementos que poseen una significativa complejidad y además establecen un desafío para las instituciones vinculadas, es acá donde la cooperación interinstitucional se vuelve fundamental. La experiencia internacional así lo avala, tomando por ejemplo el Modelo Operacional MERCATOR (Francia), el cual fue producto de un desarrollo conjunto de al menos 6 instituciones públicas (CNRS, IFREMER, IRD, Metéo-France, SHOM, CNES).

Componentes de un sistema operacional

En resumen, un sistema de predicción oceanográfico consta de 3 componentes: las observaciones, la asimilación de datos y los modelos numéricos a los que se integran las observaciones vía asimilación de datos. Los datos registrados por mediciones (observaciones) forman la base de un modelo preciso y fiable, y así la calidad de un modelo de predicción depende de la fiabilidad con la que el modelo numérico representa la física y dinámica del sistema.

1- Modelo numéricos

Un modelo se definirá por su capacidad de poder resolver los fenómenos físicos mediante la matemática y además de parametrizar aquella física no resuelta aún (Chassignet y Verron 1998). Las fuentes de error vendrán dadas por estas aproximaciones y por la resolución espacial y temporal del modelo, y como estas resoluciones logren resolver procesos a escala y sub-escala (viscosidad/difusión).

Los requerimientos de cada modelo dependen de la escala espacial y temporal. Así, la oceanografía operacional de alta resolución necesita ser global y dar una descripción detallada de la variabilidad de mesoescala (eddies, frentes y estructura superficial), lo que exige que la malla del dominio (grilla) sea de una resolución tal que permita resolver los procesos barotrópicos y baroclínicos. A su vez, la modelación costera debe ser precisa en la obtención de un nivel del mar bien estimado por sus forzantes de marea, viento y presión atmosférica; mientras que en predicciones estacionales a interanuales el campo de masa de la capa superficial oceánica y su interacción con la atmósfera deben estar bien definidos. El uso de altas resoluciones espaciales y/o temporales reduce errores de truncamiento locales en esquemas numéricos discretos y permite una mejor representación de las pequeñas escalas dinámicas y de las características topográficas. Sin embargo, está limitada a un alto costo computacional. (Debreu et al. 2011).

Los modelos oceanográficos de circulación global difieren entre sí en su configuración y la manera en que son implementados. Así, un modelo optará por un tipo de coordenada vertical, esquema de mezcla, capa límite, aproximación de turbulencia, superficie libre o tipo de advección. Sin embargo, mantendrán en común las siguientes premisas: los códigos deben ser implementados en configuraciones realistas, esto es, disponer de batimetrías de calidad y detalladas que den solución en los modelos a la singularidad de las altas latitudes para ser representadas en una grilla; deben ser eficientes en términos de computación (paralelización explícita y descomposición del dominio) para poder reducir el tiempo de retraso entre el ingreso de los datos al modelo y la salida de los resultados al usuario.

2- Observaciones

Una limitante en la implementación de este tipo de sistemas, es la falta de datos in situ disponibles y que sean capaces de entregan información en "tiempo real", a modo de poder visualizar la magnitud del error de los pronósticos. Se ha trabajado en la incorporación de diversos puntos de muestreos en la zona en conjunto con otras instituciones, que junto a información satelital permita cuantificar el error y localizar zonas de mejor o peor desempeño del modelo. También se ha buscado realizar anidados en zonas donde se establezca una mayor densidad observacional a modo de poder realizar experimentos de asimilación de datos, técnica que permite obtener una condición inicial más ajustada a la realidad observada, aunque asume un grado de complejidad elevado, que requiere mayores capacidades en todos los ámbitos (humanas, técnicas e instrumentales).

Tal como se ha mencionado anteriormente, un sistema de predicción operacional consta básicamente de un sistema de observaciones (datos recopilados en tiempo real o cerca de lo real), un sistema de procesamiento de estos datos, de manera de poder incluirlos dentro de la siguiente etapa, la modelación. La modelación por su parte genera productos, ya sean estos, resultados directos de las simulaciones (corrientes, temperatura, salinidad, etc.) o bien, post procesos que generen subproductos que sirvan para la toma de decisiones de las autoridades. El diagrama de la **Figura 1**, basado en un sistema operacional conceptual de Trenberth (2008), lo ilustra de manera más gráfica. Este sistema comienza con las observaciones, la investigación científica, el análisis y los resultados de la información requerida por los tomadores de decisiones. Las decisiones sobre las prioridades y la coordinación entre los componentes del sistema, es generada por la necesidad de una comprensión científica, junto con el tipo de información oceanográfica requerida por los tomadores de decisiones.

Dentro de las observaciones y mediciones que se deben integrar a los modelos numéricos a través de la asimilación de datos, cobran especial importancia las mediciones satelitales debido al carácter global de los modelos numéricos y la cobertura que proporcionan estas mediciones. Los parámetros medibles con satélites son: altimetrías del nivel del mar (SSH), temperatura (SST) y salinidad superficial (SSS), el color del mar (para medir clorofila y procesos asociados), campos de olas y viento (SAR y scatterometer), dispersión de contaminantes y cobertura de hielo marino (Le traon 2011).

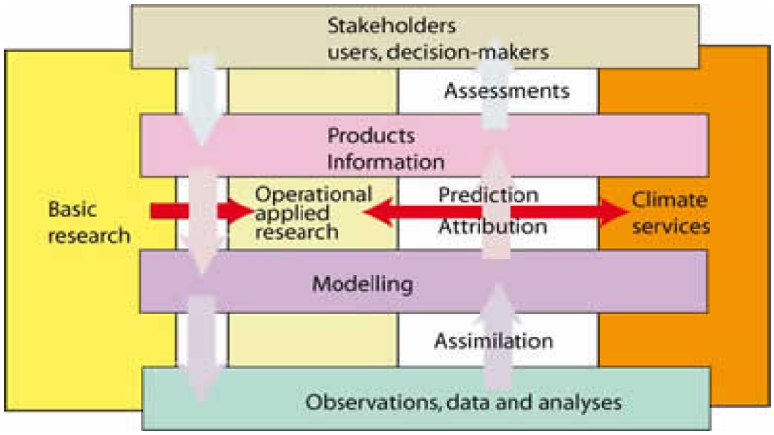

Figura 1. Marco conceptual para un sistema de información sobre el clima. Fuente: Trenberth (2008), Boletín de la OMM 57 (1).

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

Como ya se indicó, los modelos son alimentados no sólo por forzantes oceánicos, sino también por forzantes atmosféricos: viento (dirección y velocidad), radiación solar, temperatura, presión atmosférica, balance neto precipitación-evaporación sobre el océano y aportes fluviales (dependientes de la precipitación/evaporación terrestre). Los datos, una vez registrados y

transmitidos a los centros de "ensamblaje", deben ser sometidos a controles de calidad para establecer si se encuentran dentro de los rangos apropiados. Las bases de datos deben pasar una serie de pruebas estandarizadas y dependientes del tipo de datos sujetos a análisis que permitan su uso rápido y eficiente a la comunidad de usuarios, así como eliminar los datos erróneos. Debido a la dispersión en un vasto sistema como el oceánico, el aportar un alto número de datos es clave (Dombrowsky 2011). En el desarrollo de un sistema de pronósticos el control de calidad de los datos es el paso previo a la asimilación de datos y el mejor método de control de calidad será aquel que mejores resultados de pronósticos genere.

3- Asimilación de Datos

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

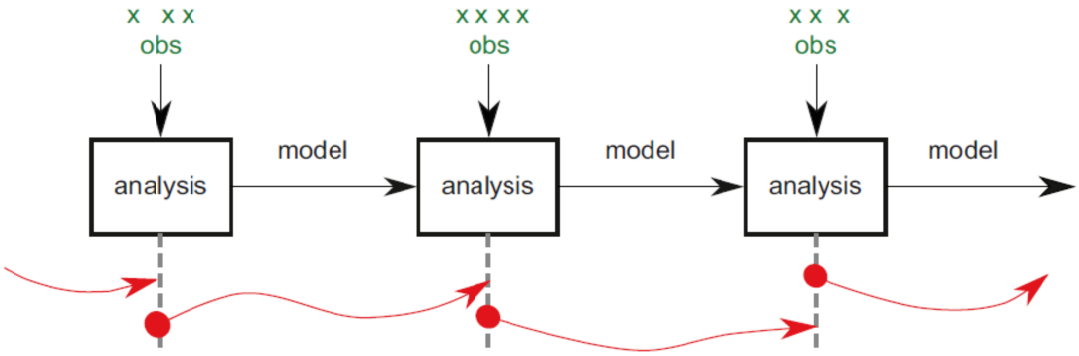

Figura 2. Análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo. En líneas rojas, el estado del océano pronosticado a partir de condiciones iniciales (puntos rojos). Las observaciones (verde) son asimiladas en los tiempos de análisis (Schiller & Brassington, 2011).

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

a) *Interpolación, extrapolación y filtrado*: En este enfoque, el propósito de la Asimilación de datos es estimar el estado del océano utilizando toda la información disponible para generar un análisis que desemboque en una estimación de los campos dinámicos, que sean consistentes con las consideraciones físicas previas. Esta es la visión que albergan la mayor parte de los trabajo oceánicos de asimilación de datos, siendo algunos Oke et al. (2002), Paduan & Shulman (2004) y Moore et al. (2004).

Varios grupos actualmente están trabajando en la incorporación de datos reales a través de asimilación de datos en modelos globales y regionales bajo este enfoque, incorporando datos de distintas fuentes (i.e boyas perfiladoras ARGO, datos XBT, SST, etc.). Generalmente son instituciones que trabajan en el análisis de datos globales en tiempo real y en la generación de pronósticos, entre ellos, el European Center for Medium Range Forescast (ECMRF), Australian Bureau of Meteorology, U.S National Center for Environment Prediction (NCEP).

b) *Calibración de parámetros:* Acá el propósito de la asimilación de datos, es desarrollar el modelo oceánico lo más preciso posible a través de ajustes sistemáticos de parámetros de los cuales no se tiene información o presentan una considerable incertidumbre. El énfasis está en el ajuste de lo que es incierto y muy difícil de medir, por ejemplo, parámetros de turbulencia o la topografía del fondo marino. Sin embargo, este enfoque exige una estimación de parámetros que generalmente implica problemas altamente no lineales que son más complejos.

c) *Prueba de Hipótesis***:** El propósito de la asimilación de datos en este enfoque es poner a prueba un sistema de predicciones del océano, el cual incluye como subcomponentes del modelo, dinámicas hipotéticas del océano, un modelo de error para validación de datos, buscándose finalmente un análisis de los defectos primarios en el modelo dinámico o de la observación del sistema. Una vez que un sistema de predicción se ha validado por la prueba de hipótesis formal u otros medios, el sistema de asimilación de datos puede utilizarse para diseñar y predecir el rendimiento de los futuros sistemas de observación. Para este propósito se puede realizar una simulación de un sistema de observación experimental, utilizando la llamada prueba del gemelo

idéntico, y así evaluar el impacto de las observaciones presentes y futuras pueden tener en la modelación. Una evaluación de este sistema fue realizada por Zhang et al (2007).

Modelos Operacionales en Chile

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

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

Basado en el informe final de este proyecto (Ramos, 2012) algunas conclusiones respecto de modelación son las siguientes:

d) El proceso de validación tomo mayor tiempo del esperado. De acuerdo a lo planificado inicialmente en el proyecto dicho proceso se prolongaría solo durante la Etapa 2. Sin embargo, el proceso de validación y ajuste de los modelos no se detuvo en esta etapa dado que debe ser un proceso continuo a fin de perfeccionar los modelos permanentemente.

e) Configuraciones razonablemente validadas a mesoescala no son suficientes para abordar estudios sobre especies costeras con fines de asesoramiento para el manejo. Validación con mayor detalle en la costa, datos oceanográficos in situ e información adicional son requeridos. Esa conclusión de basa en que los patrones de conectividad

de sitios costeros, de relevancia acuícola y pesquera, derivados de simulaciones basadas en individuo acopladas a las diferentes salidas hidrodinámicas difieren marcadamente en respuesta a las configuraciones hidrodinámica evaluadas en características tales como: las distancias de conectividad máxima, el nivel de auto-reclutamiento, estructura de conexión a lo largo de la costa evaluada a mesoescala, tasas de retención/advección sobre la plataforma continental, entre otros.

Sistema de predicción operacional para la zona sur Austral

En el año 2014 comienza el proyecto "Desarrollo de un sistema de predicción sinóptico de circulación marina para el apoyo de la acuicultura", donde se busca como objetivo general, diseñar e implementar un sistema de simulaciones tipo pronósticos para condiciones oceanográficas en un horizonte de 3 días, dando inicio a una experiencia única en oceanografía operacional en el sur de Chile. 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 convenios con COPAS SUR Austral y Núcleo Milenio MUSELS para aumentar la cobertura de observaciones insitu. Como se menciona anteriormente, a partir de un modelo operacional podemos obtener 3 productos, modelaciones retrospectivas ("hindcast"), modelaciones precisas para el estado actual del océano ("nowcast") y modelaciones que representen el estado futuro del océano a través de pronósticos ("forecast").

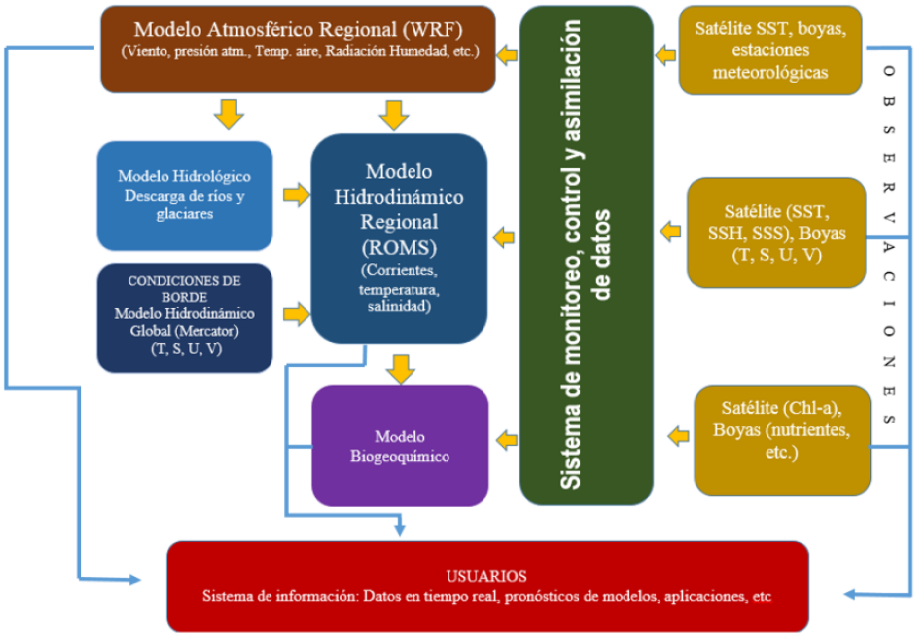

Figura 3. Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo de MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.

Este proyecto, en su primera etapa, elaboró un marco conceptual donde se establece el diseño de un sistema operacional cuyo dominio comprenda las regiones de Los Lagos y de Aysén en el sur de Chile. La **Figura 3** presenta el diagrama conceptual el cual contiene todos los módulos que debiesen ser incorporados en el sistema. Este está compuesto por varias "cajas" o módulos que satisfacen distintas necesidades del modelo. En esta primera 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 utilizaran datos climatológicos publicados por la Dirección General de Aguas (DGA) para forzar MOSA.

El desarrollo de este proyecto se encuentra dentro del marco de "Asesoría integral para pesca y acuicultura" (ASIPA) que es un convenio entre Subpesca – Min de Economía e IFOP, el cual, está encaminado en una perspectiva de desarrollo de mediano y largo plazo en temáticas de gestión costera asociada al conocimiento oceanográfico y desarrollo de herramientas cuantitativas como son

los modelos numéricos. En específico, este proyecto forma parte de la segunda de 3 etapas que buscan desarrollar un sistema de predicción operacional para la zona sur austral de Chile para aplicaciones a problemáticas asociadas a la acuicultura (**Ver Figura 4)**.

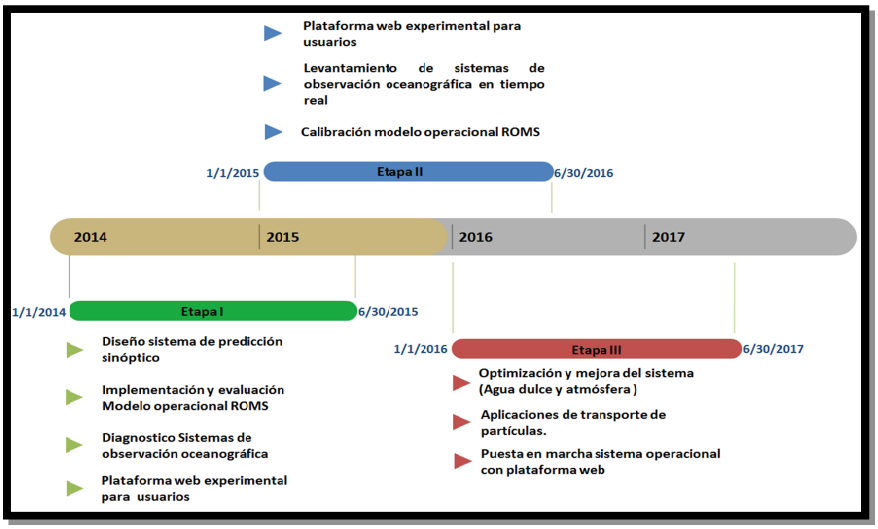

Figura 4. Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional en tres etapas (2014-17).

I Etapa: 2014-2015: En líneas generales, la primera etapa de este proyecto incluye el diseño del sistema, además de la implementación del modelo hidrodinámico ROMS-AGRIF, denominado para los fines del proyecto como MOSA (Modelo Operacional Sur Austral) y su estructura operacional, que permite integrarle a este información del modelo global oceanográfico Mercator y atmosférico GFS, además de su evaluación preliminar con datos históricos. Todo esto acoplado a un sistema que permite visualizar los resultados en línea montados en el servidor web del proyecto (www.iproach.cl). También se incluye un diagnóstico de información oceanográfica disponible actualmente para su eventual uso y las perspectivas a corto plazo para generación de nuevos puntos de observación.

II Etapa: 2015-2016: En esta etapa, el énfasis está puesto en la calibración y evaluación del modelo para mejorar su calidad y disminuir su incertidumbre, esto se realizará en base a evaluación de patrones oceanográficos generales del sistema a través de información de literatura científica y de

observaciones recopiladas ya sea por IFOP o por otras fuentes de manera de tener un modelo lo más consistente posible. Además se evalúan diseños de tecnologías de transmisión de datos en tiempo real en nuevos puntos de observación a desplegar como parte de este proyecto (Etapa II) y diagnóstico de la Etapa I.

III Etapa: 2016-2017: Se espera que en esta etapa y luego del proceso de calibración del modelo en la etapa anterior, se generen aplicaciones web, principalmente enfocada a herramientas que permitan hacer calcular el transporte de material disuelto o particulado (Ej: acoplado modelo de transporte lagrangiano de partículas pasivas), esto con el fin de conocer con antelación el posible transportes de materiales riesgosos asociado a la acuicultura (antibióticos, patógenos, etc.).

Modelo Operacional Sur Austral – MOSA-ROMS

MOSA está basado en ROMS AGRIF 3.1.1 (Regional Ocean Modelling System, Adaptative Grid Refienement in Fortran), una versión, desarrollada por el Institut de Recherche pour le Développment (IRD), Francia, el cual permite entre otras cosas realizar modelos anidados, (subdominios dentro del dominio principal, que posee una mayor resolución y se alimenta de las condiciones de borde que le otorga el dominio mayor). ROMS resuelve las ecuaciones primitivas de conservación del momento, de conservación de energía y de conservación de masa (continuidad).

Para resolver el movimiento de una partícula en el océano, se debe resolver por medio de métodos numéricos la ecuación de Navier Stokes, asumiendo:

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

$$0 = \frac{-\partial P}{\partial z} - \rho g,$$

P= presión hidrostática
ρ= densidad del agua
g= aceleración de gravedad
z= profundidad del agua

3. Campo de masa no divergente (ecuación de continuidad). Se asume que el agua de mar es incompresible en toda su columna.

$$\nabla.\vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

4. Aproximación de Boussinesq, los gradientes horizontales de densidad son constantes.
   $\rho = \rho_0 = cte.$

5. La densidad el agua se estima en función de la temperatura, la salinidad y la presión, bajo la ecuación de estado.

   $\rho = \rho\ (S, T, p),$

   Bajo estas aproximaciones, se plantea las ecuaciones de conservación de momento horizontal.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}.\nabla u - fv = \frac{-1}{\rho_0}\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla_h(K_{Mh}.\nabla_h u) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{Mv}\frac{\partial u}{\partial z}\right),$$

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

Por su parte también se usan ecuaciones de transporte de temperatura y sal:

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

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

Las condiciones de borde del modelo en superficie (z=η) son:

3. $\frac{\partial \eta}{\partial t} = w$, condición cinemática,

4. $K_{Mv}\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho 0}$;

$K_{Mv}\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{y}{\rho 0}$, Esfuerzo del viento horizontal

5. $K_{Tv}\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho 0 C_p}$, flujo de calor,

6. $K_{Sv}\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{s(E-P)}{\rho 0}$, Flujo de sal: evaporación - precipitación

Las condiciones de borde en el fondo (Z= -H), son:

a) $\vec{u}.\nabla(-H) = w$, Condición cinemática

b) $K_{Mv}\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d|\vec{u}|u}{\rho 0}$;

$K_{Mv}\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d|\vec{v}|v}{\rho 0}$, Fricción de fondo

c) $K_{Tv}\frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

d) $K_{Tv}\frac{\partial TS}{\partial z} = 0$; flujos de fondo de calor y sal.

Estas ecuaciones primitivas son resueltas numéricamente en cada elemento del dominio, tanto en su distribución horizontal, como en su distribución vertical con parametrizaciones temporales y espaciales.

Condición inicial

El modelo se prepara con un campo estático inicial 3D de velocidad, temperatura, salinidad y un nivel medio del mar que cubre todo el dominio, confiriéndole las propiedades dinámicas en t=0. Estos campos iniciales son otorgados a través de datos climatológicos, que son obtenidos de sistemas operacionales globales (MERCATOR, GFS, etc.). Estas condiciones iniciales ayudan a mejorar los tiempos de estabilización del modelo, sobre todo en dominios con cuerpos de agua semi-cerrados, como lo son gran parte de la zona de canales del sur de Chile, donde existe una alta variabilidad dinámica. Sin embargo, estas condiciones son utilizadas solo al comienzo de la operación (aunque son descargadas diariamente en caso de ser requeridas), posteriormente el modelo se va sosteniendo sobre una condición inicial creada a partir del pronóstico generado, lo cual, le permite a MOSA construir las estructuras termohalinas de largo plazo que identifican la estacionalidad en las condiciones oceanográficas, y de paso desarrollar una evolución natural al modelo.

Forzantes y condiciones de borde

Para forzar el movimiento del agua en el modelo, se introducen las condiciones de borde dinámicas, velocidad, temperatura, salinidad y nivel del mar, las que ingresan al dominio entregando variabilidad temporal y espacial como una sección bidimensional en los bordes del dominio. En el caso de la onda se marea, esta se “amortigua” en el borde, para que se introduzca de una manera suave y no perturbada, con el fin de no generar inestabilidades. Estas condiciones de borde se obtendrán de modelos globales MERCATOR y GFS.

Por su parte, la superficie del agua es forzada con datos atmosféricos, como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor (E-P), precipitación, etc. El forzante atmosférico es una parte fundamental de cualquier modelo oceánico, ya que la circulación y la distribución de propiedades conservativas y no conservativas presentes en niveles superficiales y subsuperficiales están altamente relaciones con el viento. Los campos de las variables atmosféricas son obtenidos de pronósticos atmosféricos basados en WRF (Weather Research Forecast) realizados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) especialmente para el dominio Chiloé - Aysén de MOSA, con una resolución horizontal de 12 km, sin embargo, como se mencionará más adelante, se está implementando un modelo atmosférico operacional también basado en WRF, montado en Putemún, Chiloé, que sea capaz de alcanzar resoluciones menores a 4 km.

Otro forzante en el modelo, es el ingreso de fuentes de agua dulce, la cual modifica la estructura de la picnoclina en las zonas costeras y en la zona de fiordos cumple un rol fundamental en la circulación estuarina desarrollando flujos gravitacionales que transportan aguas de baja salinidad a la boca de los fiordos. Son ingresadas fuentes de agua dulce 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).

Dominio

El tipo de malla horizontal utilizado en **MOSA-ROMS** es del tipo estructurado, donde cada elemento es un rectángulo curvilíneo, en cuyos lados se componen las aceleraciones en u y v respectivamente, evaluándose estas en el punto medio entre celdas, y la propiedad (T, S, P) se calcula en el centro del rectángulo, existiendo así coordenadas para cada componente. Esta grilla se conoce como ARAKAWA-C, su mayor ventaja es que los términos de presión de convergencia se calculan sobre una distancia Δx (Collins *et al.* 2013), mejorando la resolución en comparación con otras grillas y permite una estabilidad numérica para la discretización de las ecuaciones en el tiempo y en el espacio, mientras que en la vertical, los niveles tienen una distribución tipo sigma (siguen la superficie del fondo).Los elementos horizontales en MOSA tienen una resolución ~1km (**Figura 5**).

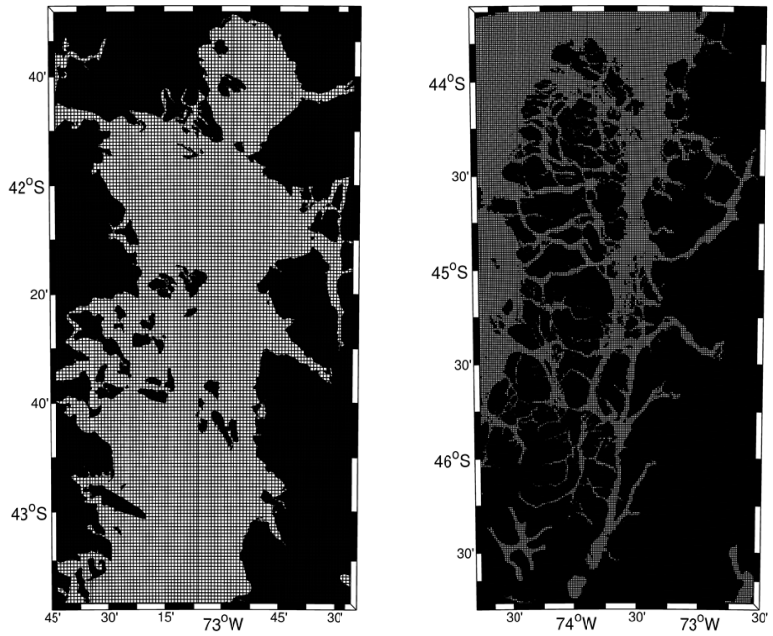

Figura 5. Distribución de elementos horizontales en MOSA, se divide la figura por región para que se puedan apreciar los elementos, los cuales poseen una resolución de ~ 1km.

El dominio de **MOSA** 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 (ver **Figura 6**). El modelo de elevación digital es construido con datos barométricos se cartas SHOA, GEBCO y proyectos locales multihaz. Actualmente se utiliza el dominio MOSAv2, sin embargo, se está probando un dominio nuevo MOSAv3 que contenga una mejor representación batimétrica de la zona, una máscara corregida, una nueva distribución de elementos verticales sigma con mayor cantidad de elementos.

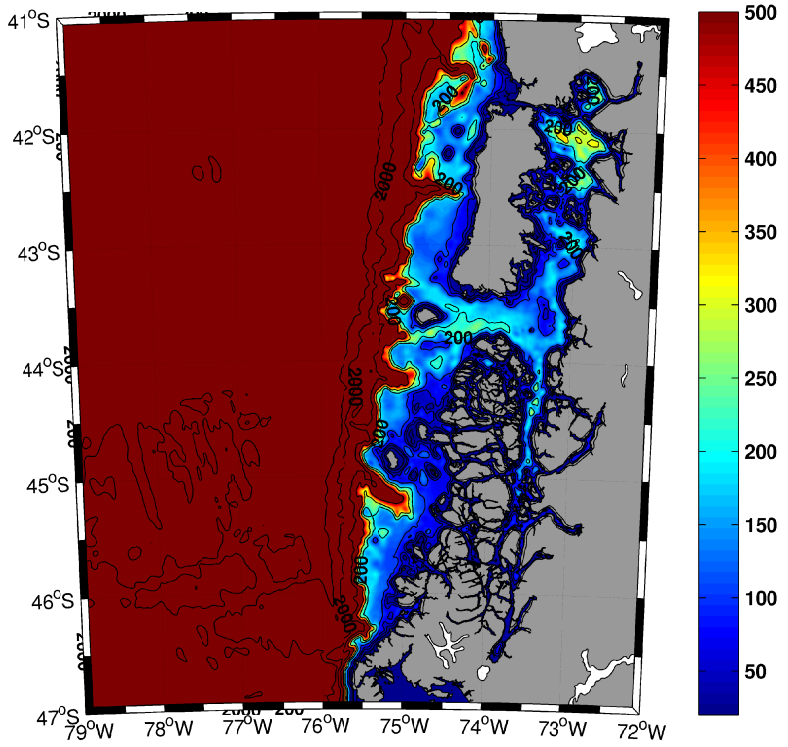

Figura 6. Dominio con la batimetría que usa MOSA actualmente.

Automatización de procesos y simulación en modo operacional.

Los procesos de operación para mantener el pronóstico funcionando se ilustran en la **Figura 7.** Básicamente podemos describir el funcionamiento del sistema operacional en 4 pasos:

i) Preparación del modelo, (una vez definido el/los dominios) donde se realiza la descarga de datos de condiciones de borde y condiciones iniciales, así como de forzantes atmosféricos de sistemas operacionales globales e ingreso de fuentes de agua dulce.

ii) Integración de datos a los dominios, convirtiendo los archivos descargados al formato de ROMS AGRIF.

iii) Inicialización de la simulación a partir de las nuevas condiciones iniciales, definiendo el horizonte de pronóstico y el tipo de paralelización de núcleos.

iv) Levantar resultados en la página web.

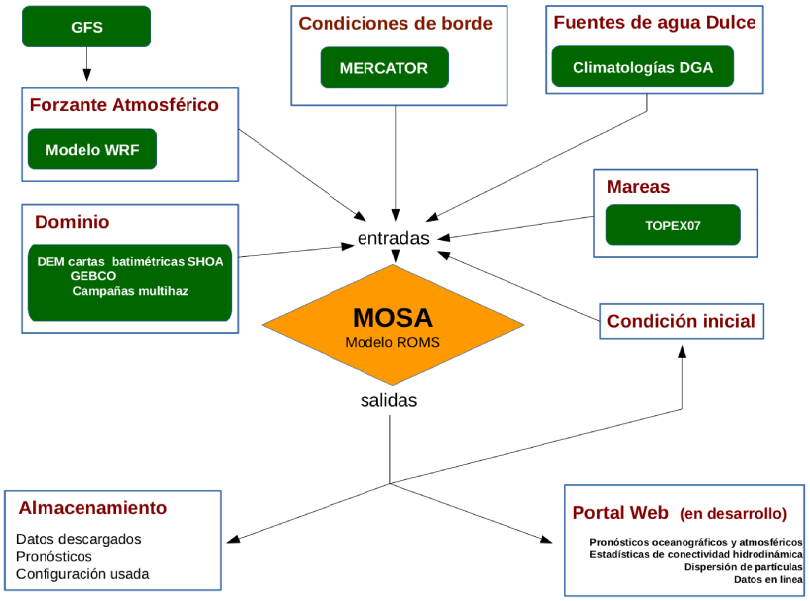

Figura 7. Diagrama de flujos que describe los componentes presentes en el modelo de pronóstico.

Recursos computacionales

Se dispone de un conjunto de ordenadores interconectados entre sí para distribuir el trabajo de cómputo denominado Cluster. El clúster implementado en el instituto de Fomento Pesquero en Castro, consta de 5 Nodos en total, 1 nodo líder y 4 nodos esclavos.

Nodo Lider: En este nodo en donde el usuario interactúa para realizan las configuraciones para el procesamiento de los datos y almacenaje temporal de estos. Este nodo consta con las siguientes características:

NODO LIDER - SGI C1110-RP6

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2620 de 6 nucleos de 2.0 GHz
- 64GB Memoria RAM (8x 8GB)
- 10 Discos duros de 1TB en RAID 5 (8TB disponibles para S.O, app y datos
- Fuente de poder redundante
- Tarjeta PCI Mellanox ConnectX-2 Infinitiband QDR

Nodos esclavos: Realizan los cálculos numéricos del modelo:

NODO COMPUTO (4 unidades) - SGI C1110_RP6

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2620 de 6 nucleos de 2.0 GHz
- 64GB Memoria RAM (8x 8GB)
- 4 Discos duros de 1TB (4TB disponibles para S.O, app y datos
- Fuente de poder redundante
- Tarjeta PCI Mellanox ConnectX-2 Infinitiband QDR

Otro hardware necesario para el funcionamiento del clúster de cómputo:

- Switch Infiniband Voltaire 4036 VLT-30111 de 36 para red de paso de mensajes (MPI).

- Switch Gigabit Ethernet Administrable para red de administración de cluster

Switch Infiniband

Este Switch usa una topología conmutada de forma que cada nodo puede compartir la red al mismo tiempo (en oposición a la topología en bus). Los datos se transmiten en paquetes de hasta 4 kB que se agrupan para formar mensajes. Un mensaje puede ser una operación de acceso directo a memoria de lectura o escritura sobre un nodo remoto (RDMA), un envío o recepción por el canal, una operación de transacción reversible o una transmisión multicast. Al ser un enlace de alta velocidad permite la transmisión de datos a procesar entre los nodos.

Switch Gigabit

Dispositivo de interconexión de equipos mediante la tarjeta de red. Su función es interconectar los segmentos de red, pasando datos de ubn segmento a otro de acuerdo con la dirección MAC de cada dispositivo. Mediante este dispositivo es posible administrar, y configurar los distintos nodos de forma remota.

Softwares

Sistema Operativo Centos 6.7: Distribución Linux enfocada en entornos empresariales y derivada de los paquetes fuentes libremente publicados por Red Hat.

Compilador Intel C++/fortran: Intel afina este compilador optimizándolo para plataformas de hardware, minimizando estancamientos y produciendo así un código que se ejecuta en un número menor de ciclos. El compilador C++ de Intel soporta tres técnicas de alto nivel por separado para optimizar los programas compilados: optimización interprocedimiento o "interprocedural optimization" (IPO), optimización guiada por perfil o "profile-guided optimization"(PGO), y optimización de alto nivel o high-level optimizations (HLO). También soporta técnicas y herramientas que agregan paralelismo en las aplicaciones.

Python 2.7.9: Es un lenguaje de programación interpretado cuya filosofía hace hincapié en una sintaxis que favorezca un código legible. Se trata de un lenguaje de programación multiparadigma, ya que soporta orientación a objetos, programación imperativa y, en menor medida, programación funcional.

Almacenamiento

El sistema de pronósticos genera gran cantidad de información, que es almacenada por cada día de procesamiento de datos. Cada día se genera una carpeta con formato año-mes-día, el cual, contiene un total de 106 items y un peso total de 44.2 Gigabytes, generando así, un total de 1.3 Tera bytes aproximadamente según el mes que corresponda. Para almacenar esto datos, se trasladan a discos de red instalados en la sala de servidores. Estos discos se conectan directamente a la red LAN a la que está conectado el clúster, y a su vez a un sistema de alimentación ininterrumpida (UPS).

El objetivo de este informe es presentar el diseño e implementación del Modelo Operacional Sur Austral (MOSA en adelante), cuyo objetivo principal es establecer un desarrollo a largo plazo, que en esta primera fase logre otorgar la hidrodinámica del sistema y generar un base de información y conocimiento para posteriormente acoplar módulos biogeoquímicos y ecológicos. Además se busca que la información proporcionada por los pronósticos sea integrada en una plataforma de información que englobe diversas herramientas derivadas de la modelación, y que esta información sea disponible para diversos usuarios. Se presenta su desarrollo, implementación, estado de avance y sus perspectivas. Este desarrollo está enmarcado dentro de los proyectos de Asesoría Integral Para la Acuicultura (ASIPA), que es un convenio entre Subpesca – Min de Economía e IFOP, el cual, está encaminado en una perspectiva de desarrollo de mediano y largo plazo en temáticas de gestión costera asociada al conocimiento oceanográfico y desarrollo de herramientas cuantitativas como son los modelos numéricos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Implementación de un sistema pre-operacional oceanográfico regional para la zona Sur Austral de Chile, X a XI regiones.

2.2. Objetivos Específicos

2.2.1. Optimización del desempeño del sistema pre-operacional para las regiones X, XI.

2.2.2. Evaluar el modelo pre-operacional con información en terreno histórico y/o en tiempo real.

2.2.3. Diseñar una aplicación con interfaz de usuario que permita estimar la dispersión de patógenos basados en el modelo pronostico.

2.2.4. Establecer mecanismos de transferencia tecnológica a fin de permitir el incremento de la experiencia nacional en este tipo de proyectos.

3. METODOLOGÍA

6.1. Metodología Objetivo Específico 1: *Optimización del desempeño del sistema pre-operacional para las regiones X, XI.*

Basado en el modelo operacional actualmente en funcionamiento en el proyecto ASIPA 2014 "Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de circulación marina para el apoyo de la acuicultura", etapas I y II, este informe abordará la mejorará del desempeño del sistema pre-operacional en los siguientes tópicos:

Mejoramiento de las fuentes de agua dulce: El modelo operacional, en sus primeras etapas, solo cuenta con información de los principales ríos en los fiordos patagónicos y en forma de promedios mensuales, lo que no permite una correcta cuantificación del volumen total de agua dulce que ingresa al sistema. Para mejorar esta información se utilizará un modelo hidrológico que capture todas aquellas fuentes puntuales de agua dulce de más de 3000 cuencas que se encuentran en la zona austral de Chile, permitiendo esto un primer balance general del volumen de agua dulce que ingresa al sistema marino de la Patagonia Chilena, el modelo hidrológico será evaluado contra datos de caudales de ríos recopilados por la DGA.

Mejoramiento de forzante atmosférica: MOSA-ROMS utiliza información atmosférica del modelo global GFS cuya resolución (55 Km) no logra resolver aspectos locales del viento en la zona de fiordos. En esta etapa, se incluirá información del modelo atmosférico operacional WRF de la Dirección Meteorológica de Chile con una resolución de 4 Km, esto permitirá aumentar detalles de la dinámica del viento en estos sectores.

3.2. Metodología Objetivo Específico 2: *Evaluar el modelo pre-operacional con información en terreno histórico y/o en tiempo real.*

Las observaciones forman parte esencial del sistema MOSA, tanto como datos ingresados directamente al modelo, o como información para calibrar y evaluar el modelo. Se realizarán experimentos que utilicen data histórica para verificar el desempeño del modelo, así como también, si estuviera disponible, información en tiempo real mediante la cual, se generarán series para ser comparadas con lo modelado, permitiendo una idea general de la desviación del modelo respecto de las observaciones. Se espera diseñar un experimento de evaluación del modelo en tiempo real en, al menos, un punto por cada región.

De acuerdo con Murphy (1993), los modelos tienen que cumplir al menos 3 rasgos, consistencia, calidad y valor, siendo el primero y el último, atributos cualitativos de un pronóstico, mientras que la calidad está asociada a los valores estadísticos que cuantifican el error asociado a la simulación.

Los resultados de MOSA-ROMS serán evaluados desde 2 perspectivas diferentes basadas en la información disponible, desde un punto de vista cualitativo, donde se examina la **consistencia** del modelo y otra de una manera cuantitativa, a través de la **precisión** de los resultados obtenidos. Cabe decir que, para estimar la precisión del modelo, es necesario contar con un set de datos que coincidan en el tiempo y el espacio con el modelo, idealmente datos en línea que permitan visualizar el error del modelo en tiempo real. Debido a la poca disponibilidad de datos en línea de las variables modeladas, que este tipo de evaluación solo se hará con el nivel del mar, que cuenta con una red de monitoreo en la zona de estudio mantenida por el Servicio Oceanográfico e Hidrográfico de Chile (SHOA), y de la temperatura y salinidad a una profundidad, obtenida de las estaciones de monitoreo en Chiloé del Centro para el Estudio de Forzantes Múltiples sobre Sistemas Socio-Ecológicos Marinos (MUSELS). Por su parte la consistencia será evaluada desde una perspectiva zonal, explorando la capacidad de MOSA de reproducir patrones típicos de áreas previamente estudiadas por IFOP a través de la ejecución de proyectos de modelación de Alta Resolución.

3.3. Metodología Objetivo Específico 3: *Diseñar una aplicación con interfaz de usuario que permita estimar la dispersión de patógenos basados en el modelo pronostico.*

Se diseñará una aplicación web dentro de sitio de pronósticos *www.chonos.org* que permita a los usuarios (por ejemplo: Subpesca o Sernapesca) generar simulaciones puntuales de dispersión de partículas pasivas, con el fin, que pueda ser utilizada la información de MOSA-ROMS para predecir probables transportes de patógenos en un tiempo razonable. Esta aplicación quedará disponible con la idea de que el usuario obtenga dicha información de la forma más directa y sencilla posible.

3.4. Metodología Objetivo Específico 4: *Establecer mecanismos de transferencia tecnológica a fin de permitir el incremento de la experiencia nacional en este tipo de proyectos.*

La transferencia tecnológica deberá permitir el incremento de la experiencia en las instituciones, que tengan acceso al sistema operacional, permitiendo una mayor comprensión de los resultados del proceso de modelación ejecutado. En específico, respecto del objetivo 3 se realizan talleres que permitan ajustar la forma de presentación de la aplicación de manera tal, que pueda ser utilizada con sencillez posterior a su implementación. Junto a esto, se considera la realización de talleres de

divulgación del sistema operacional que permita trasmitir el uso y ventajas de MOSA, pero también para obtener recomendaciones de parte de los usuarios, de tal manera que el sistema esté en permanente actualización y mejora.

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 y que dieron origen a este estudio (*e.g.*, 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 los distintos medios al alcance (correo electrónico, telefonía y teleconferencia). 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 con el consultor de la Universidad de Concepción:

El proyecto contempla una serie de asesorías científicas, talleres cerrados y vistas entre IFOP y gente del 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.

Reunion°1

Se realizó una asesoría científica al personal de IFOP por parte del Dr. Andrés Sepúlveda y el estudiante de doctorado Osvaldo Artal, ambos de la Universidad de Concepción, sobre la implementación de ROMS, fundamentos, conceptos básicos, herramientas de pre y post proceso, así como ejemplos de simulaciones. Se acuerda que será la primera de una serie de asesorías en ROMS.

Fecha: 26-30 enero, 2015.
Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Dr. Andrés Sepúlveda (UdeC)

2. Osvaldo Artal (UdeC)
3. Milton Salas (IFOP)
4. Elías Pinilla (IFOP)
5. Cristian Ruiz (IFOP)

Reunión n°2

Entre los días 27 y 30 de abril de 2015, se realizó una asesoría científica en las dependencias del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción al personal IFOP participante del proyecto. La asesoría estuvo orientada a la creación y edición de los dominios del modelo usando las herramientas de ROMS_TOOLS, la construcción de modelos de elevación digital, definir protocolos y mecanismos para la creación de la página web y el montaje del servidor web que albergará el modelo operacional. También se discutió sobre temas técnicos del modelo, parametrizaciones y operación entre otros temas, orientando el trabajo en función de los objetivos contemplados.

Fecha: 27-30 abril, 2015
Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Osvaldo Artal (UdeC)
3. Milton Salas (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

Reunión n°3

El asesor científico del proyecto, el Dr. Andrés Sepúlveda visito las dependencias de la base de Putemún para trabajar en los mecanismos de automatización del sistema operacional, desarrollo de protocolos de descarga de datos y en la definición de la operación del modelo operacional. Se acuerda una nueva vista para el mes de julio.

Fecha: 25-26 de mayo, 2015.
Lugar: Base Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Elías Pinilla (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

Reunión n°4

Los asesores científicos del proyecto, Dr. Andrés Sepúlveda y Osvaldo Artal visitan la base Putemún para coordinar el trabajo de mejorías al sistema, como también realizar una evaluación general de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la primera asesoría científica, se afina los objetivos para comenzar una segunda asesoría científica con ellos, que abarque las etapas II y III del presente proyecto. Entre el trabajo realizado, se realiza una calibración del modelo para la incorporación de fuentes de agua dulce, se corrige un error en el forzante de marea asociado a la amplitud de la constituyente armónica S2 de la marea. Se afinan protocolos para reemplazar el forzante atmosférico de GFS por un modelo operacional basado en WRF implementado por la DMC como parte de un convenio de colaboración firmado con IFOP para el desarrollo de este modelo.

Fecha: 16-18 de marzo, 2016.
Lugar: Base Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Elías Pinilla (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

Reunión n°5

El asesor del proyecto, el Dr. Andrés Sepúlveda, visita el centro Putemún para evaluar las actividades en desarrollo, entre ellas las periódicas evaluaciones al modelo, la implementación de fuentes de agua dulce, la migración del forzante atmosférico GFS a WRF, modificaciones al portal Iproach (ahora Chonos) y la generación de alguna publicación relacionada con el modelo, entre otros temas.

Fecha: 23-24 de agosto, 2016
Lugar: Base Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Elías Pinilla (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

4.3 Talleres de trabajo

Una de las actividades del proyecto es la realización de un taller sobre problemas inversos, donde nos enfocamos en el desarrollo de técnicas de asimilación de datos. Esto con el objeto de adquirir los conocimientos básicos para su futura implementación en los pronósticos oceanográficos y atmosféricos. Estas técnicas permiten a través de datos observados generar una condición inicial con un error mínimo, disminuyendo la incertidumbre del modelo. El taller se ha divido en 2 etapas, la primera realizada entre el 5 y el 7 de abril y el 17 y 19 de mayo de 2017 en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, a cargo del Dr. Andrés Sepúlveda, fue una introducción teórica y práctica de los conceptos matemáticos y estadísticos sobre los problemas inversos y la evaluación de posibles técnicas de asimilación de datos. Una de las conclusiones relevantes de este trabajo fue que se podría eventualmente realizar una asimilación de datos 3DVAR (enfoque variacional) con datos de TSM o del nivel de mar (altimetría), obtenidos de imágenes satelitales. Si bien no es suficiente, puesto que solo otorga información de la superficie del mar, es justamente la zona de mayor variabilidad, por lo que puede ser una primera aproximación.

Parte 1
Fecha: 5-7 abril, 2017.
Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Dr. Andrés Sepúlveda (UdeC).
2. Oliver Venegas (IFOP).
3. Cristian Ruiz (IFOP).

Parte 2
Fecha:17-19 mayo, 2017
Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1.Dr. Andrés Sepúlveda (UdeC).
2.Oliver Venegas (IFOP).
3.Cristian Ruiz (IFOP).

4.4 Talleres de difusión:

El proyecto contempla la realización de talleres de difusión de 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 de difusión n°1

El día 14 de agosto se realizó un taller de difusión donde se presentó el desarrollo del sistema operacional, donde estuvieron presentes académicos, autoridades de IFOP, personal del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, de la Dirección Meteorológica de Chile y de la Subsecretaria de Pesca y Acuicultura entre otros.

Las temáticas abordadas en el taller se distinguieron de 2 partes, la primera sobre modelaciones efectuadas en el pasado, y exposiciones sobre dinámica estuarina, enfocándose en los procesos hidrodinámicas y de mezcla en al zonas de estudios, mientras que al segunda parte estuvo enfocada en la realización de pronósticos, donde junto con presentar el Sistema de predicción sinóptico, expuso personal de la Dirección Meteorológica de Chile, presentando su forma de trabajo, el cual es una referencia directa del sistema a implementar en este proyecto.
Fecha: 14 de agosto ,2015.
Lugar: Hotel Gran Pacifico, Puerto Montt

Expositores: Gabriel Soto (IFOP)
Elías Pinilla (IFOP)
Cristian Ruiz (IFOP)
Osvaldo Artal (UdeC)
Rodrigo Delgado (DMC)
Manuel Castillo (UdeC-UV)
Carolina Calvete (SHOA)
Oliver Venegas (UdeC)

Taller de difusión n°2

El día 11 de enero de 2016, se realiza en la ciudad de Coyhaique el taller “Importancia del agua dulce en la circulación estuarina: Metodologías para abordar cuantificación en sistemas de fiordos y canales Australes de la Patagonia sur Austral”, el cual estuvo enfocado en la dinámica del agua dulce y sus distintas implicancias en sistemas glaciales, estuarinos, costeros y pluviales.

Fecha: 11 de enero ,2016.

Lugar: Hotel Los Ñires, Coyhaique.

Expositores Gabriel Soto (IFOP)
Elías Pinilla (IFOP)
Pablo Reche (IFOP)
Cristian Ruiz (IFOP)
Dr. Sebastian Mernild (Los Alamos National Laboratory, USA)
Dr. Cedomir Marangunic (Geoestudios)
Dr. Ginno Casassa (Geoestudios)

Taller de difusión n°3

El 23 de enero de 2017 se realizó el taller: Modelación Hidrodinámica: Aplicaciones a la Acuicultura", en la región de Magallanes, invitando a la comunidad científica vinculada a la región, donde se presentó los alcances del trabajo realizado por el grupo de oceanografía de Chiloé, siendo uno de los puntos relevantes del taller la presentación del estado de avance del proyecto. El taller conto con una alta convocatoria de académicos de diversas instituciones afines en la región de Magallanes. El taller conto con la presencia de Thomas Adams, académico del Scottish Association for Marine Science (SAMS), Escocia.

Fecha: 23 de enero, 2017.
Lugar: Punta Arenas
Expositores: Gabriel Soto (IFOP)
Elías Pinilla (IFOP)
Pablo Reche (IFOP)
Cristian Ruiz (IFOP)
Thomas Adams (SAMS)

4.5 Compra y mantenimiento de equipo:

Durante la ejecución de la etapa II del 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 a lo menos 3 actividades al respecto:

i) **Convenio IFOP- COPAS-SUR (UdeC):** Este convenio firmado entre el Instituto de Fomento Pesquero y el Centro de investigación COPAS-SUR busca poner en operación una boya oceanográfica perteneciente a la Universidad de Concepción en el Fiordo Puyuhuapi, comprometiendo a IFOP asumir los costos de mantención y puesta en marcha. Esta información será vital para disminuir la incertidumbre del modelo en una zona de alto interés.

ii) **Convenio IFOP-MUSSEL:** Este convenio entre IFOP y el Centro para el Estudio de Forzantes Múltiples socio-Ecológicos Marinos, el cual está compuesto por varias instituciones, busca complementar la información que tiene MUSSEL en 2 puntos de observación en las costas de Chiloé central (Dalcahue y Chonchi). Estos puntos miden temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y otros parámetros. IFOP se compromete a incorporar estaciones meteorológicas y la capacidad de transmitir en línea dicha información para, entre otros usos, ser utilizados por el modelo operacional en su evaluación, y calibración.

iii) **Compra de equipos multiparámetros y estaciones meteorológicas:** IFOP ha adquirido recientemente 5 estaciones meteorológicas con capacidad de transmisión de datos en línea y 3 sensores multiparámetros, los cuales miden entre otras cosas, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. Este material será destinado para la creación de 3 puntos de observación en línea entre Chiloé Central y Aysén, y complementar las estaciones de muestreo de MUSELS en Chiloé Central con estaciones meteorológicas.

4.6 Carta Gantt del proyecto

El proyecto tiene una duración total de 20 meses, finalizando en agosto de 2017.

Actividades	E15	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E16	F	M	A	M	J	J	A
1. Mejoramiento fuentes de agua dulce	X	X	X	X	X	X														
3. Acoplamiento modelo WRF	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X									
4. Evaluación modelo v/s observaciones								X	X	X	X	X	X	X						
5. Desarrollo aplicación web para usuarios					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
4. Taller para usuarios aplicación web										X						X				
9. Taller difusión																	X		X	
10. Reuniones de coordinación	X				X				X				X					X		
11. Informe avance 1								X												
12. Informe avance 2																X				
13. Informe final																				X

5. RESULTADOS

Objetivo N°1: Optimización del desempeño del sistema pre-operacional para las regiones X, XI.

Paralelamente al trabajo de mantención y soporte informático que requiere el sistema para que los procesos de automatización se mantengan constantes, se ha trabajado continuamente en mejorar el desempeño del modelo numérico a través del ingreso de un mayor número de fuentes de agua dulce y mejorando el forzante atmosférico.

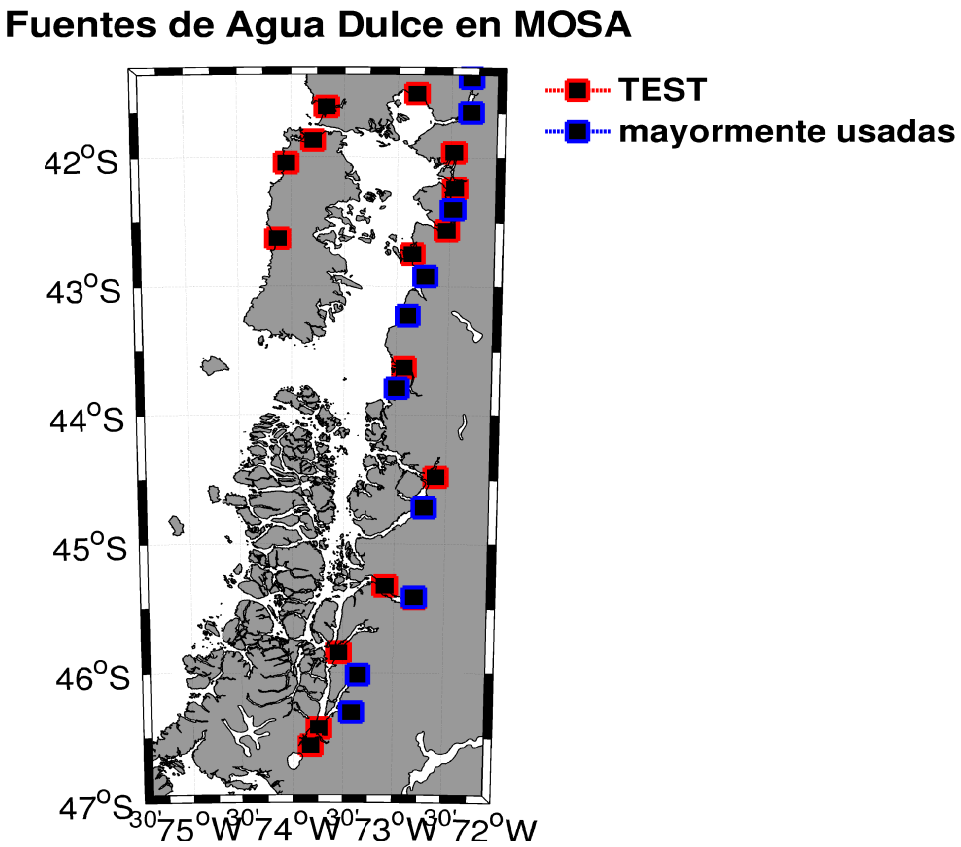

Figura 8. Fuentes de agua dulce ingresadas a MOSA, en azul las que han permanecido estables mayormente, mientras que en rojo, las que se han ingresado esporádicamente, pero han provocado en la mayoría de los casos errores tipo “blow up” y han tenido que ser retiradas.

5.1.1 Fuentes de agua dulce:

Uno de los problemas más frecuentes de MOSA-ROMS, en sus etapas pasadas, ha sido que el dominio (MOSAv2), posee un fondo marino suavizado en diversas zonas, esto con el fin de hacerlo compatible a ROMS, el cual requiere un parámetro de pendiente de filtro de r = 0.25 en la construcción de grillas. Este filtro se aplica para evitar la presencia de pendientes abruptas en la batimetría, es decir, altos gradientes de *h* en relación al tamaño de los elementos, lo que tiende a forzar la disminución del paso temporal del modelo. A esto le agregamos que ROMS utiliza un esquema de elementos horizontales estructurados que no permite definir líneas de costa de contornos suaves, lo que restringe la difusión fluida de energía, retornando en inestabilidades. Si bien, utilizar un fondo suavizado le otorga estabilidad al modelo, como desventaja tenemos que aparte de tener un perfil batimétrico menos realista, en muchos casos ROMS subestima la profundidad de los canales, acercando críticamente los niveles sigma superficial, disminuyendo la resolución vertical en superficie, que es por donde se ingresan los flujos de ríos. Esto trae como consecuencia la concentración de flujos elevados de agua en elementos pequeños que el paso de tiempo asignado no alcanza a resolver convergiendo en errores tipo “blow up”. A su vez, el suavizado describe constricciones inexistentes que provocan patrones de circulación de pequeña escala irreales e inestabilidades para el modelo, acentuándose el problema cuando se ingresan volúmenes adicionales, como es el caso de los caudales de ríos. Actualmente se prueba un nuevo dominio (MOSAv3) el cual tiene una batimetría más realista y una nueva distribución de elementos verticales tipo sigma con 42 niveles. Esto llevará consigo mejoras ostensibles en la calidad de los resultados.

MOSA-ROMS corre actualmente con un número variables de fuentes de agua dulce, estas corresponden a los caudales en las desembocaduras de los ríos principales en la zona, cuyos regímenes en su mayoría son mixtos, con preponderancia a regímenes pluviales, es decir, máximos en otoño e invierno debido a la alta precipitación en la zona. En la zona sur del dominio donde se encuentran los límites del Campo de Hielo Norte, se presenta un régimen mixto con mayor presencia nival, donde los deshielos de verano pueden presentar máximos relativos en los caudales. La variabilidad en el número de fuentes usadas, se debe principalmente a que la adición de volumen extra al modelo lo vuelve altamente inestable. Aunque se ha tratado de mantener un numero constate cercano a las 10 fuentes, su número ha variado entre 2 a 26 puntos desde su inicio. Esto ha forzado de manera recurrente ajustar su número a la baja para evitar errores tipo “blow up”, o

simplemente se ha reiniciado el pronóstico con un mínimo de ellas debido a que no logra iniciarse correctamente, ya que la prioridad del modelo operacional es que se mantenga lo más constante posible (**Figura 8**).

Fuentes mensuales y diarias: Para integrar los caudales de ríos a MOSA-ROMS, se utilizan series diarias, específicamente en 4 puntos (Ríos Puelo, Palena, Cisne y Aysén) que se encuentran en línea por parte de la Dirección General de Aguas (DGA) **(Figura 9)**. Estos puntos se han tratado de mantener casi constantes, sin embargo ha debido reducirse su número a un mínimo de 2 en ocasiones debido a diversos "blow up" para mantener el modelo corriendo diariamente, siendo las fuentes del Rio Puelo y de Rio Cisnes las más utilizadas. Estos datos fueron obtenidos promediando 5 años de datos diarios, entre 2011 y 2015 extraídos de las estadísticas hidrológicas en línea publicadas por la Dirección General de Aguas. En ellos se aprecia una variabilidad temporal bastante similar con máximos a inicios de invierno donde se observan los mayores caudales, con el rio Puelo y Palena superando los 2000 $m^3 s^{-1}$, mientras que también se aprecian máximos relativos a inicios de primavera y verano.

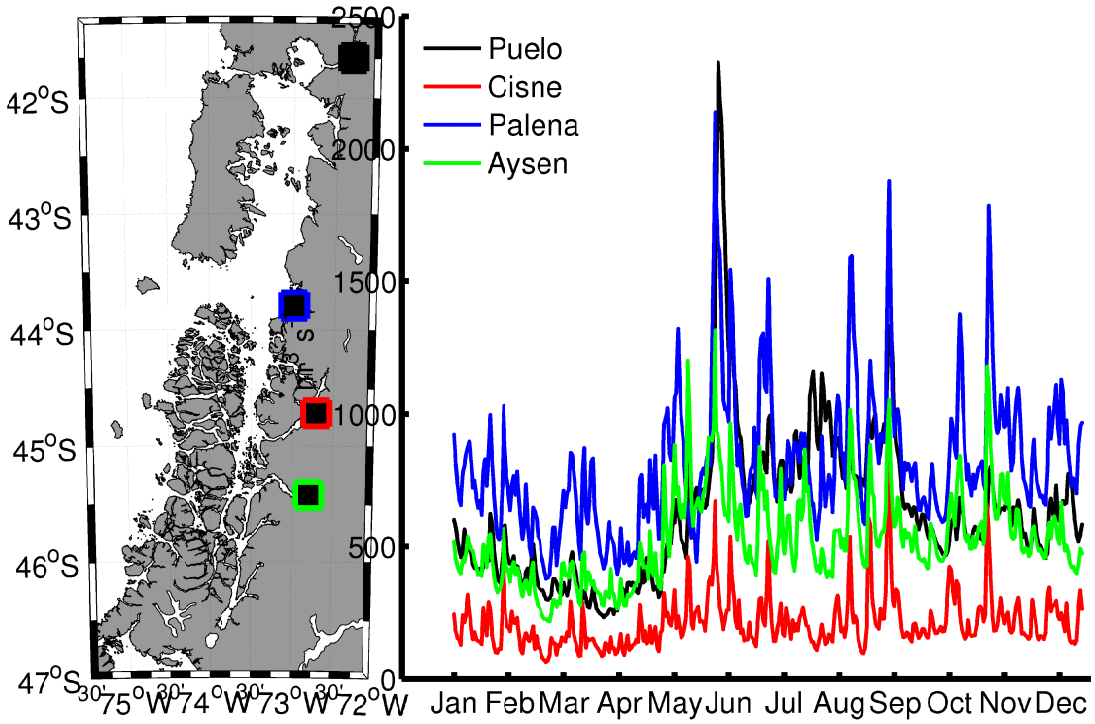

Figura 9. Fuentes de agua dulce de MOSA-ROMS con caudales diarios, promediados de 5 años de datos 2011-2015.

Por otra parte, tenemos datos de promedios mensuales para 21 fuentes, las que fueron estimadas a partir del balance hídrico de cuencas de la DGA, 1987. El método consistió básicamente en identificar a través de datos topográficos, el tamaño y forma de las cuencas, así como sus caídas de agua hacia el sistema marino. Son estos últimos puntos, los que se denominan como fuente y son el punto más cercano, en la resolución del modelo, donde la descarga de agua dulce entra en el mar. De cada cuenca se tomó un rio mayor como referencia que posea series de datos in situ suficientes para estimar su variabilidad temporal anual. Con esta nueva "variabilidad de cuenca" se distribuyó el volumen total en las n-fuentes identificadas y se le asignó mayor peso a los ríos mayores. Si bien esto se realizó como un ejercicio de estimación para conocer caudales en la desembocadura de ríos de los cuales no se contaba con información suficiente, esta ha resultado ser bastante útil como primera aproximación, siendo utilizada en diversos modelos hidrodinámicos de alta resolución

implementados por IFOP en la zona sur de Chile, otorgando resultados bastante razonables en algunas zonas.

Aunque evidentemente el método presenta limitaciones, se hace necesario asumir estos valores de manera de evitar una subestimación en la descarga de agua dulce que pudiese inducir a errores mayores. Paralelamente a este proyecto, se está desarrollando un proyecto de modelación de alta resolución en la zona de Estero Elefantes, el cual contempla la medición de caudales en todas la zona de estero elefantes, canal Cupquelán y Quitralco, datos valiosos que permitirán evaluar la metodología usada anteriormente y además podrán ser incorporados a la nueva versión de MOSA-ROMS, la cual contempla un nuevo dominio MOSAv3 con nuevo tipo de coordenadas sigma y un mayor número de niveles verticales (actualmente se usan 32, se espera usar 42 en la nueva versión).

De estas series mensuales, se han utilizado de modo más recurrente en MOSA-ROMS, al menos 6 de manera constante (Petrohué, Yelcho, Exploradores, Cupquelán, Vodudahue y Corcovado), y se han realizado pruebas otras 25. Sin embargo, en el actual dominio, no se ha logrado estabilidad con todas ellas ingresadas al mismo tiempo **(Figura 10).** De ellos los ríos Yelcho y Petrohué son los que concentran los mayores caudales, exhibiendo una fuerte estacionalidad de régimen mixto, con máximos en verano (por deshielos) y en invierno (por precipitación). El rio Yelcho presenta un caudal de 780 m^3 s^{-1}, según las estimaciones, mientras que Cupquelán con un régimen nival, presenta máximos en verano 300 m^3 s^{-1} para luego descender ligeramente a promedios de 200 m^3 s^{-1}.

Es importante revisar que las fuentes no contengan máximos abruptos que provoquen el ingreso de un gran volumen de agua en un pequeño intervalos de tiempo. Es por eso que se usan promedios que permitan remover variabilidad de alta frecuencia que contenga eventos anómalos de altos caudales los cuales podrían generar inestabilidad en los pronósticos.

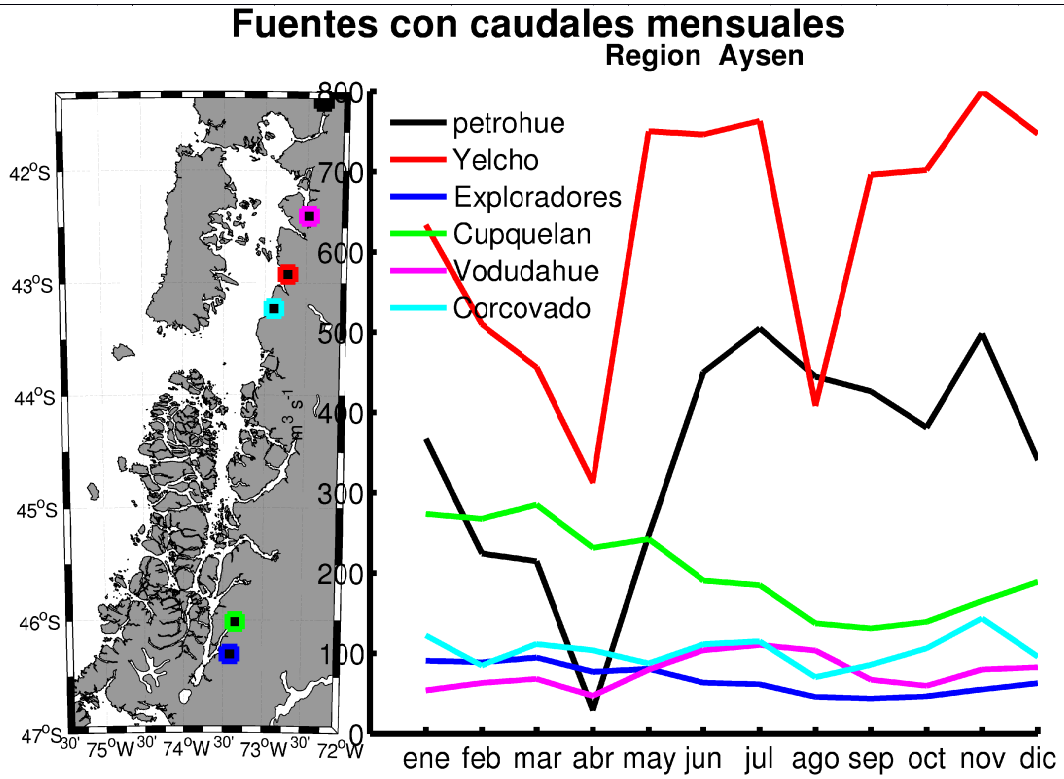

Figura 10. Caudales mensuales para 6 fuentes de agua dulce ocupadas en MOSA-ROMS. Estas series se construyeron a partir de Balance Hidrológico de cuencas de la DGA, 1987. Se espera actualizar algunas las series con datos medidos por IFOP durante 2016-2017.

Inicialmente se intentó correr el modelo con todas las fuentes citadas anteriormente, sin embargo, a los pocos días de iniciarse, este tendió a generar "blow Up" en diversos puntos, en su mayoría asociados a angosturas y constricciones. Estas configuraciones topográficas reducen el volumen, aumentando los flujos a números críticos debido a la conservación de momentum. Si el flujo se vuelve muy elevado en un elemento muy pequeño (en MOSA los elementos rectangulares tienen una resolución horizontal de ~1km) el modelo necesita un paso temporal más pequeño para poder discretizar, de lo contrario este se vuelve turbulento. Es por ello que se disminuyó el paso de tiempo barotrópico del modelo de 60 a 45 segundos, lo cual logró otorgarle a MOSA estabilidad y permitió seguir probando gradualmente el ingreso de nuevas fuentes (**Figura 11**).

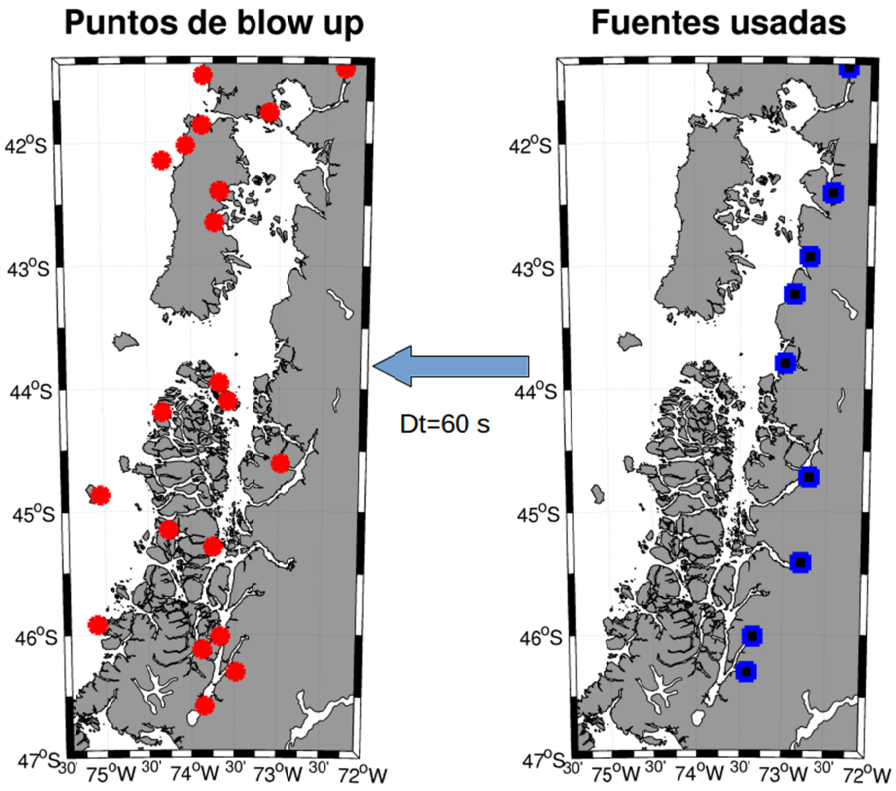

Figura 11. Zonas que presentaron errores "Blow Up" (izquierda) y fuentes de agua dulce con un paso de integración temporal barotrópico de 45 segundos (derecha).

Usando este paso de tiempo se logró tener un modelo estable, con fuentes de agua dulce, al menos, de los ríos principales de la zona. Seguidamente se trabajó en realizar pruebas de ingreso de un número mayor de fuentes al sistema, con el objeto de poder otorgarle la capacidad de reproducir con un mayor grado de aproximación la estratificación y la profundidad de la capa de mezcla en el modelo.

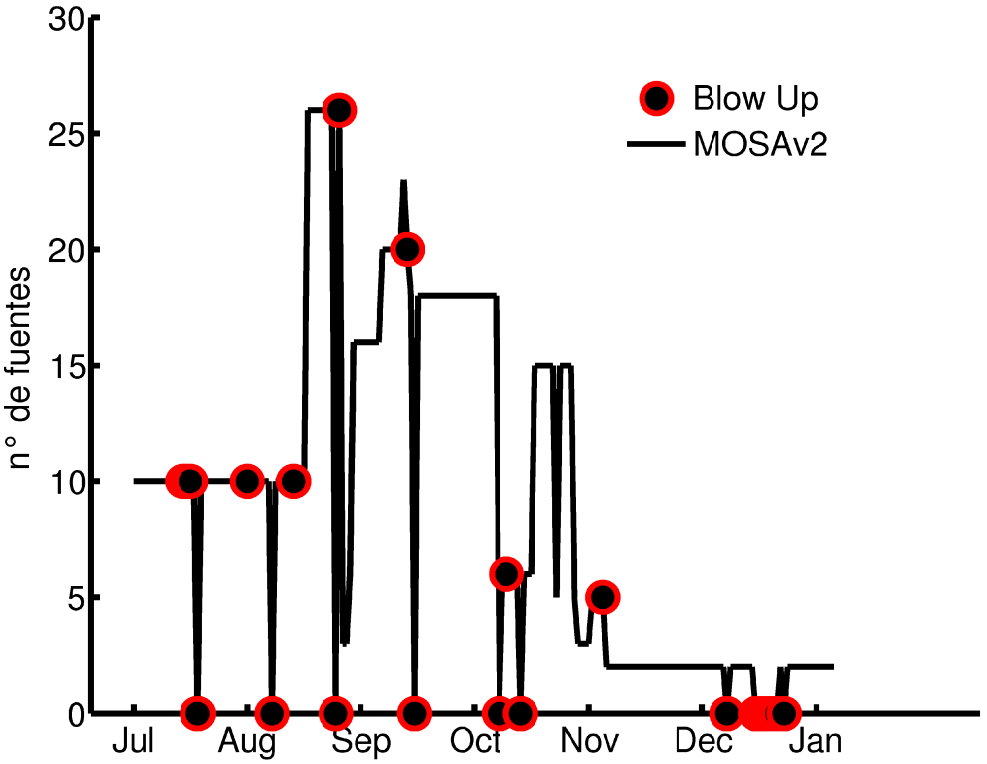

Figura 12. Numero de fuentes utilizadas en el pronóstico por cada día junto a caídas del modelo por "blow up" entre julio 2016 y enero 2017.

Una vez que el modelo logró estabilidad con las fuentes, se realizaron pruebas paralelas ingresando un mayor número de ellas, donde se observó su evolución semanal, hasta que se reconocía como un punto estable en los test, se proseguía a ingresarlas en el pronóstico normal, sin embargo, estas no logran que el modelo trabaje adecuadamente y termina generando inestabilidades. En la mayoría de los casos **(Figura 12).**

Actualmente MOSA está corriendo con un dominio denominado MOSAv2, sin embargo, con el objeto de tener un modelo batimétrico más realista y estable se construyó un nuevo dominio, donde se mejoró la batimetría, la máscara y la distribución de niveles verticales, a este nuevo dominio le llamaremos MOSAv3. Una vez logrado que MOSAv3 corra de manera establemente, se procede a

agregarle las fuentes de agua dulce. Se realizan sistemáticas pruebas en paralelo con corridas del pronóstico MOSAv2 en modo prueba para evaluar el desempeño de estos y ver si es posible mejorar la estratificación del modelo. Para ello se fue agregando gradualmente un mayor número de fuentes en periodos acotados, hasta llegar a un máximo de 29, logrando estabilidad en experimentos de 20 días, en contraste con el dominio actual MOSA v2 que presentó reiterados "blow up", el nuevo dominio MOSAv3 se mostró más estable con 25 fuentes, presentando menos errores que MOSAv2 en un tiempo similar. **(Figura 13).**

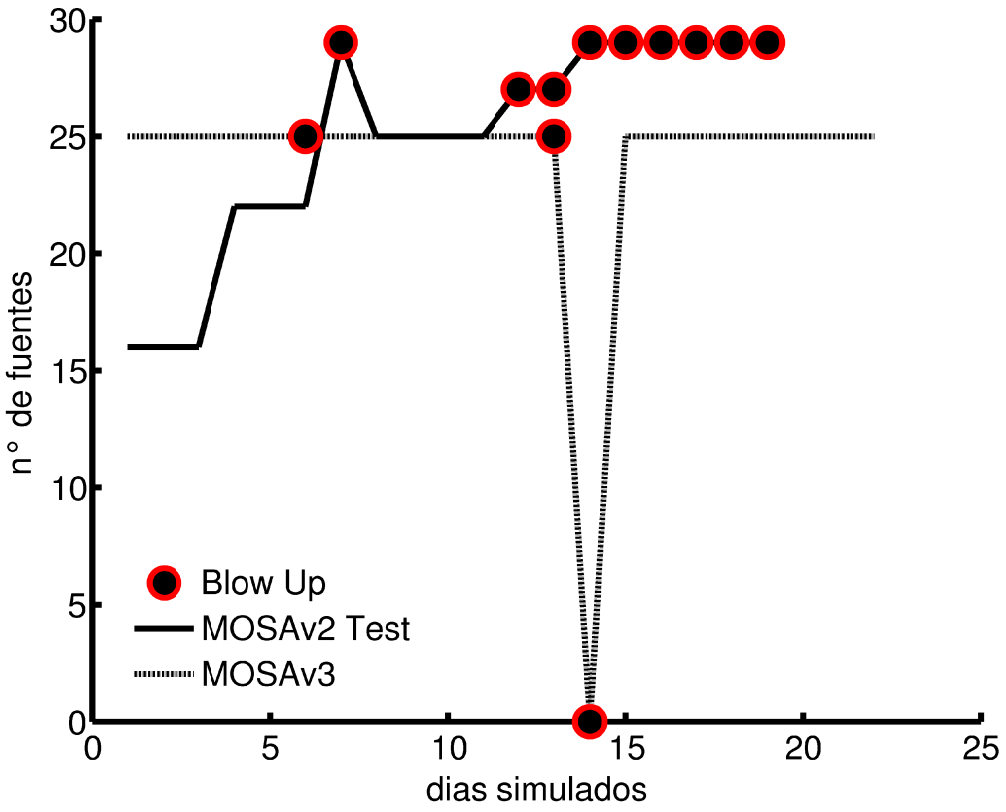

Figura 13. Pruebas para evaluar la estabilidad de modelo con distintos dominios, donde MOSAv3 presento mayor estabilidad, menos caídas y más fuentes disponibles.

Lo anterior nos siguiere que MOSAv3 podría trabajar con un mayor número de fuentes que MOSAv2. Sin embargo, este nuevo dominio al poseer una distribución de elementos verticales diferente y tener diversas modificaciones en la máscara, no se ha podido iniciar con las condiciones iniciales que pronostica MOSA. Se está evaluando iniciar este nuevo dominio con condiciones

iniciales de MERCATOR, lo cual haría perder la estratificación generada hasta ahora, pero como ventaja se tendría un modelo más estable, con una batimetría más realista y con mejor capacidad para resolver la estratificación al poder recibir mayor volumen de agua de las fuentes.

Campo de hielo Norte: Para poder ingresar el aporte de agua proveniente del Campo de Hielo Norte ubicado en la Laguna San Rafael, se trabaja de un modo diferente. Primero se resolvió por medio de diversas estimaciones y discusiones usar un valor constante de 400 m^3 s^{-1} como caudal de un hipotético aporte de deshielo. Este valor podría generar un flujo de agua que no está asociado a ningún rio, para resolver esto y debido a las limitantes de modelo, se ingresó este valor como precipitación en un área acotada a la laguna (un par de elementos del modelos), entregándole a MOSA la posibilidad de generar una estratificación permanente en la zona y a su vez mantener la estabilidad del modelo (**Figura 14**). Si bien, el valor responde a una aproximación bastante gruesa, se espera que a partir de los resultados obtenidos del proyecto "Modelación de Alta Resolución en Estero Elefante" ejecutado por IFOP, el cual contempla la medición de diversos caudales en la desembocadura de algunos ríos en la zona y también la Laguna San Rafael, se puedan incorporar al modelo valores realistas para ciertas épocas del año.

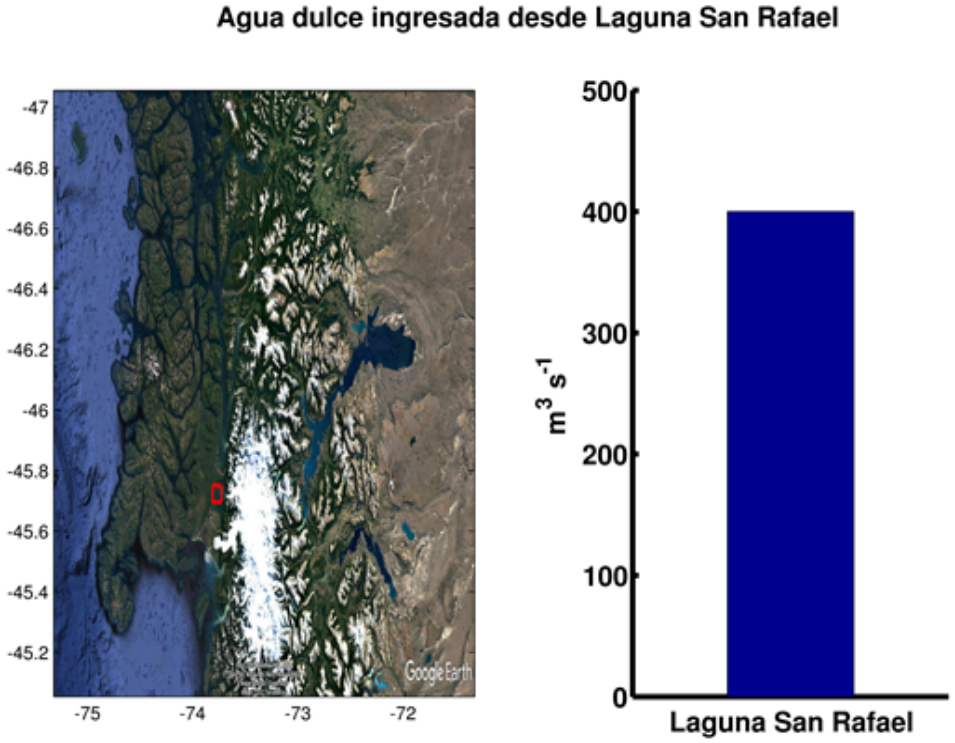

Figura 14. Ubicación de punto de ingreso de caudal en forma de precipitación par el deshielo de Campos de Hielo norte en Laguna San Rafael.

5.1.2 Forzante Atmosférico

Con el propósito de optimizar el desempeño del sistema pre-operacional en las regiones X y XI, se buscó mejorar el forzante atmosférico utilizado en el sistema MOSA-ROMS, actualmente facilitados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), alcanzando 12km de resolución horizontal con el modelo regional de la atmósfera Weather Research and Forecasting (WRF).

Sin embargo, para resolver a través de modelos numéricos, la circulación atmosférica en la zona Sur-Austral de Chile, es fundamental conseguir una resolución horizontal más detallada (para este caso < 12km), puesto que la accidentada topografía presente en la región, juega un papel fundamental en la dinámica atmosférica, permitiendo canalizar los vientos a lo largo de sus abundantes valles, fiordos y canales, creando de esta manera, patrones locales de circulación, que modelos globales o de gruesa resolución, no son capaces de resolver.

Dado esto, se implementó el modelo atmosférico WRF en una máquina con 48 núcleos computacionales disponibles para el cálculo, logrando independencia de estos procesos y a la vez un manejo propio de las configuraciones y operatividad del modelo. El avance, en términos de forzante atmosférico, apuntó, principalmente, a una reducción de escala con respecto a los 12km de resolución horizontal que actualmente entrega la DMC.

Este proceso es posible mediante dominios anidados, lo cual consiste en situar un dominio (denominado hijo) dentro de otro dominio mayor (denominado padre), siguiendo una relación de 1:3 o 1:5 con respecto al padre, básicamente para mantener la estabilidad numérica del modelo. Este método resulta esencial, especialmente para la zona de canales y fiordos de la X y XI Región cuyas dimensiones, en su mayoría, presentan valores bajo 12 km.

Se llevaron a cabo 4 escenarios de prueba durante 1 día, permitiendo evaluar, esencialmente, los tiempos de proceso más eficientes para un sistema de pronóstico operacional con 48 núcleos computacionales. Los dominios se centraron en la zona del mar interior de la X y XI Región (~41 - 47.5ºS y ~71 – 78.5ºW) y se construyeron con proyección Lambert y la base de datos topográficos de la USGS de ~900m de resolución horizontal. Finalmente se utilizó como forzante el modelo global de predicción atmosférica Global Forecast System (GFS) de 0.25º de resolución horizontal para obtener los siguientes escenarios:

ESCENARIO 1: Para el primer escenario se configuró un solo dominio, reduciendo la escala de GFS a 5km de resolución espacial. El tiempo estimado de cómputo para 24h de modelación fue de 30min.

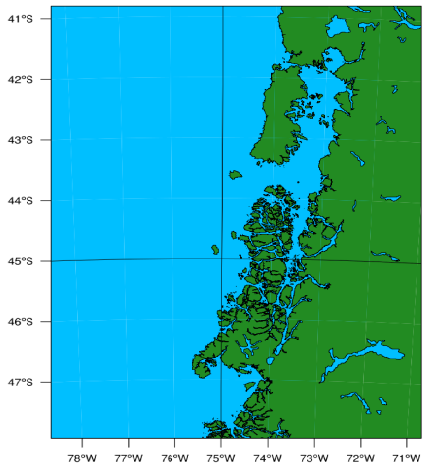

Figura 15. Primer escenario WRF operacional con 1 dominio de 5km de resolución horizontal.

.

ESCENARIO 2: El segundo escenario consistió en dos dominios. El dominio 1 se configuró con resolución horizontal de 9km, para luego establecer una relación de 1:3 con el dominio 2 y alcanzar 3 km de resolución horizontal para la zona de interés. El tiempo de cómputo calculado para modelar 1 día fue de 90min.

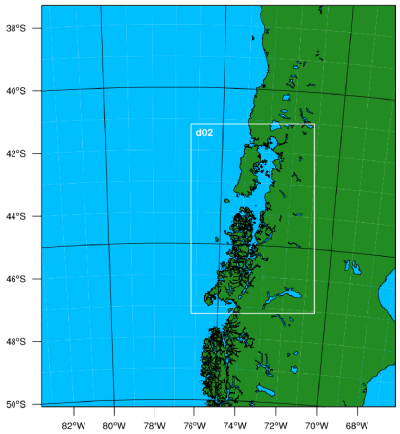

Figura 16. Segundo escenario WRF operacional con 2 dominios. Dominio padre 9km e hijo 3km de resolución horizontal.

ESCENARIO 3: El escenario 3 se fijó con 2 dominios. El padre con resolución horizontal de 9km y el hijo siguió una relación de 1:5 con respecto al padre, por lo tanto alcanzando 1.8km de resolución horizontal. Este escenario se demoró 240min en calcular 1 día.

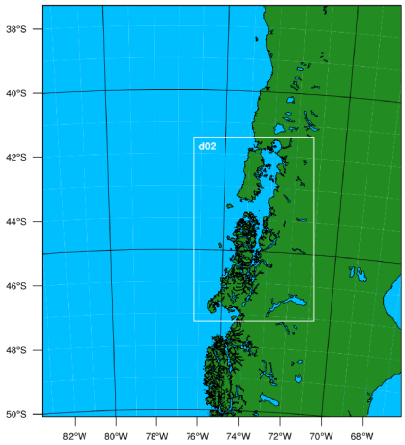

Figura 17. Tercer escenario WRF operacional con 2 dominios. Dominio padre 9km e hijo 1.8km de resolución horizontal.

ESCENARIO 4: Por último se configuró este escenario con 2 dominios siguiendo una relación de 1:5, con 5km de resolución horizontal para el padre y 1km para el hijo. Este escenario, a pesar de correr el pre-procesamiento del modelo, no fue capaz con 48 núcleos computacionales de comenzar la modelación de 1 día.

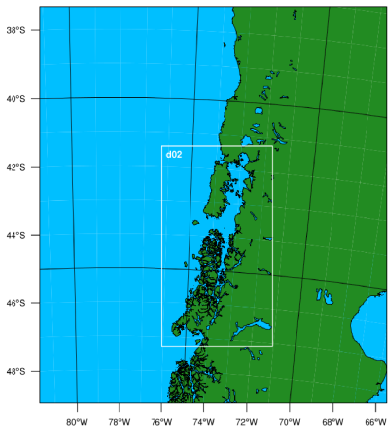

Figura 18. Cuarto escenario WRF operacional con 2 dominios. Dominio padre 5km e hijo 1km de resolución horizontal.

A partir de esto, se espera evaluar el escenario más eficiente en términos operacionales, para luego poner en marcha un sistema de pronóstico atmosférico con WRF, alimentado diariamente por el modelo global GFS, en donde se extraerá el primer nivel vertical de las variables atmosféricas y se procederá a forzar el sistema MOSA con esta información de alta resolución.

Red de observación atmosférica para el sistema operacional.

Considerando la escasa información meteorológica disponible en la zona de fiordos y canales de la X y XI Región, surge la necesidad de levantar una red de monitoreo atmosférico, que integre estaciones meteorológicas de IFOP, Armada de Chile, Universidad de Los lagos (ULA) y COPAS Sur-Austral (UdeC), implementadas con sensores de viento, radiación solar, precipitación, presión atmosférica, temperatura y humedad relativa, principalmente.

Este sistema considera 11 estaciones meteorológicas, 2 de las cuales pertenecen a la Armada de Chile, 1 al COPAS, 1 a la ULA y las 7 restantes a IFOP (**Figura 19).** Idealmente, es necesario una cobertura mayor de estos instrumentos, ya que las abruptas irregularidades del terreno dan paso a una alta variabilidad atmosférica en el espacio, sin embargo, de momento no están los recursos económicos para adquirir más equipos. Por lo tanto, esta densidad se torna crucial, ya que con un número menor resulta muy complejo resolver esta variabilidad horizontal.

Se establecieron 3 transectas zonales compuestas por 3 estaciones y una por 2 estaciones, las cuales buscan representar condiciones oceánicas, de mar interior y precordilleranas, que describan patrones locales como el efecto de la orografía en la precipitación o la circulación del viento, entre otras.

Este monitoreo nos dará a conocer en tiempo real las condiciones atmosféricas, pudiendo decidir ante operaciones marítimas en función de estas variables, además nos entregará valiosa información que nos permitirá analizar y describir procesos predominantes, en distintas escalas temporales (sujeto al periodo de registro de datos), logrando aumentar el conocimiento científico en torno a las ciencias atmosféricas y su interacción con el océano dentro de esta región.

Sumado a esto, también se podrá evaluar, calibrar y validar el sistema de pronóstico ejecutado con el modelo WRF, el cual se acoplará a MOSA como forzante atmosférico de alta resolución. De esta manera se podrá cuantificar el error, mediante análisis estadístico, del modelo con respecto a lo observado, identificando los puntos débiles y luego ajustando, mediante pruebas de sensibilidad, los

distintos parámetros físicos para alcanzar resultados más precisos que apunten al nivel internacional de los grandes sistemas de pronósticos globales que operan en la actualidad.

La asimilación de datos es otra aplicación que se pretende abordar y que instituciones destacadas a nivel mundial como el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos utilizan a diario en su sistema de pronóstico global GFS, así también el Centro Europeo de Pronósticos Atmosféricos de Mediana Escala (ECMWF por sus siglas en inglés), uno de los más grandes de su tipo en Europa. Este procedimiento consiste en integra datos de redes observacionales interconectadas a nivel mundial, dentro de la grilla de los sistemas de pronóstico, utilizando el principio de problema inverso, el cual a través de observaciones busca reconstruir las condiciones iniciales que dan paso a estas, mejorando sustancialmente los valores pronosticados.

La implementación de este mecanismo es factible mediante la comunicación entre las estaciones y los modelo de predicción meteorológica, por medio del módulo de asimilación de datos desarrollado para WRF (WRF-DA), el cual trabaja con la técnica 3D-VAR, permitiéndonos desarrollar asimilación en frío, la cual perturba las condiciones de contorno de modo de ganar una variabilidad observada con mediciones reales, para así mejorar el pronóstico en consecuencia, o bien, una asimilación en caliente la cual, con los datos observados, recrea la matriz de fondo, mejorando así el pronóstico como tal.

Dentro de este marco, en el mes de Agosto del presente año se instalaron 3 estaciones meteorológicas, la primera montada sobre una torre en el pueblo de Cucao **(Figura 20)**, la segunda en la capitanía de puerto de Melinka **(Figura 21)** y la última en una escuela de la localidad rural de Apiao, todas dotadas de sensores nombrados anteriormente, los cuales transmiten la información mediante tecnología GSM y actualmente disponibles en el sitio web www.chonos.org (antes iproach.cl) **(Figura 22).**

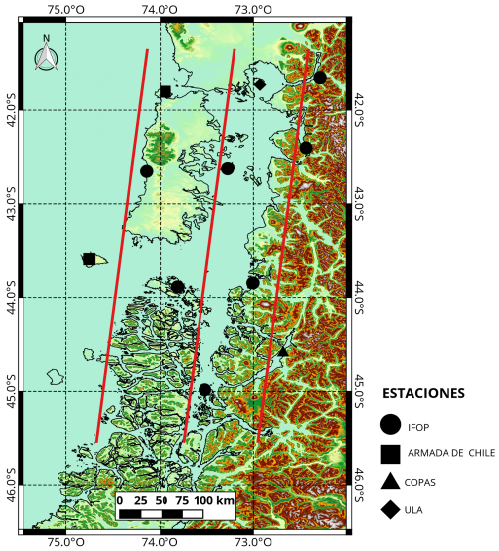

Figura 19. Mapa con futura red de estaciones meteorológicas para la X y XI Región. Los círculos corresponden a estaciones IFOP, los cuadrados a Armada de Chile, rombo ULA y triángulo COPAS.

Figura 20. Estación meteorológica instalada sobre torre de agua en terreno particular de Cucao (42.601ºS, 74.123ºW), compuesta por sensor de intensidad del viento, dirección del viento, radiación solar, luz PAR, precipitación, temperatura y humedad relativa.

Figura 21. Estación meteorológica instalada en el borde costero dentro de terreno de la Armada de Chile (43.897ºS, 73.749ºW), compuesta por sensor de intensidad del viento, dirección del viento, radiación solar, luz PAR, precipitación, temperatura y humedad relativa.

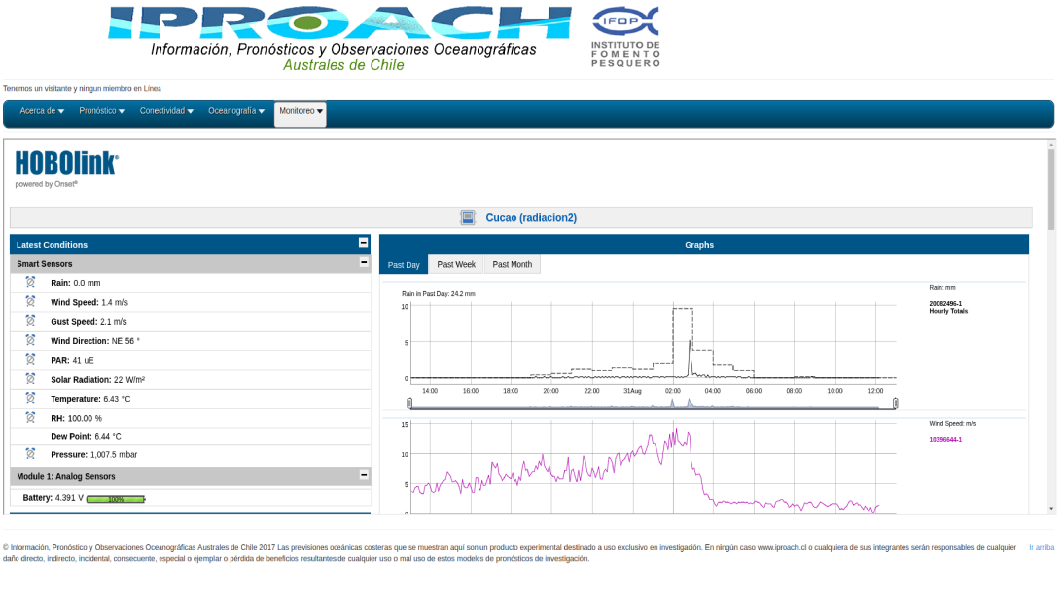

Figura 22. Captura de pantalla de sitio web www.iproach.cl con monitoreo en tiempo real. La imagen muestra estación de Cucao con serie de tiempo de precipitación y magnitud del viento.

5.2 Objetivo Nº2: *Evaluar el modelo pre-operacional con información en terreno histórico y/o en tiempo real.*

De acuerdo con Murphy (1993), los modelos tienen que cumplir al menos 3 rasgos, consistencia, calidad y valor, siendo el primero y el último, atributos cualitativos de un pronóstico, mientras que la calidad está asociada a los valores estadísticos que cuantifican el error asociado a la simulación.

Los resultados de MOSA son evaluados desde 2 perspectivas diferentes basadas en la información disponible, una desde un punto de vista cualitativo donde se examina la **consistencia** y **valor** del modelo, y otra de una manera cuantitativa, a través de la **precisión** de los resultados obtenidos. Cabe decir que para estimar la precisión del modelo es necesario contar con un set de datos que coincidan en el tiempo y el espacio con el modelo, idealmente datos en línea que permitan visualizar el error del modelo en tiempo real. Sin embargo, se pueden usar datos históricos para evaluar estructuras climáticas que representen procesos que debieran estar presentes en las simulaciones.

En nuestro caso, nos interesa que el pronóstico sea capaz de reproducir los procesos de gran escala presentes en la zona, estos son: una circulación de gran escala conducida por la densidad en bajas frecuencias, la influencia del viento en capas superficiales que en ciertos casos puede modificar la estructura vertical del campo hidrodinámico en escalas sinópticas, y la correcta propagación de los fenómenos oscilatorios armónicos que son reconocidos como forzantes de la circulación en zonas donde la configuración batimétrica y topográfica permiten la resonancia de marea, concentrando la energía en regiones acotadas y permitiendo de paso el desarrollo de constituyentes de aguas someras. Los dos primeros procesos mencionados presentan una fuerte estacionalidad en la zona, la cual, es modulada fuertemente por la migración norte-sur del sistema atmosférico de alta presión del Pacífico Sur, impactando en los patrones de circulación atmosférica y la pluviosidad. Por su parte, la radiación solar también se asoma como un forzante indirecto, ya que puede ser capaz de provocar deshielos masivos que al transportar grandes volúmenes de agua dulce a las zonas estuarinas, modifica dramáticamente la especificación del sistema.

En la evaluación del modelo se analizarán 4 aspectos, la conservación de volumen y energía del sistema, el nivel del mar, el campo superficial de temperatura (TSM) y el campo de masa.

5.2.1 Energía, Masa y Volumen.

Se consideró datos horarios del primer día pronosticado por MOSA durante 6 meses entre julio 2016 y diciembre 2016, esto para evaluar la conservación de volumen y la energía cinética. Recordar que uno de los supuestos de la ecuación de Navier Stokes – expresión que describe el movimiento de una partícula en el océano–, es su condición de conservación de momentum y de masa, por lo que se vuelve relevante comprobar la capacidad de conservación del modelo para que las ecuaciones tengan validez. Notar que además de la advección en los bordes, al modelo se le ingresan considerables volúmenes de agua por paso de tiempo a través de las descargas de ríos, pluviosidad y deshielo en zonas glaciares.

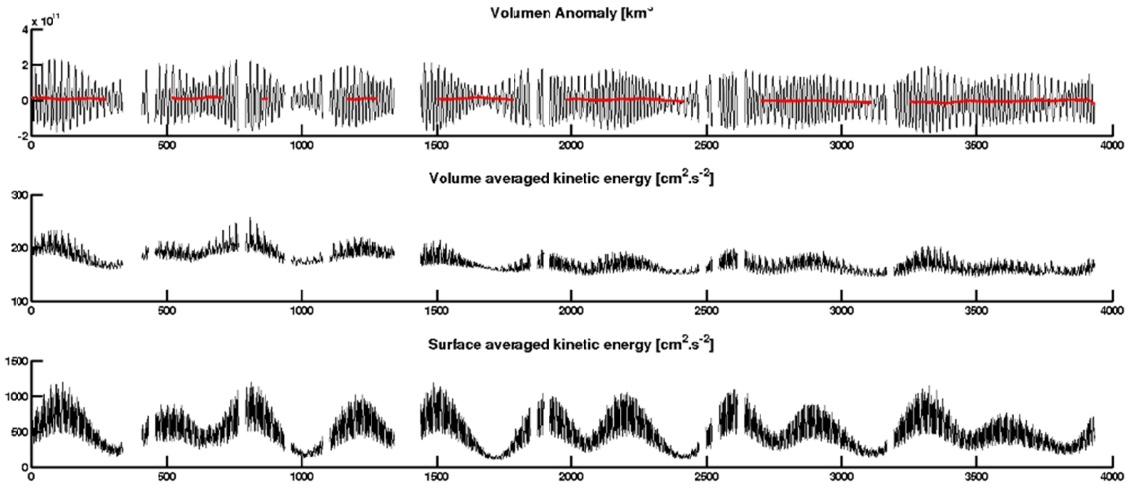

Figura 23. Diagnóstico del primer día pronosticado durante 6 meses en MOSA (julio 2016.julio2017), arriba, anomalía de volumen en todo el dominio en km^3, en centro energía cinética promedio de volumen en cm^2 s^{-2}, y abajo la energía cinética promedio superficial en cm^2 s^{-2}.

Al calcular la anomalía de volumen total del campo analizado podemos observar que tiende a ser conservativo, el cual oscila alrededor de los 2x10^{11} Km^3 **(Figura 23)**. En línea roja se presenta una serie filtrada con un coseno Lanczos con poder medio de 60 horas, para poder remover las constituyentes armónicas de marea. El residual de esta serie es positivo, un número un tanto despreciable con respecto a la anomalía de volumen, el cual correspondería a principalmente

ingresos de agua no relaciones con transportes advectivos. En la misma figura podemos observar la energía cinética de volumen promedio y superficial. En ella se exhiben máximos periódicos asociados fases de sicigia (máxima amplitud de marea), donde resaltan los mayores valores en la energía cinética de superficie. Esto debido a que los mayores flujos se encuentran en los niveles superiores del océano.

5.2.2 Nivel del Mar

Debido a que el actual dominio (MOSAv2) ha sido levemente modificado en el transcurso del proyecto, es que se hace necesario evaluar el nivel del mar. Para ellos usaremos los mismos puntos utilizados en la etapa 2, estos son Puerto Montt, Ancud, Castro, Melinka y Puerto Chacabuco, los cuales cuentan con datos en línea operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) y publicados en *www.ioc-sealevelmonitoring.org.*

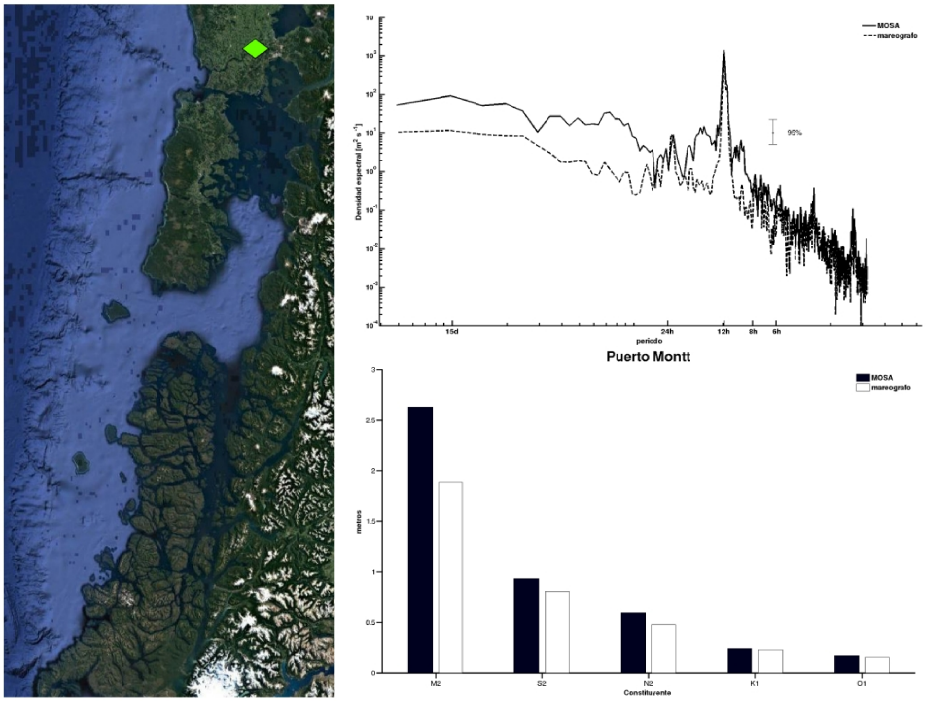

Figura 24. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Puerto Montt, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo.

Puerto Montt: Aquí se encuentra la mayor amplitud de marea observada, con un rango máximo mayor a 8 metros en sicigia. Las constituyentes principales son la M2 y la S2, con amplitudes de 1.8 y 1.3 m respectivamente, con un PE de 72 % y 20% respectivamente. Estos rasgos logran ser replicados por el modelo, donde también entre M2 y S2 componen casi el 90% de la energía, sin embargo, la amplitud de estas es sobrestimada por el modelo en unos 50 cm en M2 y 10 cm para S2. Este error se acentúa en la cuadratura **(Figura 24**). Los espectros de las series muestran un alto ajuste en la distribución de energía en torno las señales semidiurnas, rasgo relevante en esta zona. También se aprecian un buen ajuste en la señal diaria, aunque entre las 12 y 24 el modelo retiene energía, el ajuste es correcto, destacando la señal semidiurna como la más importante de la serie. Cálculos de Energía Potencial (PE) de las constituyentes del modelo y del mareógrafo son mostradas en al **Tabla 1**.

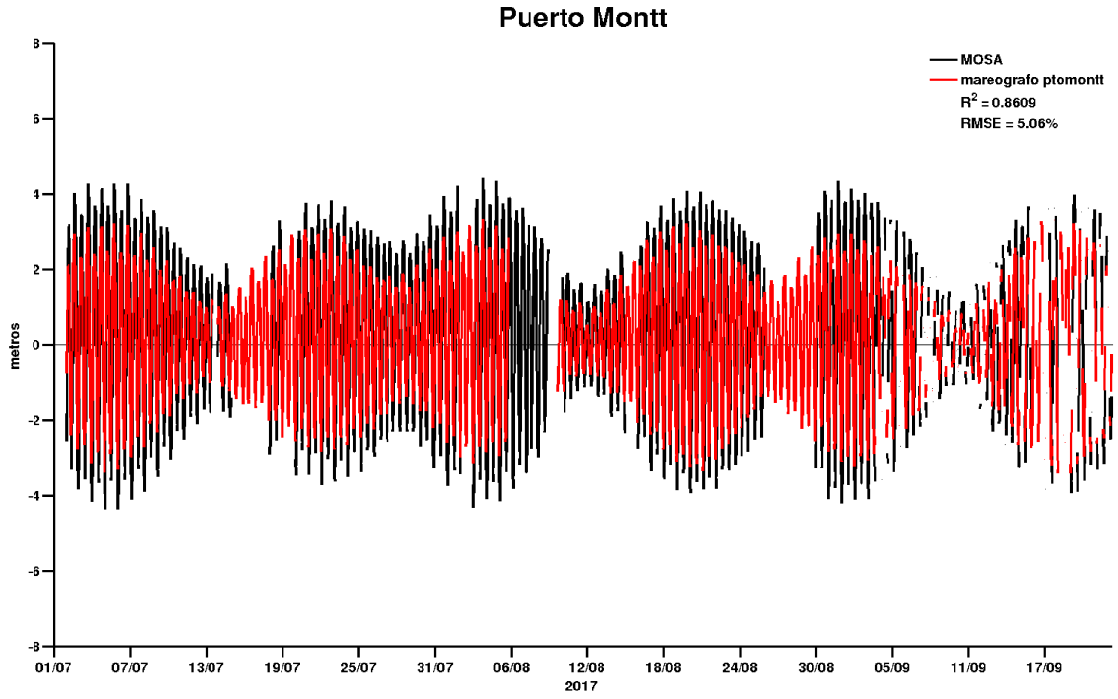

Figura 25. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Puerto Montt entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo).

En la **Figura 25** se presentan las series de nivel del mar observado y simulado, observándose un alto grado de ajuste entre las fases de las dos series. En los estadísticos obtenidos destaca una correlación del 88.9% entre ambas series, con un el error cuadrático medio es de 5,06% (**Tabla 1).**

La figura sugiere que MOSA propaga la marea en fase con lo observado aunque con un error en la magnitud que se acentúa en periodos de cuadratura. Estos desajustes podrían ser resueltos con un modelo de elevación digital más realista. En este periodo se prueba un nuevo dominio (MOSAv3) que posee una batimetría más cercana a la real donde se esperaría disminuir el error asociado a la señal de nivel de mal. Cálculos de Energía Potencial (PE) de las constituyentes del modelo y del mareógrafo son mostradas en al **Tabla 1**.

Tabla 1. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Puerto Montt.

Puerto Montt	R2 = 0,88 RMSE = 5,09%	
% Energía Potencial		
Constituyente	mareógrafo	MOSA
M2	78,649	83,687
S2	14,303	10,502
N2	5,019	4,295
K1	1,118	0,707
O1	0,523	0,348

Ancud: Se ubica en una zona un tanto más expuesta hacia el océano abierto, por lo que no se ve afectada por efectos resonantes de la marea como si se puede observar en zonas interiores del mar de Chiloé, es por ello que presenta una menor amplitud de marea. En la **Figura 26** podemos observar que la mayor amplitud de marea observada fue un poco más de 2 metros en sicigia, mientras que entre las constituyentes M2 y S2 alcanzan 0.65 y 0.3 m de amplitud respectivamente. Aun así, se observa que la M2 es también la constituyente principal de la zona. En este caso, notamos que MOSA subestima las amplitudes de las principales constituyentes. Los espectros de ambas series, muestran que en la señal diurna y semidiurna el modelo reproduce con gran precisión la distribución de energía, aunque tiende a sobrestimar los máximos en altas frecuencias, notar que logra resolver máximos relativos cercanos a las 8 y 9 horas.

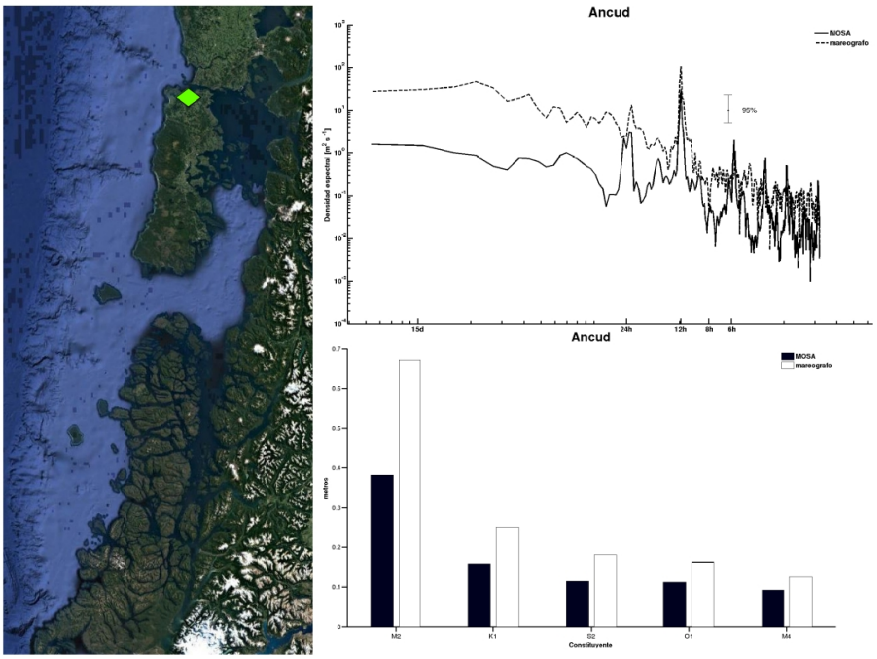

Figura 26. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Ancud, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo.

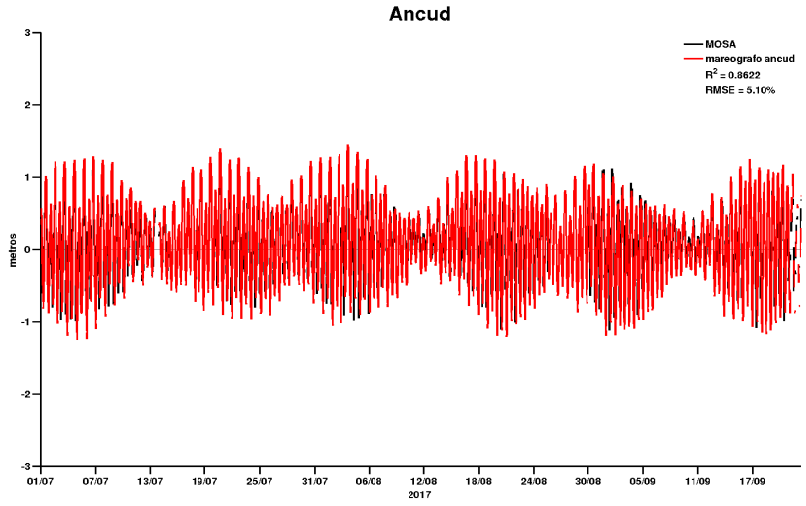

Figura 27. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Ancud entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo).

Las series del nivel del mar observado y simulado se muestran en la **Figura 27,** donde se observa un buen ajuste de las fases entre ambas, presentándose en fase con lo observado. Sin embargo, la serie simulada tiende a subestimar la amplitud. La correlación entre la señal observada y la pronosticada es de 0.86, con un RMSE del 5%. En el informe anterior se menciona la presencia de un ruido de alta frecuencia en la señal simulada. Aquella simulación tenía un paso de tiempo de 60 segundos, en este nuevo modelo se usa un paso de integración temporal de 45 segundos, el cual, entre otras cosas logra eliminar las fluctuaciones de alta frecuencia del nivel del mar presentes en esta zona. Cálculos de Energía Potencial (PE) de las constituyentes del modelo y del mareógrafo son mostradas en al **Tabla 2**.

Tabla 2, Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Ancud.

Ancud	R2 = 0.8622 RMSE = 5.10%	
% Energía Potencial		
Constituyente	mareógrafo	MOSA
M2	76,041	63,133
S2	10,542	10,852
N2	5,464	5,657
K1	4,477	5,446
O1	2,673	3,691

Castro: La configuración batimétrica y topográfica de Castro permite el desarrollo de efectos resonantes de la marea, dando lugar a mayores amplitudes con una fuerte señal semidiurna. Los datos del mareógrafo indican una amplitud de 5 metros en sicigia, mientras que las constituyentes M2 y S2 alcanzan amplitudes de 1.6 y 0.7 m respectivamente (ver Figura 27), con un PE cada una de 73.16 y 19.22 % respectivamente **(Tabla 3).** Con respecto a lo simulado, la M2 pronosticada tiene una amplitud de 2.3 metros con un PE 82.23%, siendo mayor que la observada, mientras que S2 presenta valores levemente subestimados de amplitud (0.88) y PE (13.3%). Los espectros de ambas series presentan su máximo absoluto en la semidiurna, sin embargo, en altas frecuencias el modelo tiende a desarrollar máximos relativos, que en los datos observados no se logran apreciar. Esta discordancia se presenta de manera similar a lo observado en Puerto Montt, donde el modelo también desarrollaba máximos relativos en altas frecuencias. Notar que estos dos puntos se encuentran en zonas más protegidas de la influencia del océano abierto que los puntos de Ancud y Melinka. Aun así se exhibe un alto grado de ajuste en la señal semidiurna y diurna.

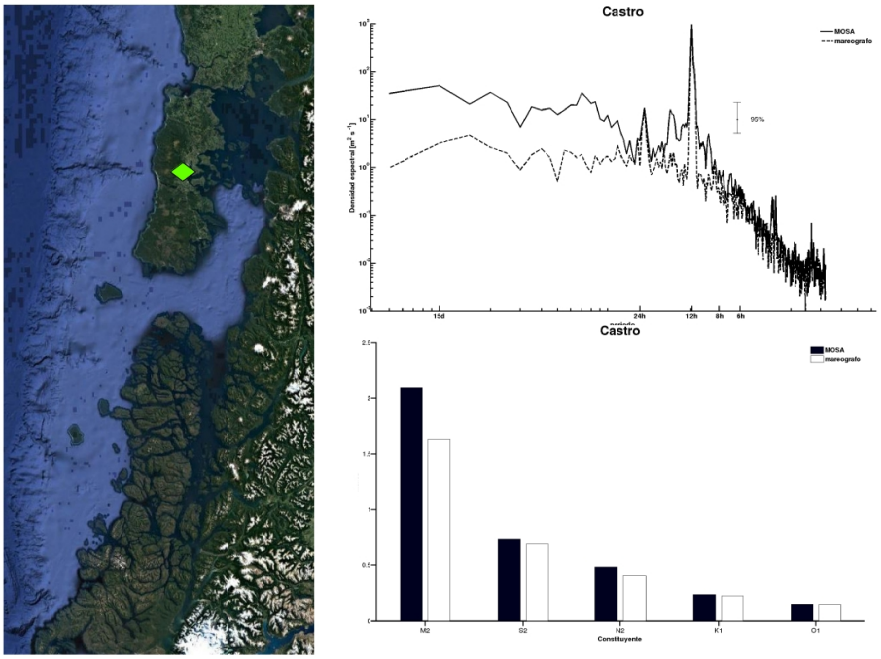

Figura 27. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Castro, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo.

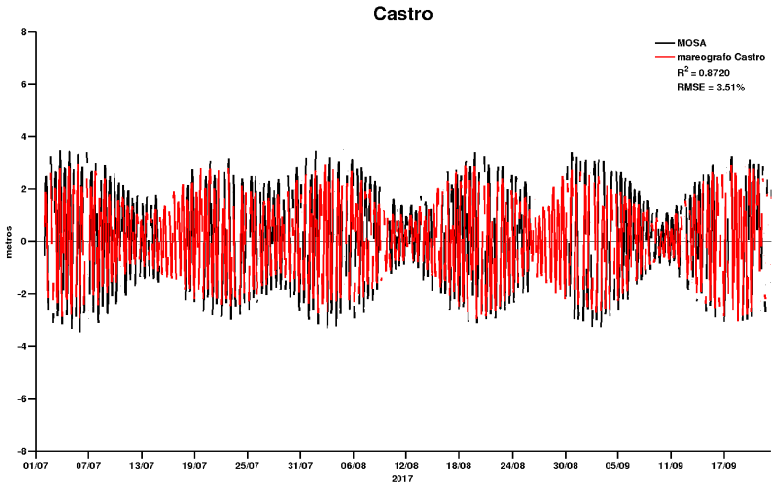

Figura 28. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Castro entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo).

Las series observadas y pronosticadas en la **Figura 28**, presentan un buen ajuste, alcanzando un 0.87 de correlación con un error cuadrático medio del 3,51%. Se destaca que en la versión anterior de este dominio el error tendía a aumentar considerablemente en periodos de cuadratura. El uso de un paso de tiempo más pequeño y la modificación de la batimetría en ciertos puntos logra que el error se mantenga pequeño y constante. Esto demuestra el rol de carácter principal que tiene la batimetría en la zona de estudio.

Tabla 3. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Castro.

Castro	,872 RMSE = 3.51%	
% Energía Potencial		
Constituyente	mareógrafo	MOSA
M2	78,607	83,352
S2	14,033	10,229
N2	4,838	4,447
K1	1,452	1,057
O1	0,63	0,411

Melinka: El mareógrafo instalado en Melinka se encuentra al norte del archipiélago de las Guaitecas, en una zona donde convergen el canal Moraleda, la Boca del Guafo y el mar interior de Chiloé. Esto resulta en una marea de menor amplitud con respecto a las observadas en las zonas del mar interior. En Melinka la amplitud de marea observada en sicigia fue de 2 metros. Las constituyentes M2 y S2 tuvieron una amplitud 0.78 y 0.35 m respectivamente (ver **Figura 29**), cuyos PE fueron de 72.9 y 15.6 % respectivamente (ver **Tabla 4**). En los espectros de energía de ambas series se observa que el modelo sobrestima la energía en la zona en todas las bandas, sin embargo, se ajusta de manera suficiente a los máximos observados, especialmente el semidiurna y el diurno, aunque desarrolla máximos en altas frecuencias que no son observados en el mareógrafo.

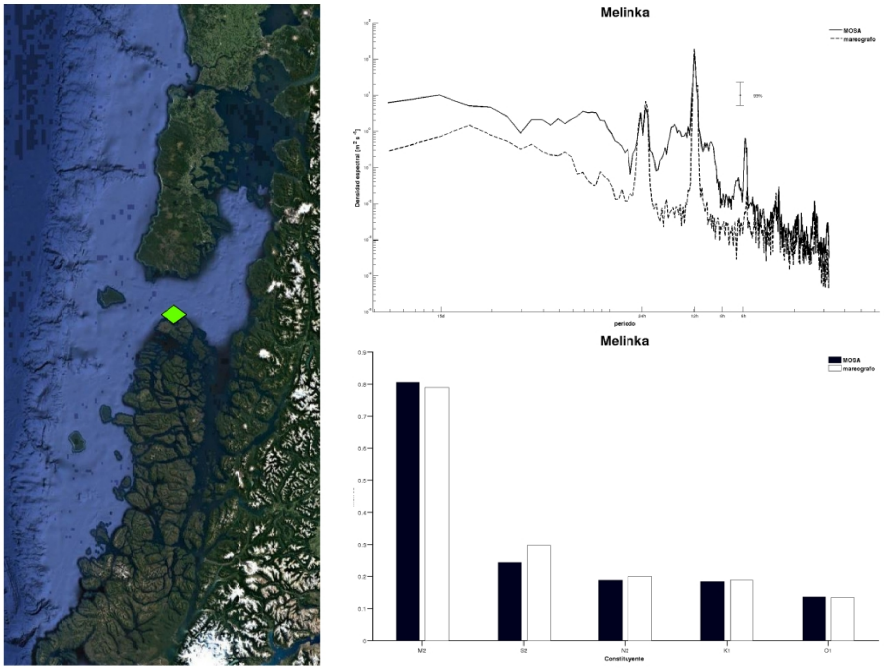

Figura 29. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo de Melinka, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo.

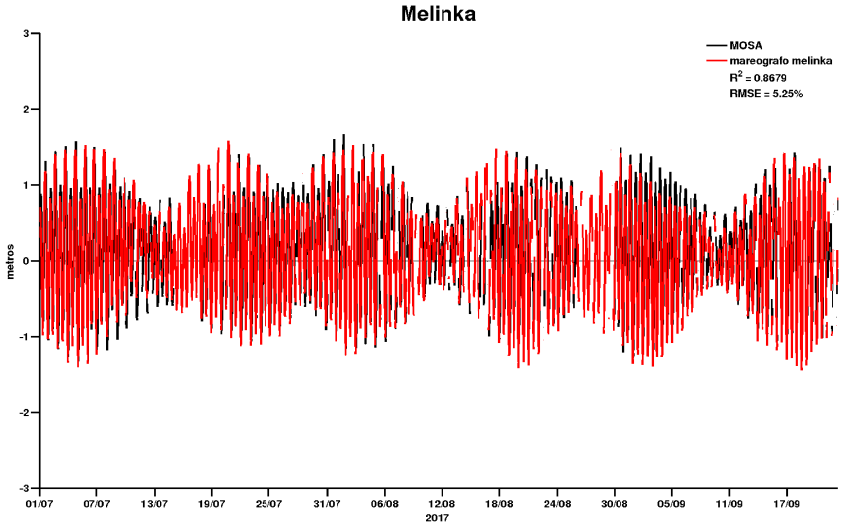

Figura 30. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Melinka entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo).

Por su parte las series del nivel del mar observadas y pronosticadas presentaron un 0.86 de correlación y un RMSE del 5,20% (**Figura 30**). Esto indica que el ajuste en general es aceptable, ya que entre las componentes M2 y S2 se encuentra el 90 % de la variabilidad, las cuales son correctamente representadas por el modelo. Con respecto a los máximos de alta frecuencia que se observan en el modelo, se intentará corregirlas con un nuevo dominio que posea una batimetría mejorada, entregando una representación más fiel del fondo marino en la zona y que contribuya a corregir el error den la propagación de altas frecuencias.

Tabla 4. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Melinka.

Melinka	R2=0.86 RMSE = 5.25&	
% Energía Potencial		
Constituyente	mareógrafo	MOSA
M2	77,033	80,546
S2	10,92	7,354
N2	4,946	4,431
K1	4,391	4,229
O1	2,198	2,3

Puerto Chacabuco: La zona de Puerto Chacabuco corresponde a la cabeza del fiordo Aysén, una zona alejada del mar abierto que posee una configuración batimétrica y topográfica bastante complicada, dando como resultado patrones complejos en la propagación de ondas. La **Figura 31** muestra los espectros de energía de la serie observada y modelada. En general, MOSA sobrestima la energía en todas las frecuencias observadas y desarrollando un máximo de alta frecuencia que no está presenta en los datos observados, aun así, mantiene ajuste para las frecuencias principales, esto es, en la semidiurna y diurna. Los datos del mareógrafo entregan una amplitud de marea de 80cm y 37 cm para las componentes M2 y S2 respectivamente. Muy por debajo de lo simulado por MOSA, donde llega a pronosticar 1,4m de M2.

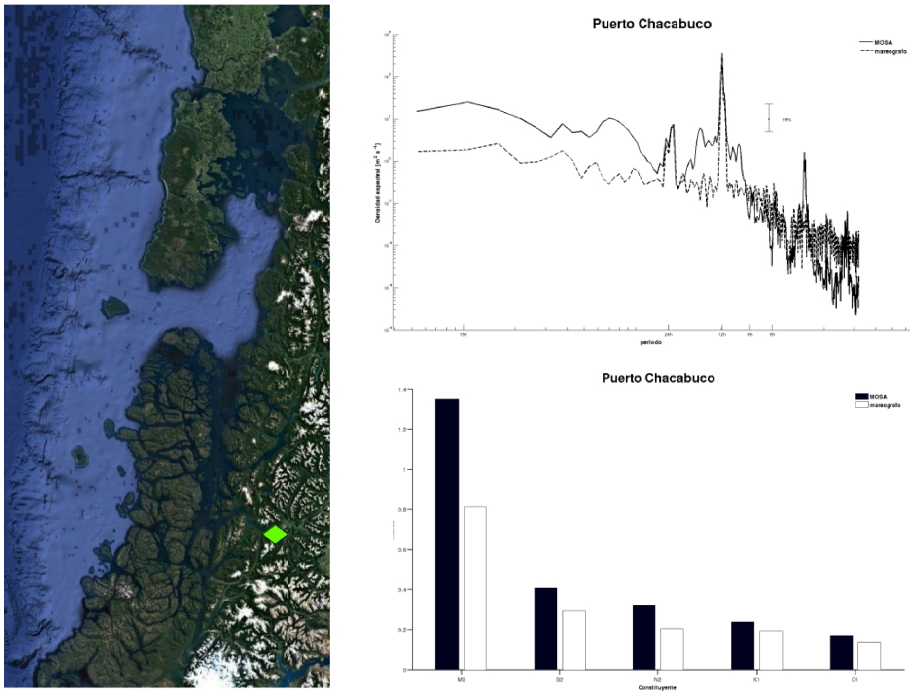

Figura 31. (Izquierda) Ubicación de mareógrafo en Puerto Chacabuco, (Arriba derecha) espectros de energía para datos de mareógrafo y MOSA, (abajo derecha) amplitud de principales constituyentes armónicas semidiurnas y diurnas para datos de MOSA y de mareógrafo.

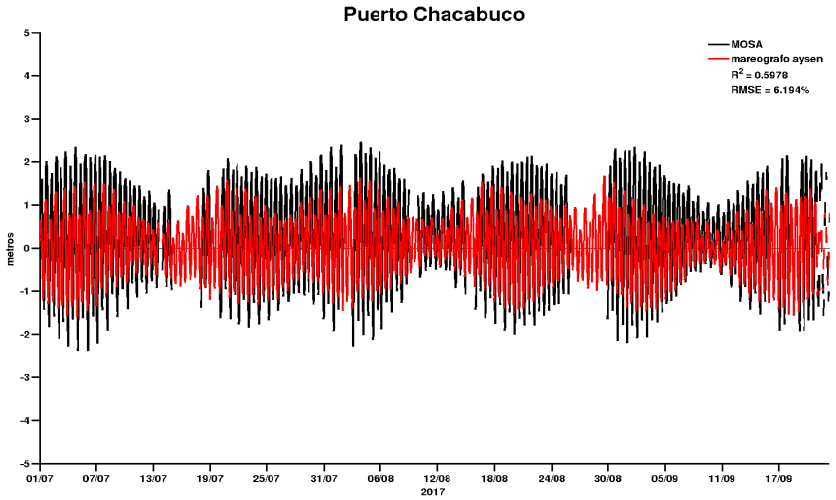

Figura 32. Series de tiempo horarias del nivel del mar en Puerto Chacabuco entre julio y septiembre de 2016 para MOSA (negro) y mareógrafo (rojo).

Al observar las series pronosticadas y observadas es notorio que el modelo sobrestima la amplitud en todo el periodo. Este error aumenta considerablemente en sicigia, llegando a 1 metro. También se observa un desajuste en las fases, lo que se traduce en una correlación de 0,59, la más baja de las evaluadas, y un RMSE del 6,19%(Figura 32). El alto grado de desajuste se debería principalmente al modelo de elevación digital utilizado para el fiordo Aysén, el cual, en el inicio de las simulaciones presenta numerosas inestabilidades, por lo que se terminó modificando considerablemente la batimetría, resultando en un fondo plano y regular, lo que disminuye la disipación de energía interrumpiendo el traspaso de energía de altas a bajas frecuencias. Se espera corregir esto en un nuevo dominio.

Tabla 5. Valores estadísticos de R2, RMSE y cálculo de Energía Potencial (PE) entre las series del nivel del mar de MOSA y mareógrafo de Puerto Chacabuco.

Puerto Chacabuco	R2 = 0,587	RMSE = 6.19%
% Energía Potencial		
Constituyente	mareógrafo	MOSA
M2	77,701	82,538
S2	10,241	7,585
N2	4,935	4,669
K1	4,339	2,602
O1	2,163	1,312

5.2.3 Campo de Masa

La distribución del campo de masa es un indicador de la circulación a gran escala, la cual está forzada por la densidad, que posee una fuerte componente local en la zona de estudio impactada por los aportes de agua dulce de origen continental (ríos y glaciales), la pluviosidad y la advección. Esta condición está marcada por una fuerte estacionalidad, lo cual, sumado a la configuración topográfica y batimétrica de la zona, da como resultado patrones de circulación complejos e irregulares. Uno de los mayores desafíos de los modelos hidrodinámicos en esta zona es justamente poder describir la estratificación de manera adecuada.

Es por lo mismo que se hace necesario consignar que la evaluación de un modelo recién en desarrollo no debe basarse solamente en elementos cuantitativos, ya que los valores estadísticos tienden a concentrar la mirada en la búsqueda de números y no procesos. Sin embargo, si son útiles para diagnosticar las falencias del modelo y estimar la magnitud del error.

Para evaluar el desempeño del campo de masa en MOSA se utilizaron datos satelitales de MODIS para la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y lances de CTD de campañas de IFOP durante el año 2016 y 2017.

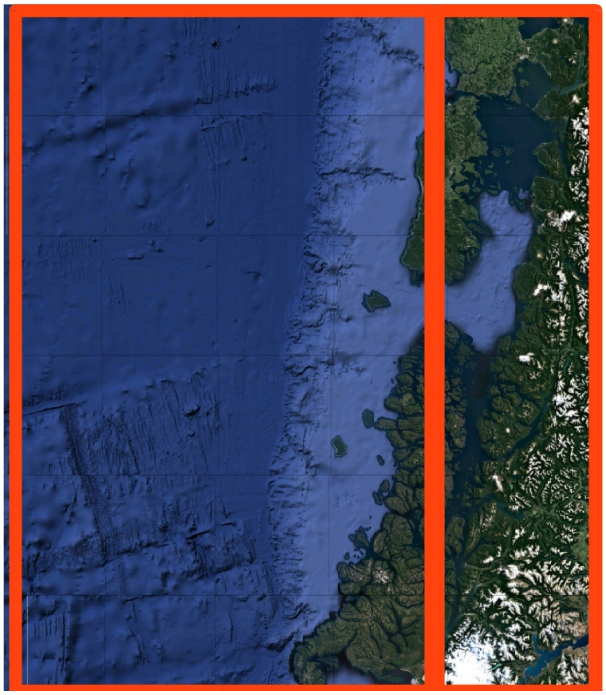

Figura 33. Separación del dominio de MOSA en una zona oceánica y otra costera para evaluar la temperatura superficial del mar de los pronósticos con datos MODIS.

Temperatura superficial del mar

Se evaluó la temperatura superficial del mar usando promedios semanales (weekly 8-days) de datos satelitales de MODIS con una resolución espacial de 4 km en la zona del dominio de MOSA, para un periodo comprendido entre julio y diciembre de 2016. En general, se logró observar que MOSA reproduce los grandes procesos estacionales involucrados con la variabilidad de TSM. Se calculó TSM promedio de todo el dominio junto al promedio obtenido de imágenes satelitales MODIS para un periodo entre julio y diciembre de 2016 (**Figura 33**). También se separó el dominio en 2 regiones, una "costera" concentrada en la zona del mar interior de las regiones de Los Lagos y de Aysén. Esta zona es la más compleja de simular, ya que posee una dinámica gobernada principalmente por procesos de carácter local, aunque influenciada por forzantes remotos atmosféricos y

oceanográficos. La otra región seria la parte "oceánica" del dominio, que representa la parte menos compleja de simular, debido a que los procesos oceánicos son de carácter remoto y globales, además son en general, bien resueltos por ROMS y por los forzantes utilizados -MERCATOR y GFS/WRF- **(Figura 34).**

Las series de promedios de TSM para MOSA y MODIS para todo el dominio, la zona costera y oceánica se presentan en la **Figura 34**. Podemos notar que existe un desajuste ente ambas series, para los 3 casos presentados, donde MOSA sobrestima TSM en a lo menos 1°C, sin embargo, se destaca que las señales estacionales se encuentran presentes, estando presente el máximo de fines de octubre y en los máximos de inicio de verano. El mayor desajuste se observa en la zona costera en pleno invierno, aunque esto nos siguiere revisar los flujos de calor en el forzante, también hay que mencionar que el año 2016 es considerado un año "anómalo" con respecto a la pluviosidad y la temperatura. Esto refuerza la idea de revisar el campo usado como condición inicial, el cual, contiene información de periodos anteriores con conductas de "año normal".

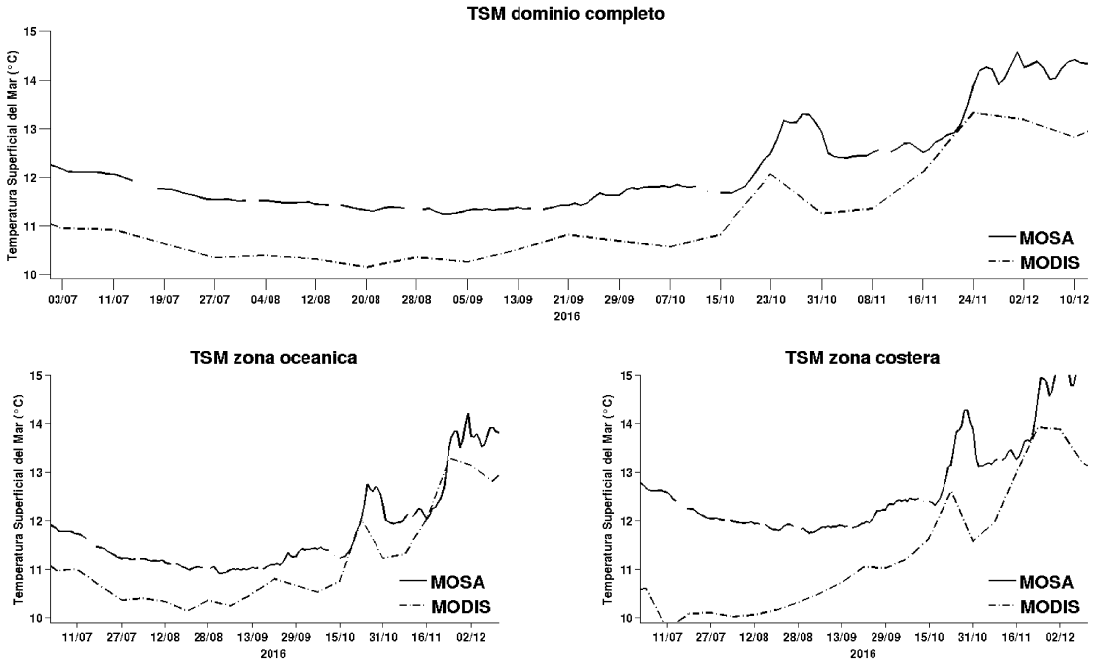

Figura 34. Series de tiempo de pro medios de la temperatura superficial mar (TSM) para MOSA y datos satelitales de MODIS, promedios semanales con una resolución espacial de 4 km. Arriba, todo el dominio, abajo-izquierda región oceánica del dominio, y abajo-derecha, región costera del dominio.

A través del análisis de las series de tiempo podemos identificar cómo evoluciona la variabilidad de la TSM en el modelo, sin embargo, esta variabilidad está asociada a procesos de mayor escala que podrían estar ocultos en las series. Para observar si estos procesos están presentes, podemos usar las funciones ortogonales empíricas (EOF) o también llamadas componentes principales, donde se descompone la señal en n-modos de oscilación de acuerdo a su varianza. Este análisis se realiza para la variabilidad espacial y temporal.

Se calcularon los 4 primeros modos de variabilidad de todo el dominio de MOSA y para datos de TSM MODIS, en ambos casos el mayor porcentaje de varianza explicada recayó en el primer modo el cual explicaría el 96,1% de varianza en los datos satelitales y un 94,8% en MOSA.

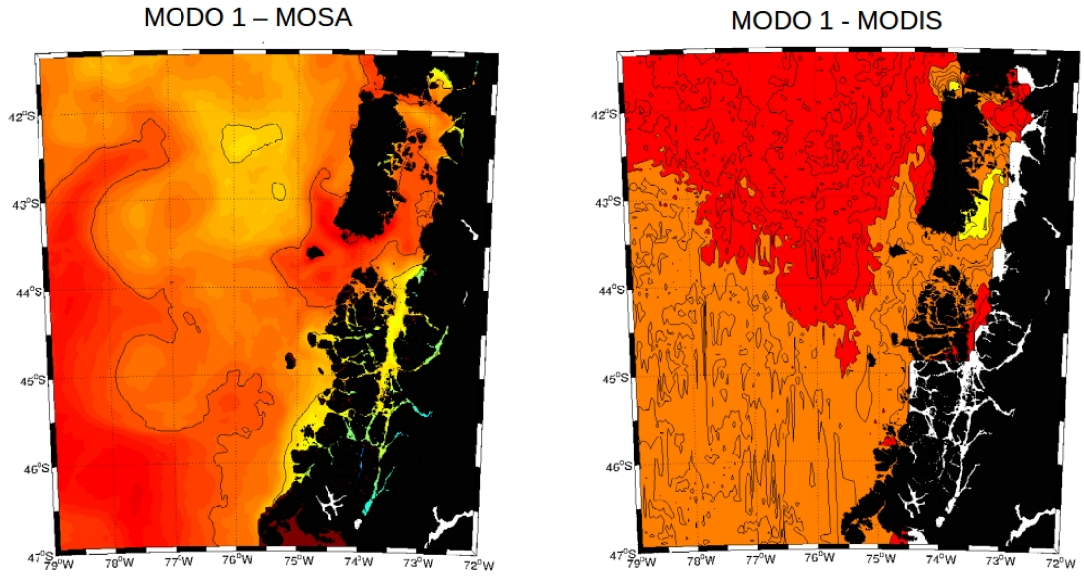

Figura 35. Variabilidad espacial del primer modo de componentes principales de la temperatura superficial del mar de datos de MOSA y de datos satelitales MODIS, con una resolución de 4 km, este modo explica 96,1% de la varianza en MODIS y un 94,8% en MOSA.

En la **Figura 35** podemos observar el modo 1 (o primer componente principal) de TSM calculados para MOSA y MODIS. En ella podemos observar patrones espaciales asociados a la variabilidad de 6 meses de TSM, donde la mayor varianza está concentrada en la zona de migración norte-sur del sistema de Alta Presión del Pacifico Sur. Esta es la zona que presenta una mayor variabilidad de la

temperatura en el periodo estudiado. El patrón se puede observar en ambas figuras, lo que sugiere que MOSA estaría concentrando la mayor varianza de manera razonable.

En la variabilidad temporal se presentan los 4 primeros modos de varianza para ambas casos estudiados. Podemos verificar que el modo 1, el cual explica más del 95% de la varianza en ambos casos, muestra cargas positivas en meses de invierno decayendo a cargas negativas al empezar el verano. Esta conducta está presente en ambas series, esto indica que MOSA genera una respuesta a la estacionalidad de TSM, la cual tiene una fuerte estacionalidad en la zona de estudio.

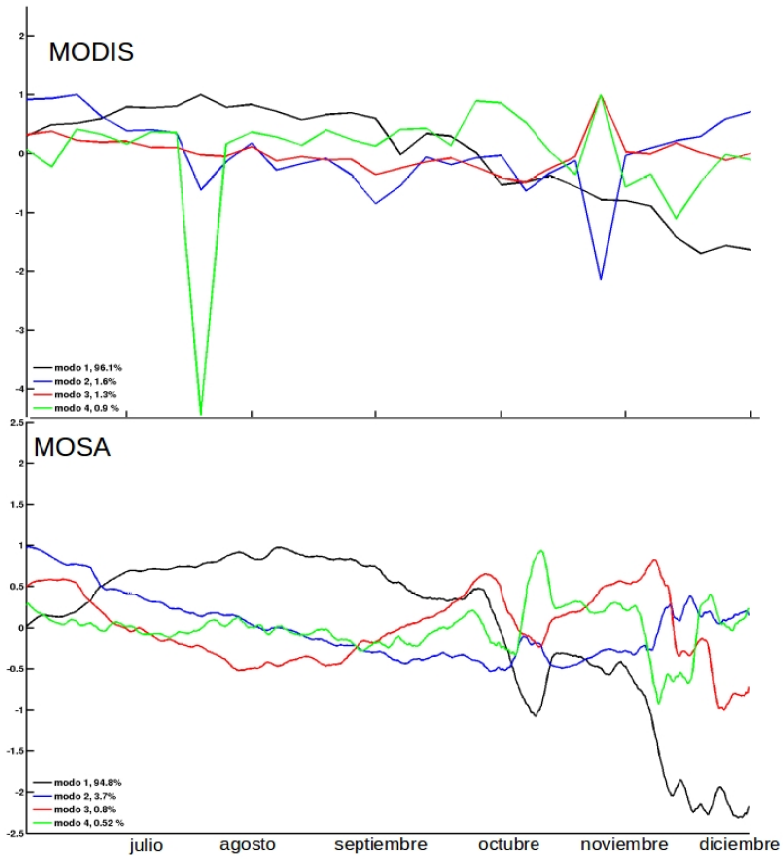

Figura 36. Series de tiempo de los 4 primeros modos EOF en los datos de MODIS y MOSA entre julio y diciembre de 2016.

A través del análisis de EOF hemos encontrado que MOSA efectivamente desarrolla la estacionalidad en la temperatura superficial, logrando transferir desde los bordes hacia el interior los procesos de mayor energía, un aspecto relevante y primordial para continuar con su ajuste y calibración. El desafío mayor es ahora poder lograr que estos mecanismos de transferencia energética interactúen armónicamente con los forzantes locales de la zona interior de Chiloé - Aysén.

Una de las zonas más importantes para el mar interior de Chiloé - Aysén es la Boca del Guafo, lugar por donde se advectan masas de agua de origen remoto, transfiriendo propiedades conservativas que se propagan hacia las zonas costeras con una fuerte estacionalidad. Para analizar dichos procesos se construyeron diagramas de Hovmoller de TSM a lo largo del paralelo 43,28S para los resultados de MOSA y los datos de MODIS (**Figura 37**).

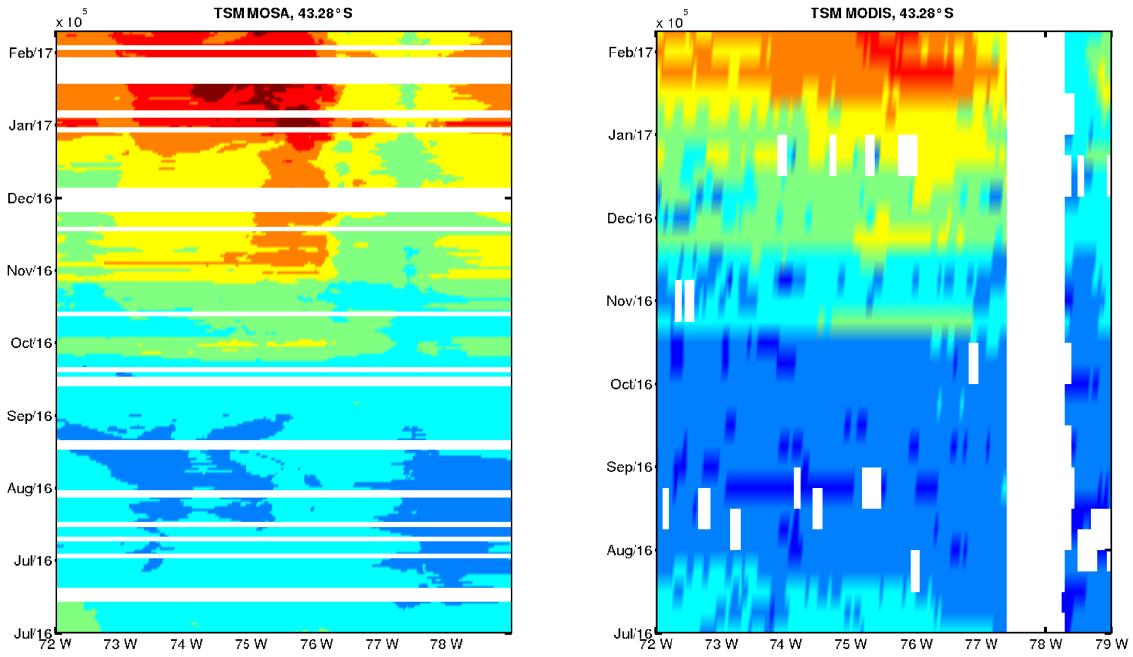

Figura 37. Diagramas de Hovmoller de la temperatura superficial de mar a lo largo del paralelo 43,28S ubicado en la boca del Guafo para datos MOSA y datos MODIS entre julio 2016 y febrero 2017.

En ella podemos observar la variabilidad de TSM entre julio 2016 y febrero 2017, donde logramos verificar el proceso de transición entre periodos fríos y periodos cálidos. La variabilidad exhibida por

MOSA exhibe patrones temporales similares a los observados por datos satelitales. Esta semejanza tiene 2 elementos destacables del modelo: una respuesta temporal acorde al proceso de calentamiento de la superficie del mar observado por el satélite, y una distribución espacial de cuerpos de agua cálidos superficiales coincidente con el observado, lo que nos ayuda a corroborar los que habíamos observado con el análisis de funciones ortogonales empíricas, que MOSA tiene la capacidad de describir un proceso de gran escala como lo es la estacionalidad espacial y temporal en las zonas adyacentes al mar interior de Chiloé-Aysén.

Si bien MOSA representa los procesos de gran escala de la temperatura superficial, aún persiste un sesgo ~ 1°C con observado. Para corregir este error se puede trabajar desde diversos enfoques. Uno de ellos seria construyendo la condición inicial del modelo a partir de datos de CTD, algo que ya se había propuesto pero no se ha logrado implementar todavía, esto porque los volúmenes resultantes no han sido satisfactorios debido a interpolaciones no acordes con la realidad, se seguirá trabajando en ello. Otro enfoque seria modificar la condición inicial obtenida de MERCATOR, a cual ya hemos visto que contiene un error ± 1°C. Esto podría realizarse alterando directamente el campo o sumándole la varianza diaria pronosticada a todo el volumen, lo cual podría contribuir al desarrollo de una condición inicial más ajustada y con un menor error.

El tercer enfoque es trabajar la condición inicial como un problema inverso. Donde se podría mejorar la condición inicial a través de técnicas de interpolación óptima con datos satelitales, a este proceso se le conoce como Asimilación de Datos. Se han efectuado algunas pruebas con un enfoque variacional usando el método 3DVAR, el cual estima la covarianza de todos los puntos contra toda la grilla, y se genera una matriz de pesos que busca alcanzar un valor optimo a través de una expresión numérica (cercano al real). Si bien las ventajas de este proceso son altas, este requiere mayores capacidades humanas, computacionales y acceso a información de calidad en tiempo “casi real” del estado del océano. Es probable que las zonas del mar interior de Chiloé y Aysén no cuenten con un conjunto de datos en tiempo “casi real”. Sin embargo, se espera en un futuro se genere una red de monitoreo asociada al control ambiental y sanitario de las agrupaciones de concesiones de salmoneros que entregue datos oceanográficos en línea en diversos puntos los cuales eventualmente podrían usarse en MOSA.

Como ya hemos observado, MOSA describe la variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar. Considerando que el modelo lleva corriendo de manera estable desde julio de 2016, se pueden extraer algunos resultados relevantes. Por ejemplo la **Figura 38** que presenta los promedios mensuales de TSM entre julio 2016 y junio 2017, donde se aprecia la estacionalidad y transición entre fases cálidas y frías y la intrusión de masas de agua de origen ecuatorial y sub ecuatorial.

También se presenta en la **Figura 39** un diagrama de Hovmoller a través del paralelo 43,28S para todo el año simulado donde también logramos apreciar la variabilidad temporal y espacial del campo térmico superficial.

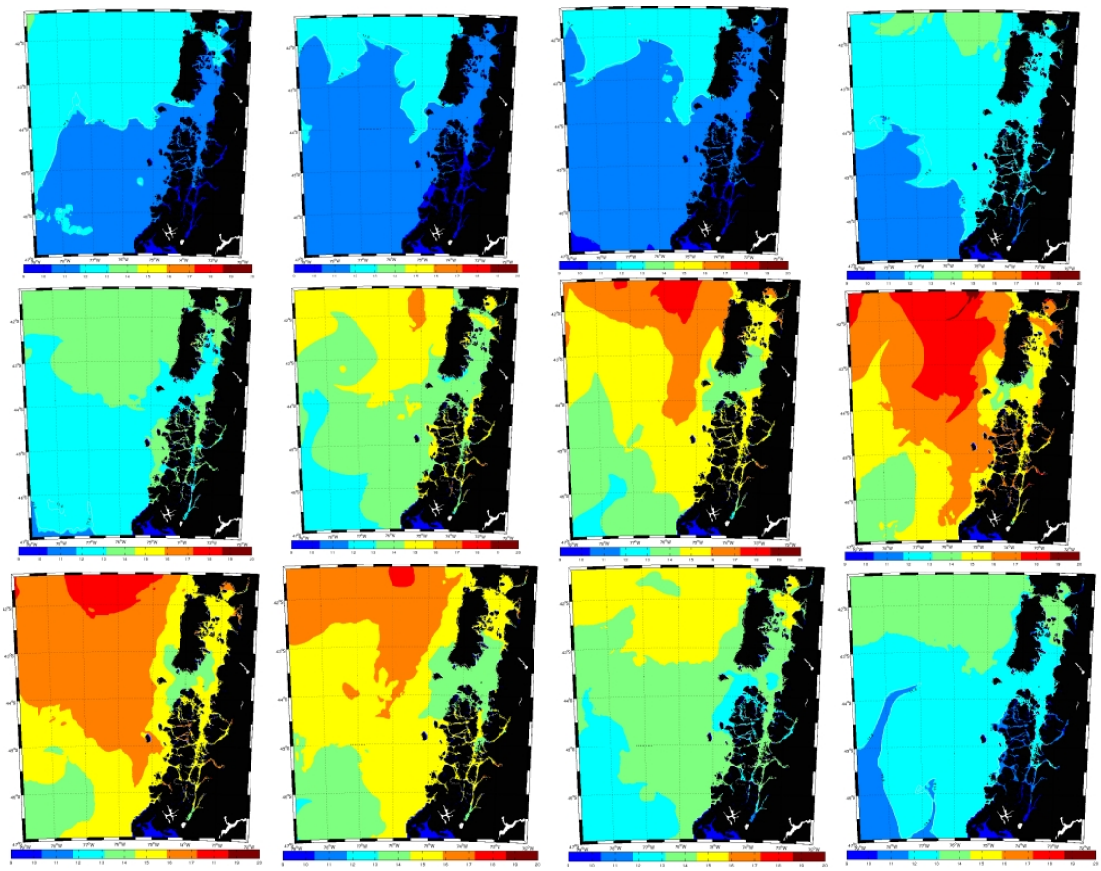

Figura 38. Promedios mensuales de la temperatura superficial del mar pronosticados por MOSA entre julio de 2016 y junio de 2017.

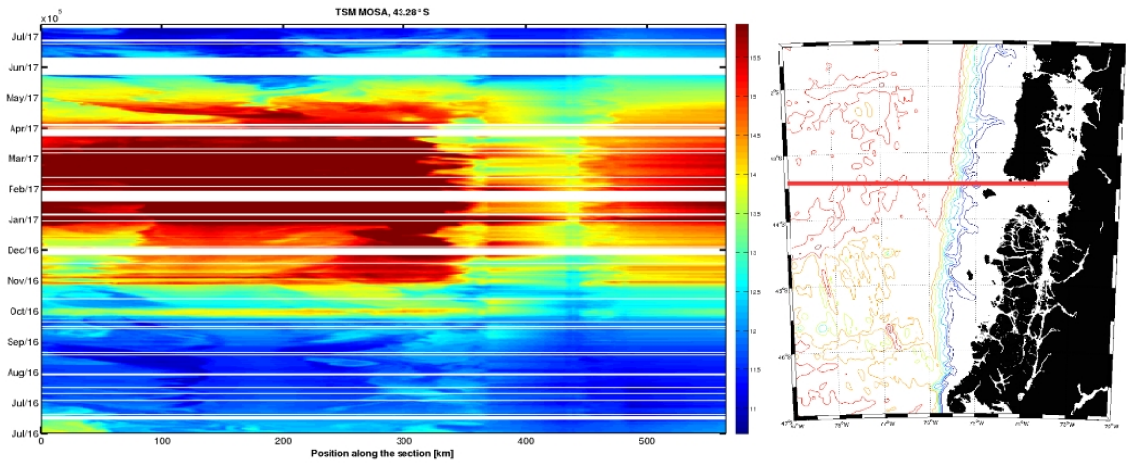

Figura 39. Diagrama de Hovmoller para la temperatura superficial de mar pronosticada por MOSA a lo largo del paralelo 43,28S desde julio 2016 a julio 2017.

5.2.4 Estructura vertical del campo de masa

El área de estudio se caracteriza por ser una región estuarina de gran escala, es decir, una zona donde se conectan aguas de origen continental de baja densidad con aguas de origen oceánico de mayor densidad. La diferencia de densidad entre ellas produce la circulación estuarina, también llamada gravitacional o boyante. Este mecanismo conduce un flujo a través de un gradiente presión que en su camino es perturbado por procesos de mezcla que son forzados por diversos agentes, algunos mecánicos como la marea y el viento y otros advectivos como las ondas internas. Justamente son estos procesos de mezcla el mayor desafío para la modelación, pues responden a una conducta altamente no-lineal, producto de la interacción de múltiples procesos que resultan de la interacción de forzantes locales y remotos.

Para evaluar el desempeño de MOSA en las estructuras verticales termohalinas se extrajeron perfiles de temperatura y salinidad de diversos puntos y fueron comparados con lances de CTD realizados en periodos diferentes al pronosticado. Se eligen un par de estaciones que sean representativas del sector para comparar el desempeño de MOSA. Para disminuir la varianza del resultado de MOSA se extrajeron perfiles del promedio diario de 3 días y luego promediados a modo de tener un perfil residual. Los datos de CTD utilizados para la región de Aysén corresponden a la campaña oceanográfica de IFOP basada en el proyecto “Modelación de Alta Resolución en Estero Elefantes, 2016 “, mientras que para la zona de Chiloé y Palena se utilizó datos de CTD de IFOP de

la campaña oceanográfica del proyecto “Modelación de Alta resolución en Mar Interior de Chiloé, 2017”, proyecto en plena ejecución.

Chiloé y Palena: Como se menciona anteriormente, los datos de CTD corresponden a diversas campañas en el mar interior de Chiloé entre agosto de 2016 y marzo 2017. En los perfiles se presentan 2 versiones de MOSA, una llamada v2 que es la actual y una de prueba llamada v3, que contiene algunos cambios en ciertas zonas, como por ejemplo mayor cantidad de fuentes o algunas variaciones en la batimetría. Sin embargo esta v3 solo fue un modelo de prueba, el cual nunca corrió por periodos muy prolongados. Los datos de CTD corresponden a julio de 2017.

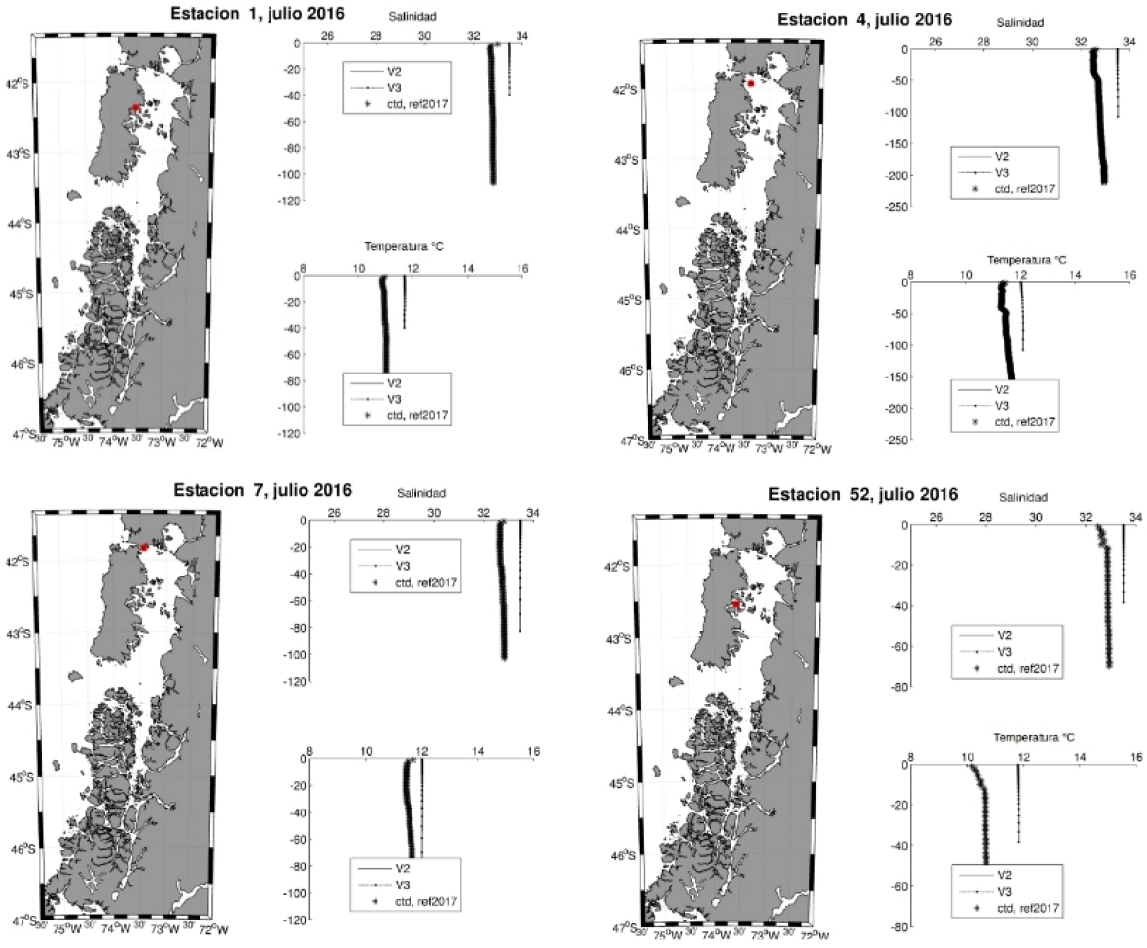

Figura 40. Estaciones 1, 4, 7 y 52 ubicadas entre zona de Chacao y Chiloé Central. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD.

En la zona de Chacao se observan perfiles totalmente mezclados para ambas variables donde MOSA, si bien presenta perfiles homogéneos, estos tienes diferencias de al menos 1 PSU en salinidad y 0.5°C de temperatura **(Figura 40).** Lo mismo se observa en la zona de Chiloé Central, donde hay presencia de perfiles homogéneos tanto en la observación como en los pronósticos **(Figura 40).**

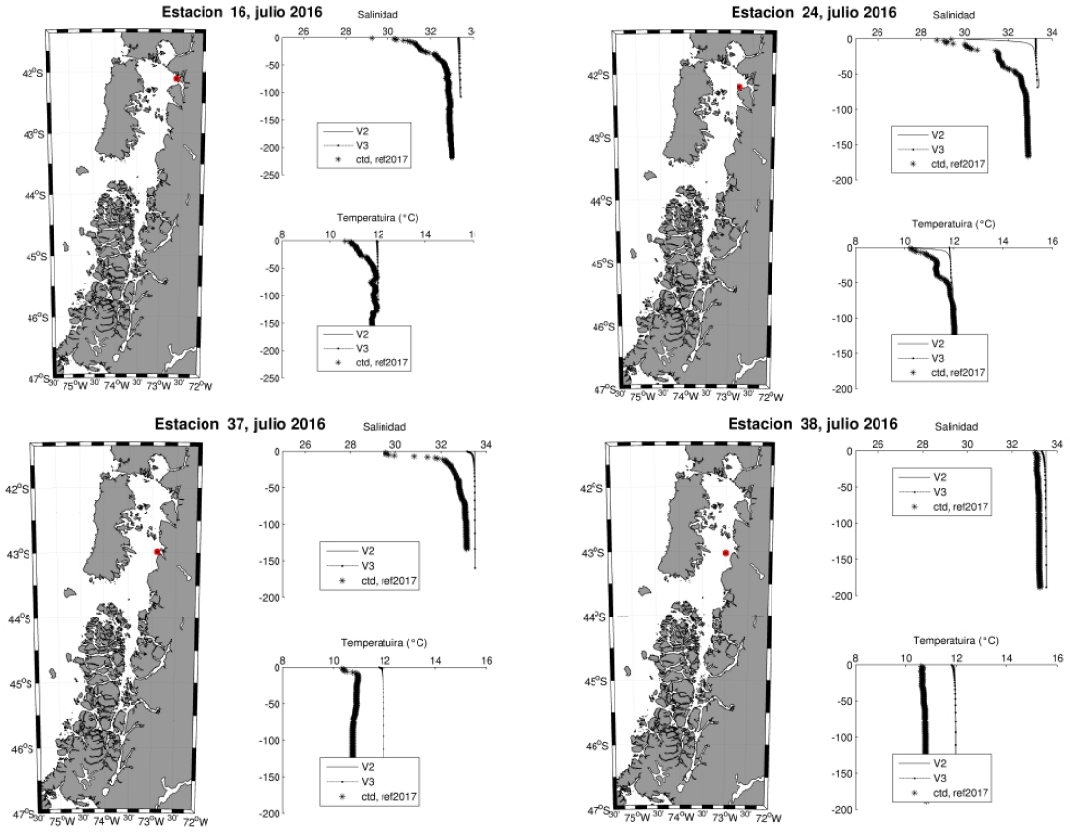

Figura 41. Estaciones 16, 24, 37 y 38 ubicadas entre zona de Comau y Desertores. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD.

La zona entre el fiordo Comau y Desertores presentó algunos perfiles estratificados con mínimos de temperatura y salinidad en superficie, se observa en algunos casos una tendencia de MOSA a desarrollar una estratificación, aunque en otros no lo logra. Se destaca el nivel de acople que representa la salinidad en la estación 38, zona de alta mezcla. Las diferencias de profundidad entre

lo observado y pronosticado responden a los errores que posee el modelo de elevación digital sobre el cual esta soportado MOSA **(Figura 41).**

En la zona de Guafo también se observa este desajuste, no obstante en superficie MOSA presenta indicios de estratificación, rasgo que se hace más notorio en el sector de Reloncaví, donde se aprecia un buen ajuste en la estructura termohalinas, contrastando con lo que se observa en la boca del fiordo Reñihue, donde si bien no se presenta una estratificación, MOSA no reproduce correctamente la estructura vertical **(Figura 42).**

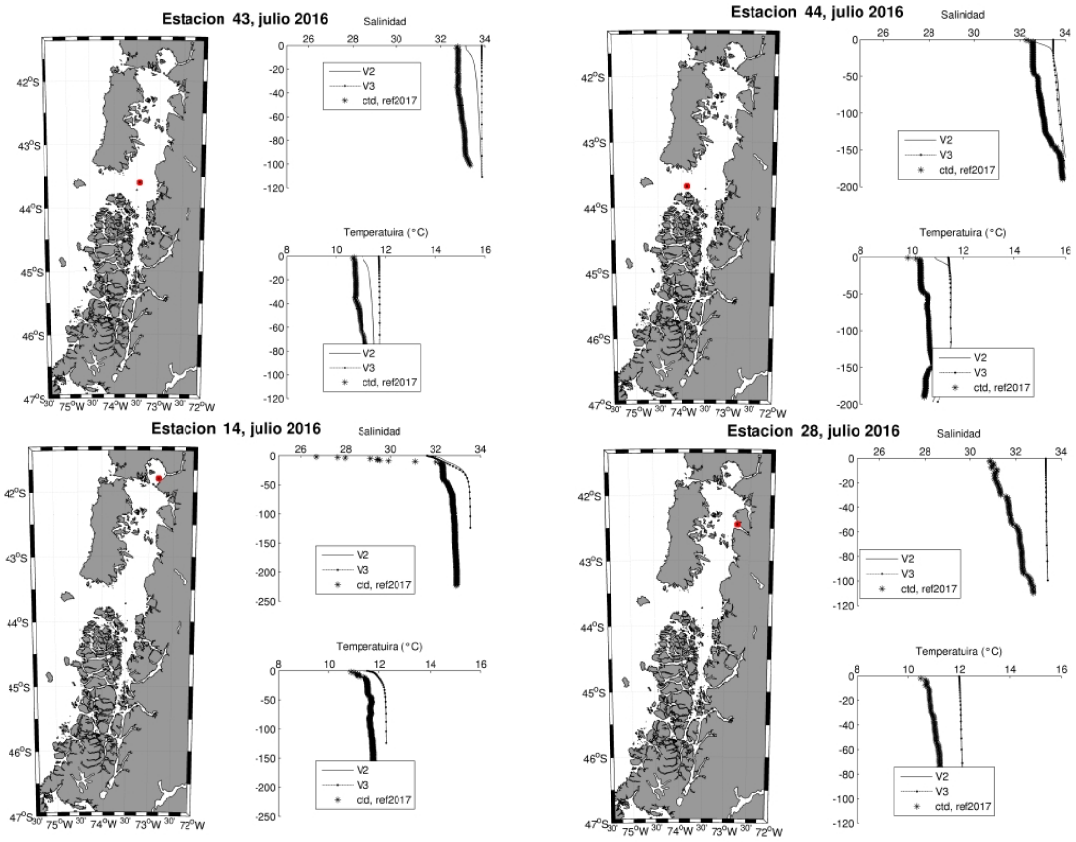

Figura 42. Estaciones 43, 44, 14 y 28 ubicadas entre zona de Guafo, Reloncaví y Reñihue. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD.

Aysén Sur: La Región de Aysén se caracteriza por poseer 2 ambientes un tanto definidos, uno de transición entre un régimen oceánico a costero- estuarino, ubicado en la zona insular de la región,

(islas Guaitecas, Archipiélago de Chonos, Elefantes), y otro de características netamente estuarinas, con influencia directa del continente (canal Moraleda, Fiordos interiores). Lo cual da lugar a la presencia de diversos escenarios oceanográficos que transforman la zona en un conjunto de micro sistemas altamente conectados pero bien definidos. En esta zona las descargas pluviales se mezclan con aportes glaciales, debido a la presencia del Campo de Hielo Norte en la Laguna San Rafael, la cual conecta con el resto de la región a través del rio Témpanos.

Durante el desarrollo del proyecto “Modelación de alta resolución al interior del Estero Elefante, XI región” se realizaron diversas campañas oceanográficas, de donde se obtuvieron numerosos lances de CTD, los cuales serán usados para evaluar el desempeño de MOSA.

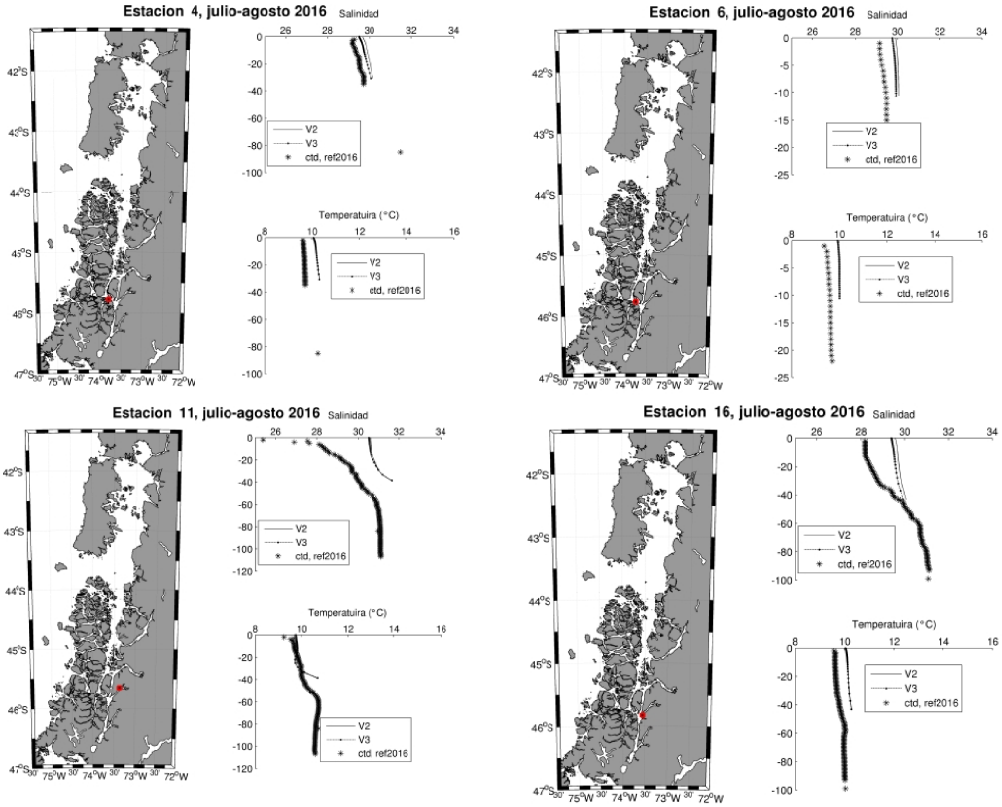

Figura 43. Estaciones 4, 6, 11 y 16ubicadas entre zona de Estero Elefantes y Quitralco. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD del año 2016.

En la **Figura 43** se muestran perfiles de MOSA y CTD para diversos puntos en la zona sur de Aysén. Las estaciones 4 y 6 en Elefantes presentan un ajuste aceptable, siendo zonas someras y altamente mezcladas, sin embargo, persiste una diferencia, aunque mínima en la temperatura y la salinidad. Por su parte, las estaciones 11 y 16 en Quitralco tienen un desempeño variable. La temperatura en general parece responder de manera adecuada pero la salinidad se muestra un poco más desacoplada, especialmente al interior del Fiordo Quitralco.

En la **Figura 44** los perfiles corresponden a una zona más expuesta de Estero Elefante, donde la mezcla es más fuerte. Las estación estaciones cercanas al centro del canal presentan un buen ajuste en ambas variables, mientras que las estaciones en la boca del Fiordo Quitralco se alejan del observado. Esto podría indicar que las fuentes de agua dulce en la cabeza de Quitralco estarían subestimadas, mientras que el aporte de Campo de Hielo Sur tendría una buena aproximación.

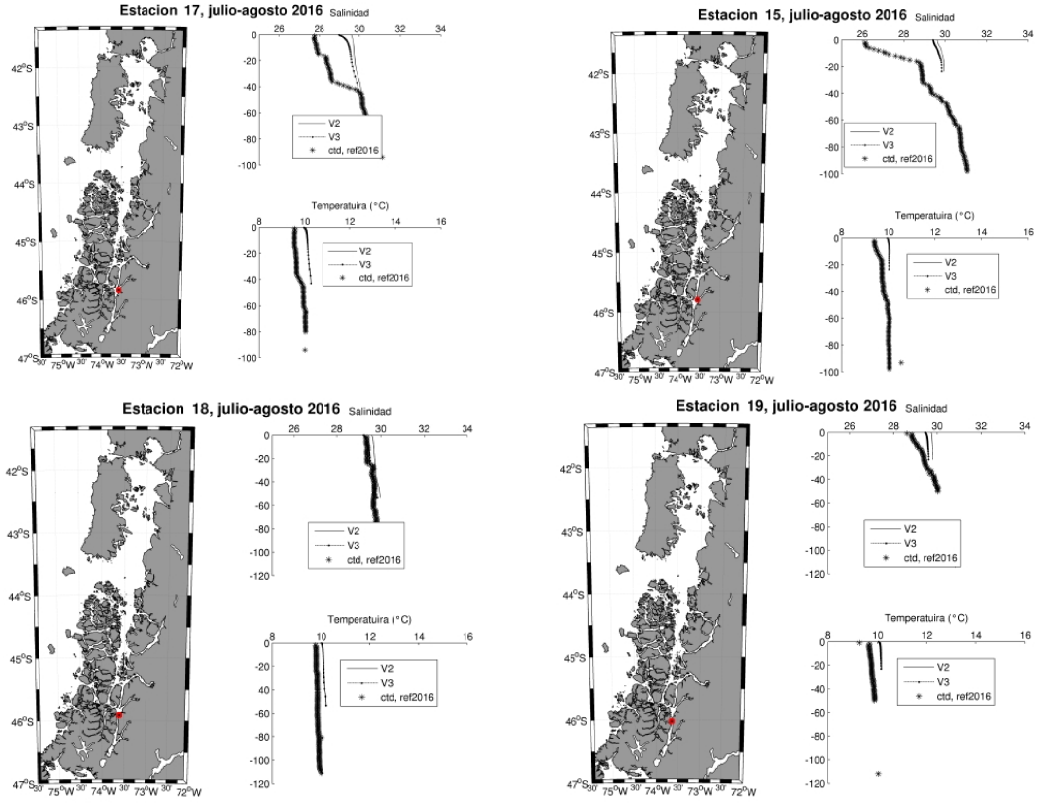

Figura 44. Estaciones 17, 15, 18 y 19 ubicadas entre zona de Estero Elefantes y Quitralco. Se presentan perfiles de temperatura y salinidad para MOSA y CTD del año 2016.

En general, el campo de masa de MOSA presentó un desempeño variable, presentando en algunos casos un ajuste regular de las estructuras termohalinas, donde se destaca en zonas de fuerte estratificación la influencia de las fuentes de agua dulce ingresadas, mientras que en zonas altamente mezcladas el modelo mantiene una diferencia de ~ 1°C en toda la columna.

Si bien las estructuras de variabilidad temporal y espacial de gran escala de la temperatura logran ser reproducidas en MOSA, queda pendiente mejorar el desempeño en las zonas costeras interiores, donde forzantes locales se vuelven agentes principales de variabilidad. En general, podemos afirmar que MOSA responde a las expectativas que puede tener un modelo operacional en una zona de extrema complejidad como lo es el mar interior de Chiloé y de Aysén donde se deben considerar los forzantes locales como el viento local, los aportes fluviales y glaciales del continente, la pluviosidad y la batimetría a través de marea generan un ambiente bastante diverso.

5.3 Objetivo 3: *Diseñar una aplicación con interfaz de usuario que permita estimar la dispersión de patógenos basados en el modelo pronostico.*

El desarrollo de este objetivo fue realizado por el Dr. Andrés Sepúlveda, del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, quien ha sido el asesor académico a cargo de la implementación de todo el sistema MOSA. Para ello, se implementó un módulo de deriva de partículas lagrangianas virtuales pasivas basado en el código computacional ROFF. Este programa permite calcular la trayectoria de partículas virtuales, las cuales son advectadas por las corrientes calculadas con el modelo de pronóstico operacional. Se implementó además una interfaz web (versión disponible en http://www.chonos.org bajo el botón Parti-MOSA) basada en los API de Google Maps, la cual permite al usuario seleccionar una fecha de interés, la profundidad y punto de liberación (latitud y longitud) de las partículas **(Figura 45).**

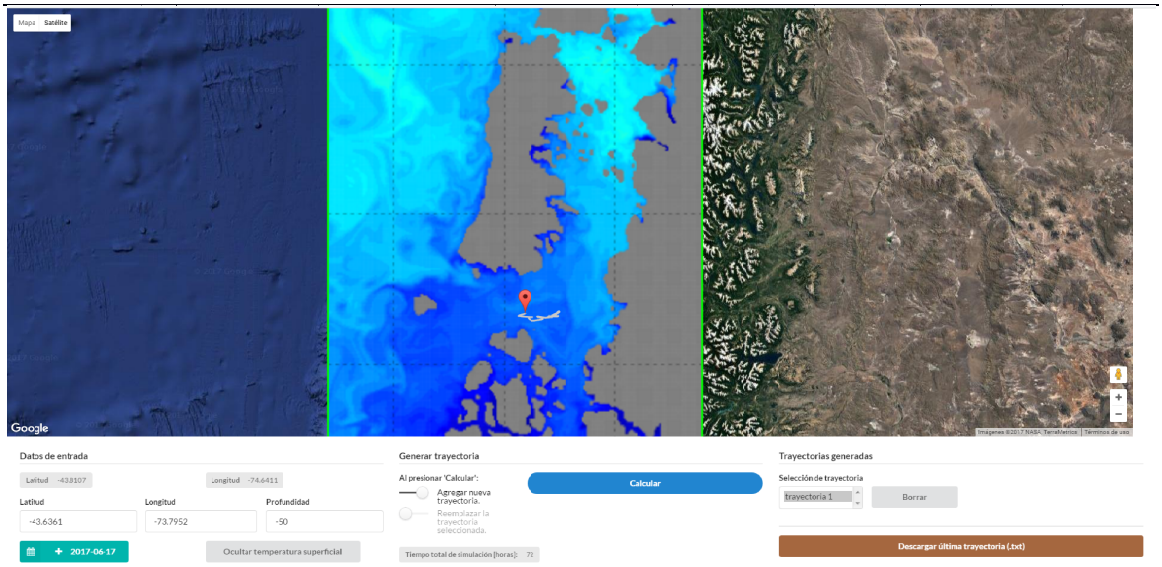

Figura 45: Interfaz web del sistema de deriva de partículas lagrangianas montado sobre resultados de MOSA-ROMS.

Se trabaja en la actualidad en la implementación de un nuevo módulo de dispersión basado en un código computacional más reciente llamado OpenDrift (https://github.com/OpenDrift/) el cual, es de uso libre y está siendo activamente desarrollado. Este código está basado en el lenguaje computacional Python, y permite la integración de módulos que modifiquen las características de las partículas que están siendo advectadas, en función del tiempo de liberación, profundidad, temperatura y/o salinidad encontradas a lo largo de su trayectoria. De esta forma las partículas lagrangianas virtuales se transforman en modelos basados en individuos (en inglés IBM), los cuales permiten incluir parametrizaciones que aproximen los ciclos de vida o transformaciones que sufran componentes biológicos larvas o floraciones algales nocivas. Un ejemplo de las pruebas realizadas con este software acoplado a MOSA-ROMS se puede ver en la **Figura 46.** Este nuevo módulo se encuentra aún en etapa de desarrollo y se visualiza como una tarea a largo plazo que permita otorgarle características simples a las partículas.

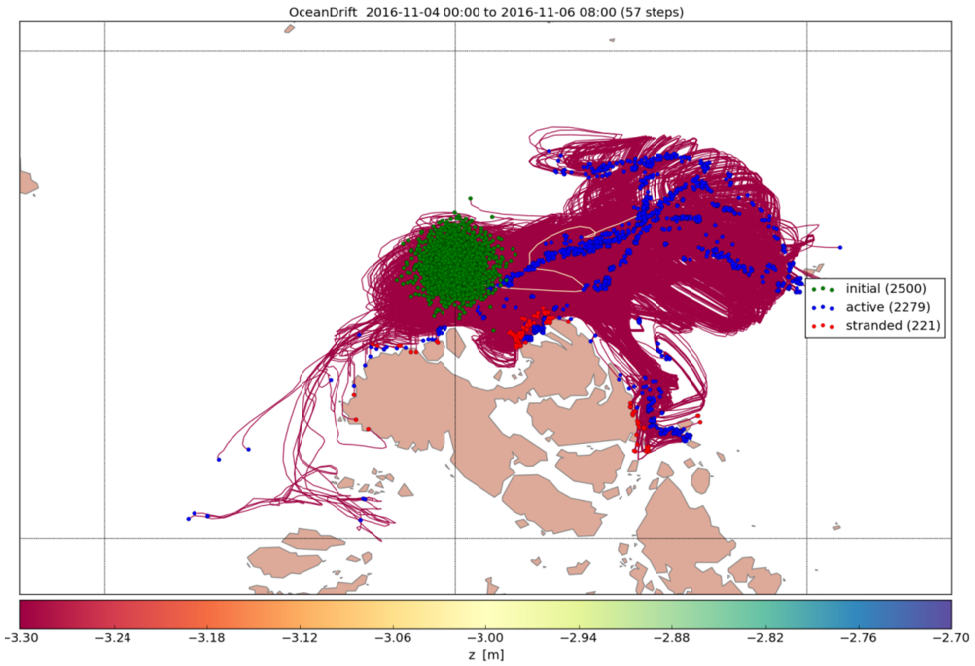

Figura 46.: Ejemplo de trayectorias de partículas utilizando el software OpenDrift montado sobre campos de corrientes del modelo operacional MOSA.

Esta herramienta estará integrada en la nueva plataforma integrada de información oceanográfica, denominada CHONOS, la cual presentará los resultados de MOSA, con un sistema que permite a los usuarios interactuar y descargar la información, además de contener diversos productos relacionados con la modelación, tales como estadísticas de conectividad hidrodinámica, dispersión de partículas datos en línea, etc. Este tema es abordado en el siguiente objetivo.

5.4 Objetivo Nº4: *Establecer mecanismos de transferencia tecnológica a fin de permitir el incremento de la experiencia nacional en este tipo de proyectos.*

Uno de los mayores desafíos con respecto a la modelación hidrodinámica reside en la presentación y gestión de los resultados, los cuales por su volumen y magnitud se vuelven inabordables para los usuarios básicos que puedan requerir de la información de manera oportuna. En la División de Acuicultura del IFOP son diversos los productos derivados de los modelos hidrodinámicos, no solo basados en pronósticos, también se han desarrollado proyectos paralelos a esta herramientas como la estimación de conectividad hidrodinámica de parcelas de agua, deriva de partículas pasivas, y modelaciones "hindcast" de alta resolución en gran parte de las regiones de Los Lagos, Aysén y en algunas zonas en Magallanes. También se cuenta con otras fuentes de información fuera de los modelos, como observaciones meteorológicas en línea y resultados en general. Lo anterior genera la necesidad de abordar la problemática de modo integral. Hasta ahora todos estos resultados se albergan en distintos servidores, con formatos propio, lo cual lo vuelve engorroso, complejo y finalmente poco eficiente.

Es por esto que a través de la consultara METEODATA, localizada en Santiago, se ha trabajado en el desarrollo de una plataforma de información oceanográfica que integre todo los productos de modelación mencionados anteriormente en un único ambiente de formato homogéneo, que sea robusto, y de fácil uso, de modo que usuarios de distintos niveles puedan acceder a ella de manera oportuna. Esta herramienta ha sido denominada CHONOS y estará albergado en el dominio *www.chonos.org*. Hoy en día, CHONOS está en proceso de marcha blanca, de manera de sortear posibles errores que puedan surgir en su operación con el fin de lograr una página robusta y eficiente, así se espera que este proceso dure a lo menos 6 meses de pruebas, periodo en el cual se liberará la información paulatinamente.

La **Figura 47** muestra una captura de pantalla del futuro portal CHONOS, específicamente la sección de pronostico oceanográfico donde se aprecian todas las prestaciones que tendrá el sistema, elección de herramienta, variables requeridas, tipo de dato requerido, ya sea este series de tiempo, mapa, perfil o transecta, forma de despliegue en pantalla y opciones de exportación de datos. En una primera etapa la disponibilidad de datos para descarga quedará restringida para reguardar el ancho de banda.

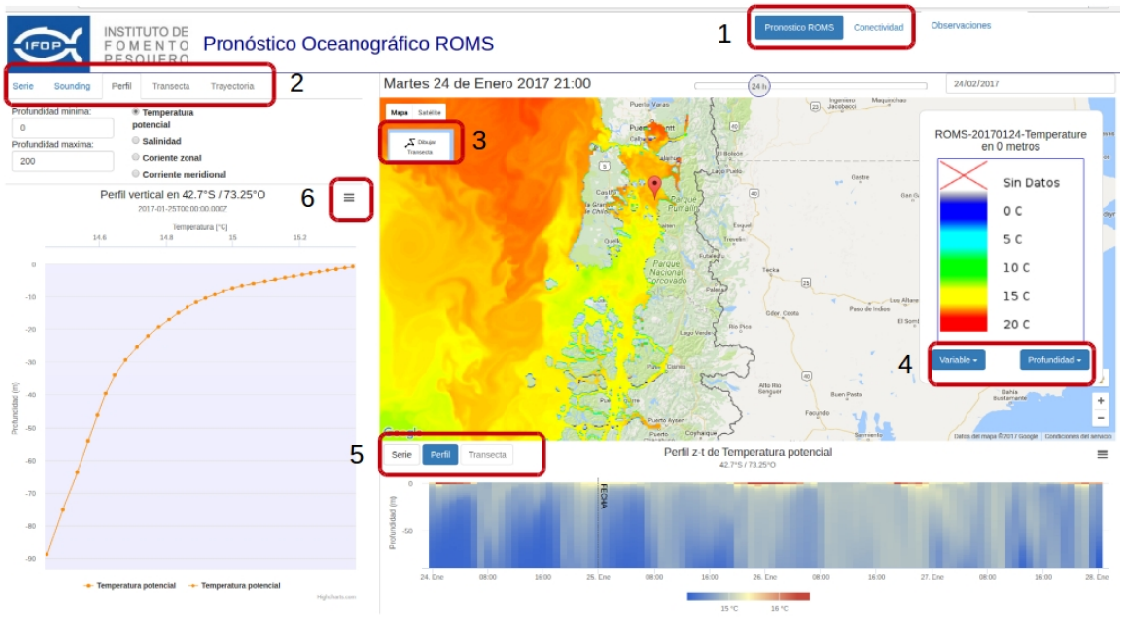

Figura 47. Captura del Portal www.chonos.org, se muestra el menú de pronostico donde se identifican diversos elementos:1) elección de herramienta, 2) selección de variable y tipo de dato por estación selección, 3) herramienta para dibujar una transecta en el dominio y mostrar los datos, 4) elección de variables y nivel vertical del mapa desplegado, 5) selección de variable y tipo de dato para diagramas verticales temporales y 6) herramientas para guardar imágenes desplegadas.

En CHONOS también se presentará la herramienta de estadísticas de conectividad, proyecto realizado en paralelo a este, el cual está enfocado en determinar la capacidad de conexión de una parcela de agua en determinados horizontes temporales a partir de la modelación “hindcast”. Si bien, se menciona, los resultados y alcances de dicho proyecto se encuentran en los informes finales de los proyectos de IFOP denominados “Desarrollo de estadísticas de conectividad”, etapas 1, 2 y 3.

6. DISCUSIÓN

Implementación de un modelo numérico de predicción sinóptico para el sur de Chile (MOSA)

Durante el presente proyecto, el objetivo principal recae en el desarrollo de un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS AGRIF, es decir, en la implementación de un modelo capaz de realizar pronósticos a 72 horas de las condiciones oceanográficas en la zona sur de Chile. Para ello, en conjunto con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción (DGEO), se implementó el Modelo Operacional Sur Austral (MOSA). El modelo cubre las regiones de Los Lagos y de Aysén a una resolución aproximada de 1 kilómetro. La resolución alcanzada en estas etapas representan una limitante en cuanto que muchos canales con un tamaño menor no podrán ser resueltos por la resolución del modelo, es por esto, y tomando en cuenta las limitantes computaciones existentes es que se considera la implementación de a lo menos dos modelos anidados en MOSA que alcancen resoluciones menores a 300 metros, uno en la zona de Chiloé Aysén, conteniendo los canales Dalcahue y Lemuy y otro modelo anidado que contenga íntegramente el sistema de fiordos Jacaf y Puyuhuapi, siendo estos modelos alimentados en su borde por MOSA. Se espera en la siguiente etapa del proyecto integrar dichos modelos anidados que permitan mejorar la resolución de los pronósticos, y disminuir el error en ellos.

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

Desempeño y optimización del modelo

El área de estudio se caracteriza por ser una región estuarina de gran escala, es decir, una zona donde se conectan aguas de origen continental de baja densidad con aguas de origen oceánico de mayor densidad. La diferencia de densidad entre ellas produce la circulación estuarina, también llamada gravitacional o boyante. Este mecanismo conduce un flujo a través de un gradiente presión que en su camino es perturbado por procesos de mezcla que son forzados por diversos agentes, algunos mecánicos como la marea, el viento y otros advectivos como las ondas internas. Justamente, son estos procesos de mezcla el mayor desafío para la modelación, pues responden a una conducta altamente no-lineal, producto de la interacción de múltiples procesos que resultan de la interacción de forzantes locales y remotos.

Lo anterior provoca que la implementación de cualquier modelo hidrodinámico en la zona deba asumir las complejidades que el entorno le presenta, las cuales lo llevan al límite de sus capacidades cuantitativas. En el caso de MOSA identificamos al menos 3 aspectos de relevancia a tratar, al margen del trabajo de mantención y soporte informático que requiere el sistema para que los procesos de automatización se mantengan constantes, estos son: A) Mejorar y corregir el dominio, B) mejorar el desempeño del modelo numérico a través del ingreso de un mayor número de fuentes de agua dulce, y C) mejorar el forzante atmosférico.

Sobre el primer punto, tenemos que uno de los problemas más frecuentes de MOSA ha sido que el dominio actual (MOSAv2), posee un fondo marino suavizado en diversas zonas para hacerlo compatible a ROMS, el cual siguiere un parámetro de pendiente de filtro de r = 0.25 en la construcción de grillas. Este filtro se aplica para evitar la presencia de pendientes abruptas en la batimetría, es decir, altos gradientes de h en relación al tamaño de los elementos, lo que tiende a forzar la disminución del paso temporal del modelo. A esto le agregamos que ROMS utiliza un esquema de elementos horizontales estructurados que no permite definir líneas de costa de contornos suaves, lo que restringe la difusión fluida de energía, retornando en inestabilidades. Si bien, utilizar un fondo suavizado le otorga estabilidad al modelo, como desventaja tenemos que aparte de tener un perfil batimétrico poco realista, en muchos casos ROMS subestima la profundidad de los canales, acercando críticamente los niveles sigma superficiales, disminuyendo la resolución vertical en superficie, que es por donde se ingresan los flujos de ríos. Esto trae como consecuencia la concentración de flujos elevados de agua en elementos pequeños que el paso de tiempo asignado

no alcanza a resolver, convergiendo en errores tipo “blow up”. A su vez, el suavizado describe constricciones inexistentes que provocan patrones de circulación de pequeña escala irreales e inestabilidades para el modelo, acentuándose el problema cuando se ingresan volúmenes adicionales, como es el caso de los caudales de ríos. Actualmente se prueba un nuevo dominio (MOSAv3) el cual tiene una batimetría más realista y una nueva distribución de elementos verticales tipo sigma con 42 niveles.

Con respecto a la adición de volumen extra al modelo para emular los caudales de ríos presentes, es necesario destacar que la interacción de estas parcelas de agua de baja densidad con aguas de origen oceánico, puede terminar modulando gran parte de la varianza en la distribución del campo de masa, que puede ser considerado como un trazador de la circulación a gran escala forzada por la densidad, de ahí radica su importancia en el sistema. Esta posee una fuerte componente local en la zona de estudio, impactada por los aportes de agua dulce de origen continental (ríos y glaciales), la pluviosidad y la advección. Esta condición está marcada por una fuerte estacionalidad, lo cual sumado a la configuración topográfica y batimétrica de la zona, da como resultado patrones de circulación complejos e irregulares. Uno de los mayores desafíos de los modelos hidrodinámicos en esta zona es justamente poder describir la estratificación de manera adecuada.

Esta búsqueda de balance ha llevado a probar diversas configuraciones del modelo que equilibren estabilidad con calidad. Es evidente que entre más caudales presente el modelo, aumentamos la posibilidad de desarrollar una condición más realista, sin embargo, los modelos hidrodinámicos no funcionan así, ya que los esquemas numéricos que discretizan las ecuaciones de movimiento en el tiempo y el espacio necesita un margen de libertad para realizar los cálculos sin perder la estabilidad algorítmica. Esto significa que se deben evitar cambios bruscos (rápidos) en la configuración del modelo, por ejemplo, adiciones de flujos de gran magnitud sobre un elemento del dominio o planos batimétricos extremadamente irregulares que impidan la fluida dispersión de energía (e.g constricciones, bajos, etc.).

Esta limitante implica que en un modelo operacional, el cual debe iniciarse todos los días de manera ininterrumpida, la prioridad recaiga en la estabilidad del modelo, para luego mejorar su calidad. En el caso de MOSA, la introducción de nuevas fuentes de agua dulce ha supuesto una pérdida de estabilidad del modelo, que en reiterados casos ha significado la caída del pronóstico durante varios días seguidos, cosa que no debe ocurrir en un modelo operacional. La incorporación de cualquier fuente nueva, siempre ha sido evaluada previamente en modelos de prueba, no obstante ciertas limitaciones computacionales impiden desarrollar modelos de pruebas más robustos (e.g múltiples simulaciones). Para atacar este problema se está probando un nuevo dominio que posea una

distribución de elementos verticales dispuestos de modo tal que en zonas costera cercanas a las fuentes ingresadas no concentren todo el flujo en un solo elemento, así también una batimetría mejorada que trate de equilibrar un aspecto realista con una forma favorable a la dispersión de energía.

Aun cuando los flujos de agua dulce ingresados puedan ser asimilados de manera estable por el modelo, queda pendiente ajustar el campo de masa. Si bien MOSA representa los procesos de gran escala de la temperatura superficial, aún persiste un sesgo ~ 1°C con observado. Para corregir este error se puede trabajar desde diversos enfoques. Uno de ellos seria construyendo la condición inicial del modelo a partir de datos de CTD, algo que ya se había propuesto pero no se ha logrado implementar todavía, esto porque los volúmenes resultantes no han sido satisfactorios debido a interpolaciones no acordes con la realidad, se seguirá trabajando en ello. Otro enfoque seria modificar la condición inicial obtenida de MERCATOR, a cual ya hemos visto que contiene un error ± 1°C. Esto podría realizarse alterando directamente el campo o sumándole la varianza diaria pronosticada a todo el volumen, lo cual podría contribuir al desarrollo de una condición inicial más ajustada y con un menor error.

El tercer enfoque es trabajar la condición inicial como un problema inverso. Donde se podría mejorar la condición inicial a través de técnicas de interpolación óptima con datos satelitales, a este proceso se le conoce como Asimilación de Datos. Se han efectuado algunas pruebas con un enfoque variacional usando el método 3DVAR, el cual, estima la covarianza de todos los puntos contra toda la grilla, así se genera una matriz de pesos que busca alcanzar un valor optimo a través de una expresión numérica (cercano al real). Si bien las ventajas de este procesos son altas, este requiere mayores capacidades computacionales y acceso a información de calidad en tiempo “casi real” del estado del océano. Es probable que las zonas del mar interior de Chiloé y Aysén no cuenten con un conjunto de datos en tiempo “casi real”, sin embargo, se espera que en un futuro se genere una red de monitoreo asociada al control ambiental y sanitario de las agrupaciones de concesiones de salmoneros que entregue datos oceanográficos en línea en diversos puntos los cuales eventualmente podrían usarse en MOSA.

Además de trabajar el dominio y el ingreso de agua dulce a MOSA, también se ha buscado mejorar el forzante atmosférico, tarea que proyecta un gran desafío a la modelación, pues la zona presenta una a disposición topográfica que permite el desarrollo de patrones locales de viento a causa del “encajonamiento” a través de los fiordos y canales que muchas veces están rodeados de altas cumbres que aíslan cada canal generando diferencias significativas en pequeñas distancias. El viento bajo determinadas circunstancias puede modificar la estructura de las corrientes en la zona,

rompiendo la estratificación, hundiendo la capa de mezcla o en casos que la dirección sea contraria al flujo gravitatorio, podría generar una estructura vertical de 3 capas en el flujo residual de la corriente. Esto puede tener un importante efecto en la corriente superficial y en la capacidad dispersiva de la zona en escalas sinópticas, lo que podría resultar en escenarios críticos en zonas que concentran una alta densidad de centros de cultivo de salmones, aumentando los riesgos de propagación de enfermedades entre ellos.

Esto motiva desarrollar modelos atmosféricos de mejor resolución en la zona que considere las complejidades presentes. Mientras hoy MOSA utiliza un modelo basado en WRF con una resolución de 12 km, se han realizado pruebas con dominios de resoluciones menores a 5 km. Los resultados en los tiempos de simulación hasta ahora han resultado favorables, los que nos lleva proyectar su implementación en el corto plazo. A su vez, se está instalando una red de estaciones meteorológicas entre Los Lagos y Aysén que además de entregar valiosa información en tiempo real, servirá para estimar el error de los pronósticos, mejorar su desempeño y en un futuro cercano poder implementar técnicas de interpolación optima, o asimilación de datos, a modo de disminuir la incertidumbre del modelo.

Sistemas de observación en línea y cooperación inter-institucional.

En la actualidad, existen escasos sistemas de observación permanentes. En la región de los lagos y Aysén se contabilizaron 4 sistemas de observación. De estos sistemas no todos tienen la información disponible y además no todos cumplen con estándares mínimos. De lo anterior se desprende que las fuentes de información oceanográficas disponibles obedecen a objetivos particulares de cada institución responsable y no se encuentran disponibles de manera conjunta, no existiendo ninguna organización que reúna toda esa información en una plataforma común. En general, los parámetros tienden a converger en mediciones de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en capa más cercana a la superficie. Respecto de variables atmosféricas la mayor parte de los puntos de observación no contemplan esta componente, exceptuando la boya ubicada en Puyuhuapi. Información de corrientes es también muy escasa, debido a los mayores costos asociados al instrumento (ADCP). En relación a la trasmisión de datos, es utilizada ampliamente el uso de sistema de comunicación GSM acoplada o no a un sistema de radio entre la boya y la estación en tierra para su retransmisión, por lo tanto, los puntos se encuentran ubicados cercano a zonas donde existe dicha cobertura, no se observó ningún sistema con transmisión satelital.

La calidad de los datos recolectados depende principalmente de la calidad de los sensores y las respectivas mantenciones que se deben realizar a los equipos, principalmente respecto a la

acumulación de fouling. De los puntos de observación, la boya ubicada en Puyuhuapi cuenta con una fuerte componente de análisis de datos realizado por los investigadores responsables de esta, incluyendo publicaciones científicas con estos datos (Schneider, 2014), por lo cual, parece ser una fuente confiable de información. En la actualidad el modulo atmosférico y de transmisión de datos se encuentran fuera de operación y se requiere la mantención de los equipos por parte del fabricante.

Las plataformas de observación de los canales Dalcahue y Lemuy fueron instaladas en agosto 2015 y contemplan mantención cada 2 meses, junto con toma de muestras de agua y lances de CTD en el mismo punto, con lo cual, asegura un mayor control en la calidad de los datos. El equipo instalado en estas plataformas es un WQM D 120% del fabricante Wetlabs y Sea Bird Electronics, el WQM emplea una inyección de biocida activo e inhibidores pasivos para combatir el fouling interno y externo.

Con la idea de utilizar la información de calidad disponible y de generar una convergencia de información que hoy se encuentra disgregada, se están generando los vínculos cooperativos a través de la firma de convenios tanto con COPAS Sur-Austral como con el Núcleo Milenio Musels, con la finalidad de compartir la información que cada institución recopila, generando las sinergias adecuadas para beneficios generales. La finalidad es que estos 3 sistemas de observación puedan estar disponibles en tiempo real para su utilización, tanto como fuente de información directa, como para utilización del modelo de pronósticos.

Implementación de sistemas de monitoreo IFOP

En el ámbito de la acuicultura austral, el monitoreo en línea, es decir, recolectar información ambiental en tiempo real en los fiordos y canales de la Patagonia chilena, ha surgido como una necesidad impostergable para la adecuada sincronización entre el manejo productivo y las condiciones ambientales. Disponer de información en tiempo real, construir y comprender tendencias de comportamiento de algunas variables claves (por ejemplo, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) puede ayudar a comprender otros procesos como las recurrentes emergencias sanitarias o floraciones algales nocivas.

Durante décadas, las mediciones de campo para la evaluación de la calidad del agua han sido limitadas por sus altos costos, intensivo uso de tiempo y recursos humanos. Si bien, estos esfuerzos de investigación y monitoreo se han ido intensificando en los últimos años, por lo general, han sido demasiado limitados en escalas temporales y espaciales para abordar adecuadamente los factores que influyen en el desarrollo de los acontecimientos como las floraciones de algas nocivas, el

agotamiento del oxígeno, muerte de peces, y la contaminación de bancos naturales (Glasgow et al. 2004). Además, la utilidad de los datos puede verse comprometida debido a los protocolos de control de calidad inadecuados y el uso de metodologías no estandarizadas. (Pettinger, 1971; Teillet et al, 2002). Los programas de vigilancia más recientes han mostrado una tendencia hacia la obtención de datos de manera continua a través de observaciones in situ. Estos datos pueden ser accedidos a través de la descarga in situ o de forma remota. Este último tiene la ventaja de que permite detectar rápidamente cambios y tendencias de indicadores críticos proporcionando alertas tempranas para los tomadores de decisiones (Glasgow et al. 2004).

Como parte del desarrollo de la componente observacional del sistema operacional, se encuentra en etapa de implementación un sistema de observación atmosférico y marino en tres puntos de medición. Cada uno de los sensores fue integrado a través de placas electrónicas al sistema de trasmisión de datos generando la convergencia de datos atmosféricos (presión atm, viento, humedad relativa, temperatura del aire) y marinos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y presión). Las primeras pruebas consistieron en la instalación de dos de estos sistemas en plataformas marinas ubicadas en la cercanía de Dalcahue y Chonchi. La evaluación del equipamiento consistió en pruebas de consumo de energía y trasmisión datos, en ambas circunstancia la respuesta fue adecuada, posterior a esto, al analizar los datos se detectó un problema de saltos anómalos en las series de datos que fue atribuido al consumo excesivo que genera el sensor de viento ultrasónico. Esta situación retrasó el inicio de la evaluación de las plataformas, sin embargo, se espera que hacia el final del 2017 vuelvan a estar operativas como parte de periodo de evaluación y validación de estos datos, que forma parte de desarrollo de la etapa III de este proyecto. Se espera que luego de la evaluación de los sensores marinos, estos puedan ser instalados en zonas selectas siguiendo criterios oceanográficos, pero también logísticos como: señal de telefonía celular para la transmisión de datos, seguridad para evitar vandalismo, etc.

La importancia de implementar sistemas de monitoreo para el desarrollo sustentable de la acuicultura, se refleja en una de las últimas modificaciones a la Ley General de Pesca y Acuicultura, promulgada en Abril de 2010 que establece en su artículo 87 ter: "A fin de tener un control en línea de los parámetros ambientales de las agrupaciones de concesiones acuícolas, éstas deberán disponer de una tecnología que registre y transmita, al menos, indicadores de conductividad, salinidad, temperatura, profundidad, corrientes, densidad, fluorescencia, turbidez según lo establezca el reglamento".

Producto de lo anterior es que se puede proyectar el desarrollo de un sistema de monitoreo a largo plazo con una gran cobertura geográfica a lo largo de la costa del sur de Chile. Dado de que existe

una gran cantidad de “barrios” salmoneros (ACS) sería muy importante poder contar con esta información en el futuro. En la medida que dispongamos de series de tiempo lo suficientemente extensas, podremos conocer tendencias, elaborar modelos, establecer escenarios y eventualmente predecir situaciones indeseadas. Además, conocer relaciones causa-efecto nos permitirá disminuir la incertidumbre tanto en decisiones privadas (productivas, económicas) como públicas (sustentabilidad, condiciones ambientales, bien común), y en la medida que se conforme una red de observación y monitoreo, más robustos y útiles serán los modelos predictivos.

Herramientas para usuarios

Uno de los mayores desafíos con respecto a la modelación hidrodinámica reside en la presentación y gestión de los resultados, los cuales por su volumen y magnitud se vuelven inabordables para los distintos usuarios que puedan requerir de la información de manera oportuna. Por ello se hace necesario contar con una plataforma de información que sea eficiente, robusta y amigable, a modo que tenga la capacidad de entregar información ambiental en un formato estandarizado.

Se solicitó a la empresa METEODATA, con residencia en Santiago el desarrollo de una plataforma de información oceanográfica que integre los resultados de pronósticos, estadísticas de conectividad hidrodinámica y dispersión de partículas pasiva, en un solo formato que permita a los usuarios navegar a través de los resultados. Esta plataforma se ha denominado CHONOS, (www.chonos.org), y reemplazará a www.iproach.cl, la cual fue la primera página de pruebas que se levantó con información. CHONOS fue diseñado buscando los mejores estándar de este tipo de páginas en el mundo, una geolocalización de la información con un mapa navegable, desde el cual se puede extraer información de todas las variables pronosticadas, trazar transectas, extraer estaciones virtuales, generar series de tiempo, dispersar partículas, entre otras prestaciones. Esta página comienza con una marcha blanca que se estima dure 6 meses para luego ir gradualmente liberando su acceso a un número mayor de usuarios.

Perspectiva y desarrollo

Durante las 3 etapas que lleva el proyecto se ha logrado mantener un modelo operacional que entrega pronósticos de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar entre las regiones de Los Lagos y Aysén a un horizonte de 72 horas. Estos resultados son presentados en el entorno georrefenreciado de información oceanográfica CHONOS que permite a los usuarios navegar y extraer la información. También se han implementado diversos puntos de observación

meteorológica, no así puntos de observación oceanográfica, los cuales han presentado diversos problemas de aspecto técnico que no ha permitido su uso operativo aún.

La proyección y financiamiento de este sistema operacional se encuentra asegurada, al menos, hasta agosto de 2019. Esto permite proyectar líneas sobre las cuales generar mejoras del sistema actual, o bien, nuevos desarrollos de modelación acopladas a la actual plataforma. En el primer caso, la mejora de las condiciones que permita a MOSA reproducir con mayor precisión los procesos que interactúan entre la mezcla y la estratificación, es esencial y un objetivo fundamental en el presente y futuro cercano. Sin embargo, y paralelo a estas mejoras, el acople del sistema químico – biológico marino luce como una tarea fundamental en los próximos años. En esto existen dos líneas, una de ellas guarda relación con el desarrollo de un modelo biogeoquímico simple del tipo NPZ, que permita estimar, principalmente, la dinámica de nutrientes de larga escala, enfocado a condiciones oceánicas y como estas ingresan a los fiordos y canales. Esto permite otorgar condiciones de borde a modelos biogeoquímicos de alta resolución que actualmente se desarrollan por IFOP en la zona interior. Por otra parte, la problemática asociada a floraciones de algas nocivas, hace necesario la implementación de modelos simples, que permitan tener una aproximación del transporte y distribución de estas microalgas. Por tanto, se estima como un desarrollo necesario la caracterización biológica de las partículas desde una perspectiva de modelación ABM (Agent Based Model).

Finalmente, el desarrollo de este sistema operacional, que lleva a cabo IFOP, ha sido concebido en una estructura cooperativa entre instituciones, sin el cual se transformaría en un objetivo inabordable. De esta manera, en la componente de modelación hidrodinámica hay un estrecho vínculo con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción; en el forzamiento atmosférico existe un aporte sustantivo por parte de la Dirección Meteorológica de Chile; la Dirección General de Aguas y Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada cuentan con información muy relevante en cuanto a caudales de ríos y batimetría respectivamente y la cooperación tanto de Copas-Sur Austral como del Núcleo Milenio Musels en cuanto a sistemas de observación se hace absolutamente necesaria en el desarrollo de la componente observacional.

7. CONCLUSIONES

- Se ha implementado un modelo operacional (MOSA) entre las regiones de Los Lagos y Aysén que entrega pronósticos de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar a un horizonte de 72 horas. La evaluación de MOSA indica que es capaz de reproducir la variabilidad espacial y temporal del campo de masa a gran escala, lo que permite inferir procesos estacionales que influyan en los patrones de circulación de la zona. Sus resultados pueden ser utilizados para adelantarse a escenarios ambientales críticos para la industria salmonera que dependan de la hidrodinámica de la zona.

- Se está implementado un modelo atmosférico operacional para forzar MOSA que pueda llegar a una resolución menor a 5 km en la zona.

- Se ha desarrollado una interfaz que permite dispersar partículas utilizando los resultados de los pronósticos, si bien hoy en día estas partículas son pasivas, se trabajará en otorgarle propiedades biológicas, a modo que puedan responder a la distribución de temperatura, salinidad y radiación.

- Los resultados de MOSA, junto con otros productos de modelación son presentados en CHONOS (www.chonos.org), una página diseñada especialmente para navegar e interactuar con los datos, cuya puesta en marcha blanca comienza al final de este proyecto y se espera que dure unos 6 meses.

- La implementación de MOSA permite diseñar y proyectar la implementación de modelos operacionales biogeoquímicos en la zona que entreguen información relevante para la estimación de capacidad de carga de los sistemas.

- Se han realizado diversas cooperaciones con instituciones vinculadas a este tipo de sistemas que ha logrado mejorar las capacidades del modelo y proyectar futuras implementaciones en él.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albretsen J, Ann Kristin Sperrevik, André Staalstrøm, Anne D. Sandvik, Frode Vikebø and Lars Asplin. 2011. NorKyst-800 Report No. 1. User Manual and technical descriptions.

Asplin L, Anne D. Sandvik and Jon Albretsen. 2011. The coastal model NorKyst-800 a model of the currents along the whole Norwegian coast. Marine Research News N° 8-2011.

Avila, Marcela, De Zarate, Constanza, Clement, Alejandro, Carbonell, Pamela, & Pérez, Felipe. (2015). Efecto de factores abióticos en el crecimiento vegetativo de Alexandrium catenella proveniente de quistes en laboratorio. *Revista de biología marina y oceanografía*, *50*(Supl.1),177-185.

Chassignet, Eric P., Verron, Jacques (Eds.). 2006. Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography, XII, pp577 .

Clément, A. Aguilera, C. FuentesAnálisis de marea roja en Archipiélago de Chiloé, contingencia verano 2002. XXII Congreso de Ciencias del, Mar, 28–30 de mayo, Valdivia, Chile (2002)

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J. L., Fichefet, T., Friedlingstein, P., & Shongwe, M. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility.

Debreu, L., P. Marchesiello. & G. Cambon. 2011. Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. Ocean Modelling 49-50; 1-12.

Dombrowsky E. Overview. 2011. Global Operational Oceanography Systems en A. Schiller, G. B. Brassington (eds.), Operational Oceanography in the 21st Century. DOI 10.1007/978-94-007-0332-2_13

Glasgow, H.B., Burkholder, J.M., 2000. Water quality trends and management implications from a five-year study of a eutrophic estuary. Ecol. Appl. 10, 1024 – 1046

H. B. Glasgow, J. M. Burkholder, R. E. Reed, A. J. Lewitus, and J. E. Kleinman. 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, vol. 300, no. 1-2, pp. 409–448.

Holmer, Marianne. "Environmental Issues of Fish Farming in Offshore Waters: Perspectives, Concerns and Research Needs." *Aquaculture Environment Interactions*, vol. 1, no. 1, 2009, pp. 57–70. *JSTOR*, www.jstor.org/stable/24864018.

Ianniello, J. P.1979. Tidally induced residual currents in estuaries of variable breadth and depth.Journal of Physical Oceanography,9(5), 962-974.

Le Traon P. 2011. Satellites and Operational Oceanography en A. Schiller, G. B. Brassington (eds.), Operational Oceanography in the 21st Century. DOI 10.1007/978-94-007-0332-

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. Universidad Austral de Chile. Fondo de Investigación Pesquera. Informe Final.

Mardones, J., A. Clément, X. Rojas & C. Aparicio. 2010. Alexandrium catenella during 2009 in Chilean waters, and recent expansion to coastal ocean. Harmful Algae News. 41: 8-9.

Moore AM, Arango HG, Di Lorenzo E, Cornuelle BD, Miller AJ, Neilson DJ .2004. A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model. Ocean Model 7:227–258.

Muñoz P, S Avaria, H Sievers & R Prado (1992) Presencia de dinoflagelados tóxicos del género Dinophysis en el Seno Aysén, Chile. Revista de Biología Marina (Chile) 27: 187-212.

Murphy, A. H. (1993). What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. Weather and forecasting, 8(2), 281-293.

Oke, P.R., Allen, J.S., Miller, R.N., Egbert, G.D. and Kosro, P.M. 2002. Assimilation of surface velocity data into a primitive equation coastal ocean model.Journal of Geophysical Research 107: doi: 10.1029/2000JC000511. ISSN: 0148-0227.

Paduan JD, Shulman I 2004. HF radar data assimilation in the Monterey Bay area. J Geophys Res 109. doi:10. 1029/2003JC001949.

Pettinger, L.R., 1971. Field data collection—an essential element in remote sensing applications. Proceedings of the International Workshop on Earth Resources Survey Systems, Washington, DC, 49 – 64.

Pinardi, N., & Coppini, G. (2010). Preface" Operational oceanography in the Mediterranean Sea: the second stage of development". *Ocean Science*, *6*(1), 263-267.

Pinilla, E., M. Arriagada, G. Soto, C. Ruiz, P. Reche. 2015. Informe final. "Determinación de los patrones de circulación en los mares interiores de la región de Magallanes" Proyecto ASIPA – MINECOM. 183 p+Anexos.

Pinilla, E., M. Arriagada, G. Soto. 2013. Informe final. "Caracterización y modelación de los patrones de circulación marina en la XII región de Magallanes" Proyecto ASIPA – MINECOM. 111 p+Anexos

Pinilla, E., G. Soto, M. Arriagada. 2012a. Informe final. "Diseño y estudio técnico de macrozonas de agrupaciones de concesiones en la zona sur-austral X a XII regiones" Proyecto ASIPA – MINECOM. 92 p+Anexos

Pinilla, E., G. Soto, M. Arriagada. 2012b. Informe final. "Determinación de las condiciones oceanográficas en las áreas del Seno de Reloncaví y mar interior de Chiloé" Proyecto ASIPA - MINECOM. 89 p+Anexos.

Proyecto InnovaChile - Corfo. 2012. Sistema de información oceanográfica para la sostenibilidad de la acuicultura en la región de Aysén. Centro de Investigación en ecosistemas de la Patagonia (CIEP) – Universidad Austral de Chile (UACh). 11BPC-10191

Ravichandran M. 2011. In-situ Ocean Observing System en A. Schiller, G. B. Brassington (eds.), Operational Oceanography in the 21st Century. DOI 10.1007/978-94-007-0332.

Salinas S & S Hormazábal. 2003. Capacidad de transporte de la constricción de Meninea para un flujo de dos capas y el efecto de la corriente de marea. Ciencia y Tecnología del Mar 27(1): 5-15.

Schiller, A., G. B. Brassington (Eds.). 2011. Operational Oceanography in the 21st Century, Springer Science+Business Media B.V. DOI 10.1007/978-94-007-0332-2_13.

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.

Soto, G., M. Arriagada, E. Pinilla, C. Ruiz, P. Reche, L. Méndez. 2015. Informe final. "Modelación de alta resolución aplicada a la conectividad y transporte hidrodinámico al interior de macro – zonas en la XI Región de Aysén" Proyecto ASIPA – MINECOM. 63 p+Anexos.

Sutherland, G., Garrett, C., & Foreman, M. 2005. Tidal resonance in Juan de Fuca Strait and the Strait of Georgia.Journal of Physical Oceanography, 35 (7), 1279-1286.

Svendsen, H., & Thompson, R. O. 1978. Wind-driven circulation in a fjord.Journal of physical oceanography, 8(4), 703-712.

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. Can. J. Remote Sens. 28, 713 – 718

The Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE). 1997. International Symposium, Biarritz.

Trenberth, K.E., T. Koike and K. Onogi. 2008. Progress and prospects for reanalysis for weather and climate, Eos, 89, 234-235.

Valle-Levinson, A. 2013. Some basic hydrodynamic concepts to be considered for coastal aquaculture. In L.G. Ross, T.C. Telfer, L. Falconer, D. Soto & J. Aguilar-Manjarrez, eds. Site selection and carrying capacities for inland and coastal aquaculture, pp. 147–158. FAO/

Institute of Aquaculture, University of Stirling, Expert Workshop, 6–8 December 2010. Stirling, the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland. FAO Fisheries and Aquaculture Proceedings No. 21. Rome, FAO. 282 pp

Zhang, S., M. J. Harrison, A. Rosati, and A. Wittenberg, 2007: System Design and Evaluation of Coupled Ensemble Data Assimilation for Global Oceanic Climate Studies.Mon. Wea. Rev., 135, 3541–3564.doi: http://dx.doi.org/10.1175/MWR3466.1

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO
Sección Ediciones y Producción
Almte. Manuel Blanco Encalada 839
Fono 56-32-2151500
Valparaíso, Chile
www.ifop.cl

www.ifop.cl