INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2015

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

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Junio 2016

I N S T I T U T O D E F O M E N T O P E S Q U E R O

INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2015

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

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Junio 2016

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

Director Ejecutivo
Leonardo Núñez Montaner

Jefe División Investigación en Acuicultura
F. Leonardo Guzmán Méndez

JEFE PROYECTO

Elías Pinilla Matamala

AUTORES

Elías Pinilla Matamala
Cristian Ruiz Soto
Milton Salas Salas

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL ---------- **1**
ÍNDICE FIGURAS ---------- **2**
ÍNDICE TABLAS ---------- **10**

RESUMEN EJECUTIVO ---------- **11**

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

2. OBJETIVOS ---------- **24**
2.1 Objetivo general ---------- **24**
2.2 Objetivos específicos ---------- **24**

3. METODOLOGÍA ---------- **25**
3.1 Objetivo n° 1 ---------- **25**
3.2 Objetivo n° 2 ---------- **31**
3.3 Objetivo n° 3 ---------- **32**

4. GESTIÓN DEL PROYECTO ---------- **33**
4.1 Reuniones de coordinación con la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SSPA) 33
4.2 Reuniones académicas con el consultor de la Universidad de Concepción 33
4.3 Talleres de Difusión 35
4.4 Compra y mantenimiento de equipo 36

5. RESULTADOS ---------- **38**
5.1 Objetivo n° 1 ---------- **38**
5.2 Objetivo n° 2 ---------- **73**
5.3 Objetivo n° 3 ---------- **78**

6. DISCUSIÓN ---------- **82**

7. CONCLUSIONES ---------- **94**

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ---------- **96**

FIGURAS
TABLAS

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Sistema oceanográfico operacional en el golfo de Finlandia.

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

Figura 3. Análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo. Las lines rojas indican el estado del océano predecido a partir de condiciones iniciales en el tiempo de análisis (puntos rojos). Las observaciones obtenidas dentro de la ventana verde se han agrupado y asimilado solo en los tiempos de analisis. Figura obtenida de Andreas Schiller, Gary B. Brassington: Operational Oceanography in the 21st Century, 2011.

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

Figura 5. Observaciones de corrientes en la zona Sur-Austral realizadas por IFOP (2010-2015).

Figura 6. Campo tridimensional estático utilizado como condición de inicial en un modelo hidrodinámico.

Figura 7. Sección transversal de salinidad utilizada como condición de borde en un modelo. Notar que estos valores presentan variabilidad temporal y espacial.

Figura 8. Campo de viento de ejemplo, utilizado en un dominio similar a MOSA otorgado por la Dirección Meteorológica de Chile, basados en WRF. Este campo tiene una resolución temporal de 6 horas.

Figura 9. Ubicación de las fuentes de agua dulce ingresadas hasta ahora a MOSA.

Figura 10. (Arriba) Estructura de grilla tipo Arakawa –C utilizada en MOSA, (abajo) distribución de niveles verticales tipo sigma, similar a la utilizada en MOSA.

Figura 11. Domino de MOSA, construido con batimetría obtenida de cartas SHOA y proyectos de investigación realizados en la zona.

Figura 12. Diagrama que describe la operación periódica de MOSA.

Figura 13. Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo de MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.

Figura 14. Diagrama de flujos que representa la estructura de funcionamiento de MOSA.

Figura 15. (Izquierda) Máscara del dominio de Chiloé-Aysén, (derecha) mascara del dominio de Magallanes.

Figura 16. (Izquierda) Modelo de elevación digital del dominio de Chiloé-Aysén, (derecha) Modelo de elevación digital del dominio del dominio de Magallanes.

Figura 17. (A) Dispositivo infiniband mellanox, (B).sonómetro, y (C) sistema de aire acondicionado

Figura 18. Cluster empleado por IFOP, Putemún, (A) vista frontal nodos,(B) vista posterior nodos, y (C). Rack Cluster

Figura 19. Sistema UPS Tripplite encargado de regular la energía del cluster.

Figura 20. Nodos de cómputos empleados para el pronóstico

Figura 21. Memoria usada por los nodos de cómputo en una ventana de 3 días.

Figura 22. Aspecto inicial del sitio web www.iproach.cl, el cual presentará los resultados de MOSA, será la plataforma de trabajo para montar otras herramientas de gestión ambiental.

Figura 23. Pronóstico de salinidad superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.

Figura 24. Pronostico de temperatura superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.

Figura 25. Red de mareógrafos que disponen información en línea a través del portal www.ioc.org presentes en el sur de Chile, los cuales son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

Figura 26. Histograma de la amplitud en metros de las principales constituyentes armónicas observadas del nivel del mar en Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka, para una serie de 30 días de valores horarios, correspondientes al mes de septiembre de 2015.

Figura 27. Espectros de energía del nivel del mar para las series observadas (azul) y simuladas (rojo) para Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka. Los espectros fueron construidos con 10 grados de libertad y corresponden a series con valores horarios de 30 días.

Figura 28. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Puerto Montt. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

Figura 29 Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Ancud. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

Figura 30. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Castro. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

Figura 31. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Melinka. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

Figura 32. Estaciones de monitoreo oceanográfico de MUSELS, localizadas en Quiquel y Vilupulli, en los canales Dalcahue y canal Yal respectivamente. Estas estaciones cuentan con series de tiempo de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad, y próximamente contaran con información meteorológica en línea gracias a un convenio con IFOP.

Figura 33. Series de tiempo de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad entregadas por la estación Quiquel, mantenida por Musels, y contrastadas con los resultados de MOSA en el mismo punto entre agosto de 215 y, marzo 2016.

Figura 34. Series de tiempo de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad entregadas por la estación Vilupullil, mantenida por Musels, y contrastadas con los resultados de MOSA en el mismo punto entre agosto de 215 y, marzo 2016.

Figura 35. Puntos de evaluación para el campo de masa de MOSA. Estas estaciones corresponden a lances de CTD efectuadas por IFOP durante la primavera de los años 2013 y 2014.

Figura 36. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Bynon, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

Figura 37. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Ninualac, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

Figura 38. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal King, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

Figura 39. Estaciones de referencia para evaluar el desempeño de MOSA en verano.

Figura 40. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 30. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 41. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 20. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 42. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 16. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 43. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Puyuhuapi, Región de Aysén.

Figura 44. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Jacaf, Región de Aysén.

Figura 45. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 74. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 46. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 44. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 47. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 46. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 48. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 50. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 49. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 21. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 50. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Moraleda, Región de Aysén.

Figura 51. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Corcovado, Mar interior de Chiloé.

Figura 52. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 5. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 53. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 2. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 54. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 39. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 55. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 12. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 56. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 21. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 57. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 63. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

Figura 58. (Izquierda) Promedio mensual de marzo de la Temperatura superficial del mar (TSM) obtenida de datos satelitales MODIST, (centro) varianza del promedio de TSM, y (derecha) número de días con datos para construir el promedio.

Figura 59. Promedio mensual de marzo de la temperatura superficial del mar pronosticada por MOSA par ale dominio de Chiloé –Aysén.

Figura 60. Desviación estándar del promedio mensual de marzo para TSM en el dominio Chiloé – Aysén de MOSA.

Figura 61. Promedios mensuales de salinidad superficial del mar (SSS) de MOSA para los meses de febrero, marzo y abril, 2016.

Figura 62. Zona de Reloncaví, Golfo de Ancud, Con posiciones de equipos en Paso Nao, Fiordo Comau y Canal Chacao.

Figura 63. Zona de Chiloé Central, Con posiciones de equipos en Lin lin, Llingua, Chaulinec e Isla Tranqui.

Figura 64. Zona de Corcovado Moraleda, Con posiciones de equipos usados.

Figura 65. Zona de Aysén Continental, Con posiciones de equipos usados en Isla Marta, Puerto Gaviota, Canal Darwin, Canal Errazuriz y Canal Utarupa.

Figura 66. Zona de Aysén insular, Con posiciones de equipos usados en Canal Byron, Canal Perez norte, canal King y Canal Ninualac.

Figura 67. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Paso Nao de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 68. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Chacao de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 69. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Fiordo Comau de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 70. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Chaulinec de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 71. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Tranqui de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 72. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Linlini de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 73. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Llingua de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 74. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Golfo Corcovado de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 75. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Moraleda de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 76. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Santa Marta de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 77. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Puerto Gaviota de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 78. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Errazuriz de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 79. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Darwin de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 80. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Utarupa de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 81. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Bynon de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 82. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Perez Norte de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 83. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal King de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

Figura 84. Estaciones meteorológicas usadas para comparar resultados entre GFS y WRF como forzantes de MOSA.

Figura 85. Rosas de viento para el mes de marzo en Ancud de datos observados (izquierda) y datos pronosticados GFS (derecha).

Figura 86. Rosas de viento para el mes de mayo en Ancud de datos observados (izquierda) y datos pronosticados WRF (derecha).

Figura 87. Rosas de viento para el mes de marzo en Chaitén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados GFS (derecha).

Figura 88. Rosas de viento para el mes de mayo en Chaitén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados WRF (derecha).

Figura 89. Rosas de viento para el mes de marzo en Puerto Aysén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados GFS (derecha).

Figura 90. Rosas de viento para el mes de mayo en Puerto Aysén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados WRF (derecha).

Figura 91. Cronología del desarrollo e implementación del componente observacional del sistema operacional

Figura 92. Red de mareógrafos que disponen información en línea a través del portal www.ioc.org presentes en el sur de Chile, los cuales son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

Figura 93. Esquema de plataforma de observación de Musels con equipos marinos (INW y WQM) a 4 m. de profundidad. A la derecha se observa la estación meteorológica instalada en estas plataformas.

Figura 95. Error en la lectura de temperatura del aire con saltos escalonados.

Figura 96. Zonas identificadas para ubicación de plataformas de observación.

Figura 97. Torres de telefonía celular en el mar interior de Chiloé. Fuente: http://antenas.subtel.cl

Figura 98. Ubicación de probables zonas para instalación de plataformas de monitoreo.

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Parámetros básicos del dominio de Chiloé-Aysén.

Tabla 2. Parámetros básicos del dominio de Magallanes.

Tabla 3. Tiempos de cálculo con distintas configuraciones de paralelización con el dominio de Chiloé-Aysén y Magallanes con el objeto de buscar la configuración más eficiente en cuanto a tiempo de cómputo.

Tabla 4. Posiciones de los mareógrafos utilizados en la evaluación del nivel del mar en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Tabla 5. Porcentaje de energía potencial (PE) de los constituyentes semidiurno M2 y S2 del nivel de mar observado y pronosticado en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Tabla 6. Valores de correlación (R %), error cuadrático medio (RMS), error medio absoluto (MAE) y desviación estándar (BIAS) entre el nivel del mar observado y pronosticado en el dominio Chiloé Aysén de MOS.

Tabla 7. Valores de correlación (R %), error cuadrático medio (RMS), error medio absoluto (MAE) y desviación estándar (BIAS) de la constituyente M2 en la series observada y pronosticada en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Tabla 8. Posiciones de estaciones de CTD utilizadas en la evaluación del campo de masa en el dominio de Chiloé Aysén de MOSA.

Tabla 9. Características de los sistemas de monitoreo oceanográfico disponible en el sur de Chile.

RESUMEN EJECUTIVO

Durante el último tiempo la oceanografía operacional ha alcanzado un grado importante de desarrollo alrededor del mundo siguiendo los pasos de la meteorología en términos de poder predictivo. Un sistema de pronóstico oceanográfico, por tanto, 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.

Sin embargo, el desconocimiento de los límites reales de un cuerpo de agua, especialmente en el caso de un sistema estuarino tan extenso como el del sur de Chile, ha sido uno de los temas preponderantes durante los últimos años, especialmente debido escasa información para tomar decisiones a corto plazo, así como a largo plazo. En el último de estos casos, se ha llevado a cabo un gran esfuerzo por aumentar la densidad de observaciones ambientales y desarrollar sistemas de modelación que permitan zonificar y conocer las interrelaciones entre las áreas acuicultoras. Esto ha permitido, entre otras cosas, una planificación sanitaria y el desarrollo de normativas preventivas más que reactivas. El aumento de observaciones oceanográficas y la aplicación de modelos matemáticos para simular la hidrodinámica en las áreas donde la actividad acuícola está presente han avanzado como una necesidad en pro de una mejor gestión de la acuicultura. Queda aún vigente el desafío de predecir de forma más precisa el transporte de un sinnúmero de elementos en el ambiente marino, como por ejemplo, el transporte de patógenos luego de generado un brote de virus ISA, de manera que permita con antelación tomar las decisiones correctas.

Este proyecto establece el inicio del desarrollo de la oceanografía operacional para la zona Sur-Austral de Chile, dirigida a proporcionar herramientas de análisis y predicción que permitan gestionar problemas tanto en un corto como mediano plazo asociado principalmente a la acuicultura. Esta herramienta entregará información ambiental relevante en casos de dispersión de patógenos, vertidos de hidrocarburos, deriva de objetos flotantes, naufragios y mayor comprensión de la dinámica estuarina, entre otros.

Se elaboró un diseño para el desarrollo de un sistema operacional dividiéndolo en 3 etapas. Este marco conceptual consiste en una serie de módulos que deben desarrollarse durante estas 3 etapas. Estos módulos incluyen: Sistema de observación en tiempo real, sistema de control y asimilación de datos, modelo atmosférico, submodelo de agua dulce, modelo hidrodinámico y plataforma de visualización de datos.

Se implementó un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS_AGRIF, con pronósticos a 48 horas de variables oceanográficas (nivel del mar, temperatura, salinidad y corriente), desarrollándose la automatización de los elementos que alimentan el modelo. Se dividió en 2

dominios el área de estudio, uno que comprende los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén y otro exclusivo para la región de Magallanes. Este modelo utiliza condiciones iniciales y de borde desde el modelo global Mercator e información atmosférica desde un modelo atmosférico operacional de la Dirección Meteorológica de Chile basado en WRF.

De la evaluación de MOSA se desprende que para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido menos demandante computacionalmente y a la vez más estable, lo que permite gestionar los recursos informáticos de manera más eficiente, permitiendo una mayor cantidad de trabajo en el proceso de evaluación y calibración.

Para el dominio Chiloé Aysén, MOSA logra pronosticar de manera confiable el nivel del mar en los puntos de control, obteniendo correlaciones cercanas al 90 % en todos los casos, y logra también reproducir la componente M2, principal constituyente armónica de la marea. Este rasgo fue parcialmente replicado en las corrientes, donde elipses de corriente de marea para M2 reflejan un mayor ajuste de MOSA en zonas donde el transporte por marea se hace significativo.

El campo de masa arrojó resultados variables, no logrando reproducir la estratificación adecuadamente en la mayoría de los casos. La temperatura aún está alejada de los valores observados, no siendo capaz de reproducir la termohalinas observadas y mostrando valores de +2ºC de diferencia con lo observado en toda la columna. Todo esto estaría indicando que las condiciones iniciales basadas en el modelo global MERCATOR son inadecuadas para zonas estuarina internas, a su vez parece claro que existe una subestimación del volumen de agua dulce que ingresa al sistema marino, sin embargo es necesario esperar un tiempo suficiente para estudiar la evolución del modelo y su capacidad de estabilizarse ya que este se está.

Se migró desde un forzante atmosférico de características globales (GFS) a uno con un enfoque más local, basado en WRF, el cual presentó mayor consistencia en los puntos evaluados, permitiendo una continuación en su uso a través de una futura implementación de un modelo operacional de WRF de mayor resolución exclusivo para MOSA.

En esta etapa de desarrollo del proyecto se tiene un modelo operacional, capaz de generar pronósticos a 48 horas de corrientes, salinidad, temperatura y nivel del mar, que si bien aún se encuentra en etapa de pruebas, ha evidenciado una evolución positiva en los resultados, desarrollando en ciertas zonas las estructuras que muestra la observación directa, especialmente en zonas donde la influencia mareal es mayor. Por su parte la componente baroclínica de la circulación aun exige un gran número de desafíos por superar. Estos desafíos se componen de diversos elementos, por una parte el trabajo dentro del modelo, relacionado con mejoras en las parametrizaciones, el modelo de elevación digital, la resolución de la máscara, el ingreso de fuentes de agua dulce y mejorar el forzante atmosférico. Y por otra parte se encuentra la componente

observacional, la cual es un pilar fundamental en el sistema, ya que de ella obtendremos la cuantificación real del error de los pronósticos, y nos permitirán mejorar las condiciones iniciales del modelo.

Se realizó un diagnóstico sobre la situación actual de sistemas oceanográficos observacionales en sur de Chile. Desde la región de los Lagos a Aysén se identificaron 4 puntos de observación permanentes, de los cuales, tres de ellos presentan posibilidades ciertas de ser utilizadas en el sistema operacional, básicamente por la calidad de sus datos. Estas se ubican en canal Dalcahue y canal Lemuy en Chiloé central, mientras que la restante se ubica en canal Puyuhuapi, todas pertenecientes a instituciones académicas. El resto de las observaciones o presentan datos no confiables o no se encuentran disponibles para su uso. Se generaron los vínculos con las instituciones responsables, Núcleo Milenio Musels y Copas Sur-Austral, para incluir esta información dentro del sistema operacional con especial énfasis en su uso por parte del modelo de pronóstico.

Sumado a los 3 puntos de observación anteriormente descritos. IFOP se encuentra implementando 3 sistemas de observación en tiempo real que cuentan con parámetros atmosféricos (presión atmosférica, viento, humedad relativa, temperatura del aire) y marinos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y presión). El sistema, en su fase de pruebas, presentó una falla electrónica asociada a sobre carga del sensor de viento, esto retraso la puesta en marcha, sin embargo, esta falla ya está siendo corregida y prontamente estarán desplegados para el periodo de pruebas que corresponde. Con la puesta en marcha de estos sistemas, se contará en un futuro cercano, con 6 puntos de observación con capacidad para transmitir información en tiempo real.

1. ANTECEDENTES

Del afán por mejorar la gestión y el control de las áreas de explotación marinas surge la necesidad por implementar sistemas de pronósticos oceanográficos que permitan anticipar escenarios de circulación a corto plazo y que permitan la toma de decisiones en el manejo de dichas áreas.

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, defensa y aplicaciones industriales entre otras.

Durante los últimos 40 años, los modelos numéricos se han desarrollado con gran rapidez, apoyados especialmente por el constante aumento de capacidad de cálculo de las supercomputadora actuales. Aunque hay avances significativos en la aplicación de sistemas mundiales de observación de los océanos, aún sigue siendo limitado el desarrollo simultáneo de las capacidades de observación en áreas que exigen una alta resolución espacial, tales como dominios costeros.

Actualmente existe una infinidad de instrumentos y técnicas que nos permiten medir y registrar variables del ambiente, in-situ y por medio de satélites, en un punto fijo del espacio (medición euleriana) o a través del espacio (medición lagrangiana). Dado el gran tamaño del océano, y el enorme costo asociado a la toma de información o muestreo, no hay un sistema de observación que permita completamente determinar el estado del océano, y es aquí donde los modelos se vuelven relevantes y a la postre esenciales, pues su objetivo es lograr replicar aquellas condiciones observadas en puntos discretos del espacio sobre toda su extensión espacial y temporal.

En este contexto GODAE, Global Ocean Data Assimilation Experiment, organización internacional que desarrolla la oceanografía operacional a escala global para la promoción de sus recursos entre la comunidad científica para beneficio de la sociedad (GODAE 1997), cimentó las bases de la oceanografía operacional a través del desarrollo de la asimilación de datos de observaciones in-situ y satelitales junto con los más avanzados modelos de circulación oceánica global. Así pues, esta extensa labor es fragmentada entre diversos colaboradores y paneles y coordinada por la oficina central, como lo muestra la **Figura 1**. En los últimos años instituciones de todo el mundo han empezado a desarrollar a nivel pre-operacional y operacional plataformas a escala global y de cuenca con sistemas de pronósticos a corto plazo.

Modelo Oceanográfico Operacional

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 2**, 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.

Observaciones

Las observaciones son la base para construir un modelo operacional. Son la fuente de los forzantes y condiciones iniciales de los modelos numéricos, son los datos que el modelo asimila 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.

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).

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 encuentra 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.

En resumen, un sistema de predicción oceanográfico consta de 3 etapas o 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 dinámicas del sistema.

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 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 coordinada 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 realísticas, esto es, disponer de batimetrías de calidad y detalladas que den

solución en los modelos globales 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.

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 3**). También establece una base para que en etapas posteriores del proyecto se comience el desarrollo de técnicas de asimilación de datos, las cuales suponen un desafío mayor, debido a las pocas experiencias nacionales en este ámbito y el carácter experimental que posee actualmente.

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

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 And 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 y un modelo de error para validación de datos, buscándose finalmente un análisis de los defectos primarios en el modelo dinámico o de la observación del sistema. Una vez que un sistema de predicción se ha validado por la prueba de hipótesis formal u otros medios, el sistema de asimilación de datos puede utilizarse para diseñar y predecir el rendimiento de los futuros sistemas de observación. Para este propósito se puede realizar una simulación de un sistema de observación experimental, utilizando la llamada prueba del gemelo idéntico, y así evaluar el impacto de las observaciones presentes y futuras pueden tener en la modelación. Una evaluación de este sistema fue realizada por Zhang *et al*. (2007).

Sistemas operacionales en el mundo

Francia posee varios sistemas operacionales, entre ellos algunos de carácter global como MERCATOR, el cual otorga condiciones de borde y condiciones iniciales a distintos modelos operacionales en el mundo. También posee el PREVIMER, sistema sinóptico de predicción que entrega pronósticos de condiciones oceanográficas para las costas de Francia. El sistema operacional de pronóstico oceanográfico de Francia, Previmer (http://www.previmer.org), es un sistema altamente desarrollado, que se compone de todos los elementos que debe poseer un sistema de estas características, por lo que su arquitectura nos puede generar una idea conceptual básica de cómo se debe desarrollar un sistema predictivo, el cual por filosofía se construye de la combinación entre un modelo de pronostico y un proceso de asimilación de datos.

Este sistema operacional funciona entregando pronósticos de temperatura, salinidad, corriente, nivel del mar, olas, concentraciones de nutrientes y zooplancton a lo largo de la costa de Francia, incluyendo el canal de la Mancha, la bahía de Biscay y el mar Mediterráneo. Las validaciones de sus modelaciones las realizan con datos ambientales in-situ y a través de imágenes satelitales.

La red de observaciones in situ utilizadas en la validación del modelo y para asimilación de datos está distribuida en 2 zonas geográficas, el océano Atlántico en la costa norte y el mar Mediterráneo en la costa sur.

Las corrientes se miden In situ a través de una red de radares HF dispersos en la costa norte. Estos Radares de alta frecuencia proporcionan mediciones en tiempo real de las corrientes superficiales, altura de las olas y la dirección del viento. El rango de operación de los radares WERA desarrollados en la Universidad de Hamburgo, Alemania, los cuales son los utilizados en el sistema Previmer, varía según la resolución deseada, por ejemplo:

Largo alcance: 150 a 300 Km, con una resolución de 3 a 6 kilómetros
Alcance medio: 75 a 150 km, resolución de 1.5 3 kilómetros
Corto alcance: 30 a 75 km, resolución de 0.3 a 1.54 kilómetros.

Por su parte, las mediciones de olas, temperatura, salinidad, nutrientes y producción primaria se realiza con una amplia red de Boyas oceanográficas (24 Boyas en el mar del norte y 17 boyas en el mar Mediterráneo). Para complementar la información de las boyas, se utilizan imágenes satelitales de temperatura superficial del mar (SST), salinidad superficial del mar (SSS), turbidez, y producción primera, mientras que para medir el nivel del mar utilizan una red de mareógrafos en la costa.

Todas estas fuentes de medición (boyas, radares, mareógrafos e imágenes satelitales) otorgan información en tiempo real. Esta información queda disponible en la página, mientras que sus datos son introducidos en el modelo para corregir sus condiciones iniciales, aumentando la certidumbre de los pronósticos (asimilación de datos), y a su vez permite visualizar el desempeño del modelo en tiempo real.

Noruega 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, pudiendo realizar modelaciones sobre todo el dominio o zonas arbitrarias. 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). Entre las aplicaciones de Norkyst-800 se encuentra el desarrollo racional de la acuicultura salmonera, lo que junto a la topografía de la línea de costa noruega, hacen de este sistema un buen ejemplo análogo para las costas chilenas.

En Canadá, el equipo científico de Oceanografía Operacional del Departamento de Pesquerías y Océanos (DFO) perteneciente al Instituto Maurice Lamontagne ha construido un modelo de predicción (SLGO, Saint Lawrence Global Observatory) de corrientes, temperatura y cobertura por hielo en el estuario y golfo del río San Lorenzo, de vital importancia para las comunicaciones portuarias del país entre las grandes ciudades de la región de los Grandes Lagos y el Atlántico exterior. En este sistema se encuentran integrados un modelo numérico 3D oceanográfico junto a un modelo de predicción atmosférica del Servicio Meteorológico Canadiense. Este modelo ha sido validado con diferentes parámetros (cobertura, espesor y deriva del hielo, corrientes, temperatura, etc.).

En Estados Unidos la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) tiene en ejecución diferentes modelos de predicción oceánica:

- NCOM (Navy Coastal Ocean Model) es un modelo de predicción de tiempo real a cargo de la Oficina Naval Oceanográfica basado en el Modelo de Océano de Princeton. Arroja información global de la superficie global de los océanos y resultados interpolados en una malla regular horizontal a diferentes profundidades de las aguas territoriales de los EEUU.
- HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) modelo de predicción a 4 días con una resolución horizontal de 1/12 grados y coordenadas híbridas en la vertical. El modelo está alimentado por datos asimilados de altimetrías satelitales, SST satelital, perfiles verticales de temperatura y salinidad de redes de boyas de deriva y ancladas.
- AMSEAS (American Seas) está basado en el modelo NCOM y cubre el Golfo de México y el Caribe con una resolución horizontal de 1/36 grados y 40 niveles verticales. Como HYCOm también se basa en la asimilación de datos (NCODA) de distintas fuentes para forzar el modelo.
- USEAST (United States East Coast) basado en los mismos principios de AMSEAS pero siendo un modelo regional de la zona oceánica de la costa Este de EEUU.
- RTOFS (Real Time Ocean Forecast System) es un sistema de asimilación de datos de predicción a 120 horas operado por el Servicio Meteorológico Nacional.
- CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) es un sistema global integrado atmosférico-tierra-oceánico operado por el Servicio Meteorológico Nacional.

  GFS (GLOBAL FORECAST SYSTEM) es un modelo atmosférico de pronostico desarrollado por el National centers for Environmental Predition (NCEP).

La Unión Europea ha integrado distintos sistemas desarrollados por sus miembros en una sola plataforma, llamada Copernicus (www.copernicus.eu), anteriormente conocido como GMES (Global Monitoring for Environment and Security). Marine Copernicus está orientado a ofrecer productos de oceanografía operacional entre otros, gestionando los productos de MERCATOR.

Ejemplos en Chile: El caso de la acuicultura en el sur de 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.

Básicamente este proyecto buscaba reforzar el monitoreo ambiental de las macrozonas de cultivo del salmón, junto con la configuración de un registro de variables atmosféricas, oceanográficas y biológicas relevantes para la producción acuícola. Así, las empresas dispondrían con anticipación de los pronósticos climáticos, oleaje, mareas y corrientes, mezclas, proliferaciones planctónicas y

disminución de oxígeno disuelto, información de gran valor en el desarrollo de la actividad. Este proyecto contaba con tres grandes unidades de trabajo: monitoreo e integración de información; montaje de un sistema de información geográfico, además de un sistema de pronósticos basados en modelos numéricos de oleaje, hidrodinámico y ecológico para los siguientes cuatro días. El sistema de modelación estaba basado en la suite DHI MIKEZERO v2004, con los módulos hidrodinámicos MIKE 3 HD, oleaje MIKE 21 SW y ecológico EcoLab. El año 2009 y con el antecedente de la crisis del virus ISA que se arrastraba del año 2007, Intesal pone fin al programa de monitoreo y pronostico ambientales, quedando el desarrollo de este sistema truncado.

De este caso se pueden derivar algunas conclusiones que son de conocimiento personal de unos de los autores de este informe, quien trabajó en el desarrollo de ese sistema (Elías Pinilla, comunicación personal, diciembre 2015).

Obviando el hecho de que la crisis del virus ISA redujo los presupuestos que involucraban el desarrollo de este sistema, y que finalmente derivó en el cierre del programa, existieron dos situaciones que pudieron impactar de manera importante el desarrollo de sistema:

1) Desarrollo de capital humano: En lo que respecta al desarrollo e implementación de modelos numéricos (circulación, oleaje, ecológico) se utilizó un esquema mediante el cual se contrató una asesoría con el desarrollador de la suite MIKE (DHI), para la implementación completa del modelo además de la plataforma de visualización de la información. Esto derivó en un escaso aporte al desarrollo y mejoramiento del sistema por parte de la institución local, ya que no existía la experiencia suficiente para direccionar, por ejemplo, el proceso de evaluación, calibración y validación del modelo.

2) Plataforma web de información para usuarios: Por otra parte la información presentada en la plataforma para usuarios no parecía adecuada para el tipo de usuarios (no expertos) a los cuales estaba dirigida, esta información se referiría básicamente a mapas con las variables directas del modelo (temperatura, salinidad, vectores, etc.) o bien series de tiempo de puntos específicos, no existiendo aplicaciones derivadas del modelo que pudiesen ser utilizadas de forma más directa por este tipo de usuarios, como alertas ante una situación crítica (bajas de oxígeno, oleaje extremo, etc.), además de esto el modelo no se encontraba evaluado de manera consistente, el error no era conocido, y por tanto su uso no generaba la confianza suficiente.

Sistema integrado de monitoreo y pronostico en la IV Región.

Entre septiembre 2008 y marzo 2012, se desarrolló 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:

- 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.
- 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 individuo basadas 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:

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**).

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 particulada pasivas), esto con el fin de conocer con antelación el posible transportes de materiales riesgosos asociado a la acuicultura (antibióticos, patógenos, etc.)

Cabe señalar que debido al tipo de financiamiento, que es anual, este proyecto está sujeto al correspondiente cierre de ese financiamiento mediante un documento de informe final y que no puede exceder de los 18 meses, por tanto, si bien es cierto que cada etapa constituye en la formalidad un proyecto con su respectivo informe final, el desarrollo del sistema operacional solo debe entenderse como concluido al finalizar la etapa III.

Proyectos en el área de oceanografía ejecutados por la División de Acuicultura de IFOP.

La División de Investigación en Acuicultura del Instituto de Fomento Pesquero ha desarrollado desde el año 2010, mediante fondos del programa ASIPA, una línea de investigación asociado a la caracterización oceanográfica y modelación hidrodinámica como herramienta en gestión de la acuicultura en Chile. Hasta la fecha se han realizado una serie de proyectos con objetivos particulares, pero con un eje común, aumentar la cobertura de mediciones oceanográficas y desarrollo de modelos hidrodinámicos en toda la zona sur austral de Chile (X a XII regiones).

Los proyectos anteriormente descritos tienen una fuerte componente observacional. Las observaciones están referidas principalmente a variables físicas como: corrientes a través del fondeo y ADCPs remolcados **(Figura 5),** así como también de variables atmosféricas, nivel del mar, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto entre otras, la mayor parte de estas mediciones son de al menos 30 días. Por otra parte, se han implementado un número importante de modelos de diferentes escalas espaciales utilizando para esto un modelo en volúmenes finitos (MIKE 3 FM), software licenciado de origen Danés (DHI). La información de estos proyectos puede encontrase en los informes técnicos (Pinilla, 2012a; Pinilla, 2012b; Pinilla, 2013; Pinilla, 2015 y Soto, 2015) de acceso público en http://biblioteca.ifop.cl/. Esta información será de gran utilidad para etapas posteriores a esta, para procesos de calibración del modelo numérico.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Desarrollo de un sistema de predicción operacional regional oceanográfico para la zona Sur Austral de Chile, X a XII regiones.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Objetivo Nº1

Desarrollo de un sistema de predicción de las condiciones generales de circulación atmosférica y oceanográfica para las X, XI y XII regiones, dirigido a proporcionar resultados de baja definición en todo el dominio propuesto.

2.2.2. Objetivo Nº2

Desarrollar un estudio de evaluación de tecnologías asociadas a la obtención información en tiempo real desde terreno y su producción para diferentes usuarios.

2.2.3 Objetivo Nº3

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

3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo Nº1

Desarrollo de un sistema de predicción de las condiciones generales de circulación atmosférica y oceanográfica para las X, XI y XII Regiones, dirigido a proporcionar resultados de baja definición en todo el dominio propuesto.

Para desarrollar este objetivo a través de las diferentes etapas del proyecto, se han ejecutado distintas actividades que han sido necesarias para implementar un sistema de predicción oceanográfico, ellas son:

- Diseño del sistema de predicción sinóptico para el Sur de Chile.
- Construcción e implementación del modelo hidrodinámico.
- Automatización de procesos y simulación en modo operacional.
- Implementación de una página web.
- Resultados del modelo, evaluación y calibración.

a) ***Diseño del sistema de predicción sinóptico***

Se generó el diseño del sistema de predicción operacional basado en información bibliográfica sobre sistemas similares implementados en otros lugares del mundo, fundado en componentes de modelación y observación oceanográfica. Para este caso el diseño obedece a un desarrollo de 3 etapas, las cuales se encuentran circunscritas al 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 en la zona sur austral de Chile para aplicaciones a problemáticas asociadas a la acuicultura.

A través de los resultados obtenidos en la primera etapa, se somete a constante revisión el desempeño de 3 ejes principales: Un uso más eficiente de las capacidades computacionales disponibles, mayor estabilidad del modelo numérico y mejor consistencia en los resultados. Estos puntos son analizados periódicamente.

b) Construcción e implementación del modelo hidrodinámico.

Para este proyecto se incluye el desarrollo de una de las componentes del sistema operacional que es el modelo numérico de pronósticos, denominado Modelo Operacional Sur Austral (**MOSA** en adelante). Este 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).

Modelo numérico:

ROMS resuelve las ecuaciones primitivas de conservación del momento, de conservación de energía y de conservación de masa (continuidad).

Consideraciones

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

i) 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

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

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

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

iv) 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

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

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

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

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

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

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

a) $\frac{\partial \eta}{\partial t} = w$, condición cinemática,

b) $K_{Mv}\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho 0}$;

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

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

d) $K_{Sv}\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{s(E-P)}{\rho 0}$, 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 (Ver **Figura 6**).

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 entre de una manera suave y no perturbada, para no generar inestabilidades. Estas condiciones de borde se obtendrán de modelos globales MERCATOR y GFS (ver **Figura 7**).

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 modelos atmosféricos globales (GFS, ECMWF). Sin embargo, durante el transcurso de esta etapa se comenzara a utilizar 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 (ver **Figura 8**)

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). (**Ver Figura 9**).

Dominio

El tipo de mallado horizontal utilizado en **MOSA** es del tipo estructurado, donde cada elemento es un rectángulo, 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), (ver **Figura 10**).

El dominio de **MOSA** comprenderá 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 11**).

c) Automatización de procesos y simulación en modo operacional.

El funcionamiento del sistema operacional en esta etapa está compuesto por 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.

MOSA generará las descargas de datos necesarios para alimentar el modelo (condiciones de borde, condiciones iniciales, y forzantes atmosféricos) a través del uso de "script shell" y "cron", rutinas de automatización de procesos basadas en Phyton y OpenDapy.

La operación de MOSA se ilustra en la **Figura 12**, donde se observan los hitos relevantes del sistema. Suponiendo que el sistema comenzara un día domingo, las descargas de datos se inician a las 2:30 am, con una duración aproximada de 3.5 horas (suponiendo un ancho de banda fijo y continuo). Una vez finalizada la descarga, se inicializa el modelo, el cual simularía en la modalidad -1 +3, lo que significa, un día atrás y 3 adelante, considerando el mismo día que se realiza el cálculo como pronostico. Esto se hace para generar estabilidad, y poder entregar un pronóstico de circulación a un horizonte de 48 horas, antes de las 00:00 horas del día siguiente, de manera que los resultados del pronóstico se generan dentro de las 24 horas siguientes al inicio de la descarga de datos. La descarga, la corrida del modelo y la generación de figuras, así como el almacenamiento de datos se realiza en el servidor de IFOP ubicado en la base de Putemún, Chiloé.

d) <u>Implementación de una página web.</u>

Una vez generado el pronóstico, se procesan las salidas del modelo, se generan imágenes y estas son subidas a la página web www.iproach.cl, presentando pronósticos de circulación, temperatura, salinidad, nivel del mar y viento, para ambos dominios.

En una primera etapa esta información será solo de uso privado, para personal IFOP, Subpesca y Sernapesca, conscientes de que se trata de una puesta en marcha piloto, los resultados obtenidos no deben considerarse como un resultado preciso, ya que en esta etapa, solo se busca iniciar la operación y automatizar los procesos, siendo una aproximación gruesa de las propiedades hidrodinámicas. Etapas posteriores están orientadas a mejorar la precisión de los resultados del MOSA.

El sitio de Información, Pronósticos y Observaciones Oceanográficas Australes de Chile (www.iproach.cl), será implementado sobre un Sistema de gestión de contenidos o "CMS" llamado "Joomla". Este permite desarrollar sitios web dinámicos e interactivos. Permite crear, modificar o eliminar contenido de un sitio web de manera sencilla a través de un Panel de Administración. Es un software de código abierto, desarrollado en PHP y liberado bajo licencia GPL. Este administrador de contenidos puede utilizarse en una PC local (en Localhost), en una Intranet o a través de Internet y requiere para su funcionamiento una base de datos creada con un gestor de bases de datos (MySQL es lo más habitual), así como de un servidor HTTP Apache.

El sitio www.iproach.cl a través de sus distintos menús, mostrará información a través de artículos de imágenes, gráficos, animaciones flash. Información que se subirá a la plataforma a través de un panel de control o "cpanel" que conecta al "webhosting" o a través de un servidor FTP de forma remota.

e) Resultados del modelo, evaluación y calibración.

Los resultados de MOSA 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, 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.

3.2 Objetivo N°2

Desarrollar un estudio de evaluación de las tecnologías asociadas a la obtención de información en tiempo real desde terreno y su producción para diferentes niveles de usuarios existentes.

Este objetivo se encuentra relacionado con la componente observacional del sistema operacional. Sin embargo, no busca ser la solución definitiva a la ausencia de monitoreo de largo periodo y en tiempo real, más bien, es una alternativa a la falta de información y por sobre todo, una manera de generar la vinculación entre observaciones in situ y los modelos de pronóstico en cuanto a

calibración y asimilación de datos, de manera de generar los conocimientos necesarios para abordar estas temáticas en un futuro, cuando la disponibilidad de una mayor densidad de observaciones sea posible.

Las actividades que componen este objetivo son las siguientes:

a) Sistemas de observación disponibles en la actualidad.
Para este caso se realizó una revisión de las características de sistemas de observación oceanográfica disponibles en el sur de Chile, tales como: ubicación, variables medidas, institución a cargo, disponibilidad de la información, tecnologías asociadas a la transmisión de datos o almacenamiento.

b) Integración de observaciones disponibles al sistema operacional
Posterior a evaluación de los sistemas de observación actualmente disponible, se generaron las gestiones para contar con aquella información de manera tal de disponer con esa fuente de datos a través de convenios con las Instituciones responsables de estas observaciones.

c) Adquisición de equipamiento de bajo costo para nuevos puntos de observación
Este equipamiento adquirido por IFOP consta de lo siguiente:

- 3 equipos multiparámetro INW: Conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, presión.
- 5 Estaciones meteorológicas Gill: Viento, presión atm., temperatura, humedad relativa.
- 5 Logger de almacenamiento y transmisión de datos en tiempo real via GSM (red celular).

Para generar una integración de todos los componentes se contrató a la empresa Unisource Ingeniería, de manera de que pudiesen integrar los componentes instrumentales y de comunicación. La puesta a punto entre decisión de compra de equipos y el sistema de integración tomo más tiempo de lo presupuestado, lo que ha generado un retraso en la puesta en marcha de los sistemas de observación, sin embargo, realizadas las primeras pruebas, se prevé que para el mes de agosto entren en total operación.

3.3 Objetivo N°3

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

Este objetivo describe las actividades realizadas en cuanto a difusión de la implementación del sistema operacional, por una parte con talleres ejecutados con la contraparte técnica de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, pero también de difusión de metodologías y resultados en talleres abiertos ejecutados en distintos lugares ante público diverso como: Académicos, funcionarios de organismos estatales, consultoras, etc.

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Reuniones de coordinación con la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SSPA):

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.

<u>Reunion°1</u>

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.
Asisten:

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.
Asisten:

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.
Asisten:

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Elias 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 IFOPO para el desarrollo de este modelo.

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

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

4.3 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.

<u>Taller de difusión n°1</u>

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, académicos del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, personal de la Dirección Meteorológica de Chile, personal de la Subsecretaria de Pesca 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, esturianos, 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)
DGA

4.4 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 (Dalchaue y Conchi). 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.

5. RESULTADOS

5.1 Objetivo Nº1

Desarrollo de un sistema de predicción de las condiciones generales de circulación atmosférica y oceanográfica para las regiones X, XI y XII Regiones, dirigido a proporcionar resultados de baja definición en todo el dominio propuesto.

Este objetivo se ha ejecutado a través de diversas actividades, todas necesarias para implementar un sistema de predicción oceanográfico:

- Diseño del sistema de predicción sinóptico para el Sur de Chile.
- Construcción e implementación del modelo hidrodinámico.
- Automatización de procesos y simulación en modo operacional.
- Implementación de una página web.
- Resultados del modelo, evaluación y calibración.

5.1.1 Diseño conceptual:

Durante la ejecución de la etapa I del proyecto, se construyó un diagrama conceptual que contiene todos los elementos que deben estar presentes en el modelo operacional definitivo (MOSA). Este modelo conceptual incorpora módulos que en esta fase inicial no serán implementados o solo parcialmente, pero que son parte fundamental de este, como el Modelo Biogeoquímico, el monitoreo y asimilación de datos. El diagrama de la **Figura 2**, 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 están por la necesidad de una comprensión científica junto con el tipo de información oceanográfica requerida por los tomadores de decisiones.

Si profundizamos en el marco conceptual más propio del sistema de modelación nos encontramos que la inicialización de los pronósticos, pasa en primera medida por tener un sistema de asimilación de datos que sea capaz de capturar la variabilidad ambiental y corregir de alguna forma las desviaciones que pueda tener el modelo. En este sentido, la información proveniente de satélites o boyas es preponderante. Posteriormente, se debe proveer de información de los forzantes que interactúan en el sistema marino, como por ejemplo, la información atmosférica que debe ser provista por modelos atmosféricos operacionales y las condiciones de borde que también pueden ser extraídas de modelos de mayores escalas o climatologías adecuadas de la variación del contorno del sistema que quiera ser simulado.

La **Figura 1** muestra el marco conceptual aplicado para un sistema operacional en el mar de Finlandia que indica que pronóstico atmosférico es obtenido por el modelo HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) y el pronóstico de las características hidrológicas de las condiciones de borde en la entrada del Golfo de Finlandia por el modelo operacional HIROMB (Modelo de Alta Resolución Operacional para el Mar Báltico). El modelo utiliza los resultados de los cálculos del modelo HIROMB como condiciones iniciales cuando se inicializa el cálculo operacional en el primer paso de tiempo (tiempo T=0). Cuando los datos de las observaciones de campo se encuentran disponibles, se utiliza un procedimiento de asimilación de datos para corregir condición inicial.

De acuerdo a lo anterior, se propone un marco conceptual para el desarrollo de la oceanografía operacional en la zona sur-austral de Chile de acuerdo a lo que se observa en la **Figura 13.** En este diagrama es posible observar la dinámica del sistema. Cabe señalar que este marco conceptual implica un desarrollo a largo plazo, por lo que no necesariamente se desarrollarán todas las etapas durante este proyecto. Los módulos contemplados en el marco conceptual son:

a) Observaciones: Monitoreo de variables océano-atmosféricas en la zona sur austral de Chile. Este sistema de observaciones puede realizarse a través de boyas oceanográficas o estaciones de otro tipo (ej. Estaciones meteorológicas costeras). También se puede incluir aquí a toda la información proveniente de satélites. Las variables que pueden ser monitoreadas a través de boyas oceanográficas pueden tener un amplio rango de características, desde: corrientes, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, hasta mediciones atmosféricas de estaciones meteorológicas montadas en boyas. Por su parte, la información satelital permite estimar parámetros como: temperatura superficial del mar, clorofila, salinidad, nivel del mar, etc. Estos sistemas de monitoreo deben contar con algún tipo de comunicación remota, esto puede ser a través de comunicación satelital, VHF, GSM, Inmarsat e Iridium (sistema satelital que permite la transmisión de datos oceanográficos en tiempo casi real).

b) Sistema de control, procesamiento y asimilación de datos: Este sistema recepciona los datos provenientes de las observaciones y genera un control de calidad de manera que sólo queden disponibles para la visualización directa, post procesamiento, validación y/o asimilación de datos, aquellos datos que superen el filtro de calidad. El sistema de asimilación de datos, busca generar puntos de entrada de datos reales dentro de la modelación numérica de manera tal de generar una corrección de los datos simulados, es decir, la asimilación de datos consiste en reprocesar datos de satélite o estaciones en campo en los modelos numéricos, para mejorar los cálculos hechos previamente y de este modo emitir un pronóstico más acertado. Si bien es cierto, el sistema de control y procesamiento de datos puede funcionar de manera independiente al sistema de asimilación, se ubicó dentro de un mismo sistema que elaborará post procesamiento con datos reales.

c) Modelo atmosférico: Este módulo proporciona las forzantes superficiales en los modelo de aguas ya sean estos, hidrodinámicos o biogeoquímicos. El modelo atmosférico regional funciona de manera operacional para proporcionar distintas variables a plazo de cierta cantidad de días. Para la implementación de este sistema se debe contar con información de observaciones (validación y asimilación de datos) así como también de modelos atmosféricos (WRF en nuestro caso) que permitan generan condiciones de contorno para el modelo regional. Las variables que son posibles distinguir aquí son: Viento (dirección y velocidad), presión atmosférica, radiación solar, temperatura de aire, humedad relativa, etc.

d) Modelo hidrodinámico: Este módulo realiza el cálculo de la dinámica del océano basado en información de campo (validación, asimilación de datos) así como también de modelo global (MERCATOR, HYCOM, etc.) para generación de condiciones de borde e iniciales. Las forzantes atmosféricas son provistas por el módulo de modelación atmosférica, mientras que los flujos de agua dulce son determinados por el sub-modelo de agua dulce. Las variables que pueden calculadas son: corrientes (dirección y velocidad), temperatura, salinidad, etc.

e) Sub-modelo agua dulce: Este módulo cumple la función de realizar los cálculos numéricos o bien proporcionar climatologías de los puntos de entrada de agua dulce al sistema marino, ya sea por variaciones de los caudales de los ríos, o bien por derretimiento de glaciares, procesos importantes como fuentes de ingresos de agua dulce dentro del sistema de fiordos y canales.

f) Modelo globales: Estos modelos que pueden ser tanto atmosféricos como oceánicos cumplen la función de generar condiciones iniciales y de contorno para la inicialización de los modelos regionales. La mayor parte de los datos de estos modelos se encuentran liberados para su uso público. Además usan como fuente de su propia inicialización los datos reales recopilados como parte del sistema global de asimilación de datos basados en observaciones de tierra y océano en todo el mundo.

g) Modelo Biogeoquímico: Este módulo tiene como función obtener simulaciones de calidad de agua, entendiendo esto como la dinámica de oxígeno disuelto, Fitoplancton, zooplancton, clorofila y nutriente entre otros. Este modelo es acoplado al modelo hidrodinámico de donde obtiene condiciones básicas de corrientes, salinidad y temperatura. Este sistema también debe incluir el uso de datos de observaciones tanto para validación como para asimilación de datos. Si bien es cierto, que dentro del presente proyecto no incluye el desarrollo de este tipo de modelos, un proyecto paralelo de IFOP, "Estudio del desempeño ambiental de la acuicultura en chile y su efecto en los ecosistemas de emplazamiento", tiene como uno de sus objetivos el desarrollo de un modelo biogeoquímico, en el mar interior de Chiloé, con el énfasis en la dinámica de

oxígeno disuelto. Es por tanto esperable que este desarrollo pueda incorporarse más adelante al sistema operacional.

h) Plataforma usuarios y aplicaciones: Este sistema está encargado de proporcionar la información en forma de datos o visualizaciones del estado atmosférico-oceánico, proveniente tanto de observaciones en tiempo real o climatologías, modelos atmosféricos, hidrodinámicos, biogeoquímicos y aplicaciones para usuarios determinados, en la zona sur-austral de Chile (por ejemplo dispersión de patógenos o derrames de petróleo).

Dentro del desarrollo de la actual etapa del proyecto, el énfasis está puesto en el desarrollo de un modelo hidrodinámico que sea capaz de proporcionar pronósticos a 48 horas de plazo, junto con la generación de una plataforma para la visualización de estos resultados.

Cronología desarrollo sistema operacional:

El desarrollo del sistema está dividido en 3 etapas, en cada una de estas etapas se abordan distintos componentes del sistema operacional. Las etapas y sus principales actividades son mostradas en el esquema de la **Figura 4** y detalladas a continuación:

I Etapa: 2014-2015:

a) Diseño sistema de predicción sinóptico.
b) Implementación y evaluación modelo ROMS.
c) Diagnóstico sistemas de observación oceanográfica.
d) Plataforma web experimental para usuarios.

II Etapa: 2015-2016 (etapa actual):

a) Calibración modelo operacional ROMS.
b) Levantamiento de sistemas de observación oceanográfica en tiempo real:
c) Plataforma web experimental para usuarios.

III Etapa: 2016-2017:

a) Optimización y mejoras del sistema operacional (Agua dulce y Atmosfera).
b) Aplicaciones de transporte de partículas (Conectividad).
c) Puesta en marcha sistema operacional en plataforma web:

El desarrollo de este sistema operacional va orientado a transformarse en una herramienta de gestión ambiental, que sirva, entre otras cosas, como una plataforma de acceso rápido a información relevante para el manejo ambiental y sanitario de la actividad acuícola. Sin embargo, su utilidad va mucho más allá, ya que una herramienta de este tipo tiene un gran potencial, en lo específico, el modelo busca ser una herramienta que otorgue información relevante en:

- Dispersión de patógenos asociados a la acuicultura
- Vertidos de hidrocarburos
- Deriva de objetos flotantes
- Propagación de Floración de Algas Nocivas (FAN)
- Naufragios
- Mayor comprensión de la dinámica estuarina del sur de Chile

5.1.2 Desarrollo componente modelación: modelo numérico ROMS operacional

En conjunto con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción se desarrollaron en la primera etapa los distintos elementos que componen el modelo numérico operacional, la construcción del modelo numérico, los sistemas de automatización de proceso y del desarrollo de la página web que albergará los resultados del modelo numérico (www.iproach.cl).

Las características del modelo oceanográfico estarán limitadas en su diseño y conceptualización por los tiempos de salida que son requeridos para su funcionamiento operacional. Siendo este modelo operacional ideado para realizar predicciones periódicas a un horizonte de 48 horas, los resultados no deben demorarse en obtenerse más de 24 horas. La **Figura 14** presenta un esquema simple del funcionamiento de MOSA en esta etapa.

MOSA será configurado de la siguiente manera:

Dominio: Debido a lo extenso de la zona de canales del sur de Chile, y a la dificultad de evaluar un modelo tan complejo, donde la configuración de la línea de costa fragmenta la zona en innumerables microsistemas, se llegó a la necesidad de construir 2 dominios, uno en la zona Reloncaví – Chiloé – Aysén y otro para toda la zona Austral (región de Magallanes). La construcción de dominios en ROMS se realiza en base a la definición de la máscara, archivo que define que es agua y que no en el dominio. Estas máscaras son construidas en base a la línea de costa y la resolución horizontal, siendo de 1/12 de grado en ambos dominios, se usarán 32 niveles verticales, tipo sigma, donde cada nivel es en función de la batimetría.

El Dominio de MOSA en Reloncaví-Chiloé-Aysén (**Figura 11**), comprende una matriz de 503x601x32 elementos. Este va desde el seno de Reloncaví por el norte, incluyendo al fiordo del mismo nombre, los mares interiores de Chiloé, algunos fiordos de Palena y de la Isla Grande de

Chiloé, y la región de Aysén hasta la Laguna San Rafael, al extremo sur del Canal Moraleda. Los bordes oceánicos se encuentran en el -79°W por el oeste, en el Océano Pacifico, en el 41°S por el norte y en el 47°S en el sur.

Por su parte y debido al compromiso inicial de implementar MOSA en Magallanes, se construyó un dominio para dicha región, el cual posee 854x1014x32 elementos (correspondientes a los ejes geográficos Sur-Norte, Oeste-Este, y profundidad respectivamente). Este comienza desde la Península de Taitao por el norte hasta las Islas de Cabo de Hornos por sur, incluyendo los canales principales hasta el Estrecho de Magallanes, y los cuerpos de agua semi-cerrados interiores, Golfo Almirante Montt, Seno Skyring y Seno Otway. También este dominio incluye gran parte de la costa argentina, presentando bordes en el océano Atlántico. Los bordes oceánicos tanto en el océano Pacifico como en el Océano Atlántico están en 46°s en el borde norte y -57°S en el borde sur. El borde oeste está en -79°W en el océano Pacifico, y el borde este está en -64°W en el océano Atlántico. Las características de ambos dominios se presentan en las **Tablas 1 y 2** respectivamente.

La **Figura 15** presenta las máscaras de los dominios de Chiloé-Aysén y Magallanes respectivamente. Estas máscaras definen que es agua y que es tierra en el dominio. A su vez se han elaborado modelos de elevación digital para ambos dominios con datos batimétricos aportados mayormente por cartas SHOA y de algunos proyectos de investigación de diversas instituciones (**ver Figura 16**).

Los modelos globales de los que se nutre de condiciones de borde a MOSA generan resultados con una periodicidad de 6 horas. Estos modelos son WRF (Weather Research Forecast) para las forzantes atmosféricas y MERCATOR para los forzantes oceánicos (Temperatura, Salinidad, Corriente). De esta manera, el modelo acoplado océano/atmósfera toma los resultados de los respectivos modelos periféricos y dispone de un máximo de 18 horas para completarse.

<u>HARDWARE y Servidores de alto desempeño</u>

El sistema clúster se basa en la unión de varios servidores unidos mediante una red de alta velocidad con S.O Centos 6.4, de tal forma que el conjunto es visto como un único computador. La conexión usada en este equipo en particular es un sistema Infiniband Mellanox IS5022 QDR de 8 bocas que interconecta los servidores y define una interconexión conmutada que permite a muchos dispositivos intercambiar datos de forma simultánea, con gran ancho de banda y baja latencia (**Figura 17a**).

El equipo encargado de procesar las modelaciones consta de los siguientes elementos:

Softwares
S.O Centos 6.4
Compilador Intel C++/Fortran

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 Infiniband QDR

NODO COMPUTO (4 unidades) - SGI C1110_RP6
2 procesadores Intel Xeon E5-2620 de 6 núcleos 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

Otros hardware
Switch Gigabit Ethernet Administrable para red de administración de cluster
Switch Infiniband Mellanox IS5022 QDR de 8 bocas para red de paso de mensajes (MPI)

Dicho equipo se encuentra en las instalaciones del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en Putemún en la ciudad de Castro Chiloé. Este permanece en un cuarto exclusivo debido a su gran tamaño, el cual alcanza 1.90 metros de altura con un ancho de 0,75 metros y un fondo de acondicionado que mantiene una temperatura de 16°C (**Figura17c**) y apartado por el alto ruido que este produce (95 dBA aprox.) (**Figura 17b**).

El clúster se encuentra conectado a la red de área local mediante conexión tipo 568B con cables UTP categoría 6, o cual permite el control y mantenimiento vía remota desde las oficinas del instituto en Putemún o a través de servicio ssh para una conexión remota externa a la de la institución (**Figura 18**).

En cuanto al flujo eléctrico, consta de una alimentación constante de 220V y una batería UPS Tripp-Lite SmartOnline Single-Phase modelo BP192V12-3U la cual proporciona energía de respaldo para 7 horas aproximadas (**Figura 19**).

Capacidad de procesamiento

Mediante la distribución informática supervisora de sistemas de computación de alto rendimiento Ganglia, es posible ver de forma remota estadísticas en tiempo real o histórico de todos los nodos que están siendo monitoreados. Durante la modelación el clúster reparte la carga de procesamiento entre los 12 núcleos de cada nodo esclavo (**Figura 20**). El pronóstico se inicia todos los días de la semana de forma automática mediante scripts a las 2:30am y finaliza a las 11:30am. Utilizando hasta el 100% de los núcleos de los nodos del clúster.

Memorias
Su función principal es almacenar temporalmente información de los discos para ser ejecutada por las CPU. En el caso del equipo se puede ver que constantemente usa por cada nodo un total de 63 Gigabytes, dejando 1 Gigabyte por nodo para el funcionamiento del Sistema operativo (**Figura 21).**

Almacenamiento.
Constantemente el nodo líder almacena en su disco 624 Gigabytes al mes, por lo cual la información se va respaldando en discos de red NAS para su almacenaje definitivo. Al almacenar cantidad de datos de este tamaño, es necesario constantemente ir adquiriendo más equipos Nas y dejándolos conectados vía red LAN al clúster y otros equipos para su uso.

Mapa y funcionamiento sitio web www.iproach.cl se muestra en la figura de todos los lugares y almacenamiento de imágenes en el ftp del servidor web. Cada carpeta contendrá las imágenes de forma separada y serán sobrescritas de forma automática para mantener publicadas y actualizadas diariamente.

5.1.3 Automatización de procesos y simulación en modo operacional.

El funcionamiento del sistema está compuesto al menos por 4 etapas:

v) Preparación del modelo: donde se realiza la descarga de datos de condiciones de borde, así como de forzantes atmosféricos de sistemas operacionales globales e ingreso de fuentes de agua dulce.
vi) Integración de datos a los dominios, convirtiendo los archivos descargados al formato de ROMS-AGRIF.
vii) Inicialización de la simulación a partir de las nuevas condiciones iniciales, definiendo el horizonte de pronóstico y el tipo de paralelización de núcleos.
viii) Levantar resultados en la página web.

Cada una de estas etapas son automatizadas mediante rutinas de ROMSTOOLS para OCTAVE, de modo que sean compatibles con Phyton y OpenDAP

a) Descarga de datos de condiciones de borde

Las condiciones de borde son las que alimentan al modelo a través de sus fronteras con campos de salinidad y temperatura. Estos datos que presentan variabilidad temporal y espacial serán descargados del sistema operacional MERCATOR (Francia) a través de "Copernicus Marine Environment Monitoring Service" (http://marine.copernicus.eu/). Esta descarga, que se realiza con una frecuencia diaria, obtiene datos en un formato nativo de MERCATOR, el cual es llevado al formato de entrada para ROMS, adecuándolo a los dominios a través de interpolaciones e iteraciones. Los archivo de condiciones de borde contienen valores de salinidad, temperatura, salinidad, componentes *U* y *V* de la velocidad de la corriente y el nivel del mar.

b) Descarga de datos de condiciones iniciales

Las condiciones iniciales del modelo son una parte fundamental, que cobra mayor importancia en modelos operacionales, ya que son indicadores del grado de ajuste de los pronósticos. Las condiciones iniciales, son las que le otorgan al modelo los campos físicos en el tiempo 0 de la simulación, ayudando a que éste encuentre un equilibrio de manera más eficiente, por lo tanto son condiciones estáticas, que no varían en el tiempo. Estos datos serán descargados del sistema operacional MERCATOR (Francia) a través de "Copernicus Marine Environment Monitoring Service" (http://marine.copernicus.eu/), de manera simultánea con las condiciones de borde, los cuales vienen en un formato nativo que debe ser integrado a ROMS. Las condiciones iniciales serán los campos de temperatura, salinidad, corriente (U y V) y la superficie del nivel del mar. 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.

c) Descarga del Forzante Atmosférico

El forzante atmosférico de cualquier modelo oceánico es indispensable, ya que gran parte de la circulación superficial, subsuperficial está regulada por el viento (en zonas someras, puede ser toda la columna de agua) , así como el nivel del mar es sensible a

variaciones en el campo de la presión atmosférica, la salinidad es sensible a los balances entre precipitación - evaporación, la temperatura lo es con la radiación solar, entre otras cosas, por lo que el campo de velocidad de agua y el campo de masa están estrechamente vinculados, por lo que es necesario tener un forzante atmosférico acorde a las condiciones naturales de la zona. MOSA va a utilizar como forzante atmosférico datos obtenidos de un modelo operacional implementado por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) basado en WRF, el cual está desarrollado especialmente para el dominio Chiloé - Aysén de MOSA, con una resolución horizontal de 12 km (ver **Figura 8)**. Este modelo genera pronósticos todos los días de los forzantes atmosféricos para 4 días a un intervalo de 6 horas. Este modelo operacional nace de un acuerdo de cooperación entre IFOP y la DMC para el desarrollo de herramientas de predicción sinópticas para el sur de Chile.
Las variables utilizadas son dirección y magnitud del viento a 10 metros de la superficie, esfuerzo del viento, flujo neto de calor superficial (Evaporación -Precipitación), flujo superficial de agua dulce, temperatura del aire sobre la superficie del mar, humedad relativa, tasa de precipitación y radiación solar de onda larga y onda corta.

d) Fuentes de Agua dulce

El ingreso de agua dulce a los sistemas esturianos a través de descargas fluviales, glaciales o pluviales es un mecanismo fundamental en el desarrollo de la circulación estuarina. El agua ingresada posee una densidad menor al agua de mar, al mezclase, esta forma una capa superficial que fluye gravitacionalmente desde su fuente, regulando la profundidad de la picnoclina y la haloclina, compitiendo en forma directa con la influencia del esfuerzo del viento en superficie. Por lo tanto, es un mecanismo que regula la estratificación vertical y horizontal de los canales y fiordos, así como el transporte en capas superficiales. Es necesario poseer cuantificación precisa de los aportes mayores de agua dulce, especialmente los grandes ríos de la zona sur de Chile y los aportes glaciales de los campos de hielo en la Patagonia. En una primera etapa MOSA será alimentado con datos de descargas fluviales de los grandes ríos presentes en los dominios y que cuentan con un monitoreo en tiempo real por parte de la DGA. Otras fuentes más pequeñas serán ingresadas a modo de caudales fijos, estimados por datos climatológicos de la DGA (ver **Figura 9**).

Operación del sistema integrado

El sistema es capaz de obtener de forma automatizada las condiciones de borde, las condiciones iniciales y el forzante atmosférico para periodos de 2 días antes del pronóstico (48 horas) y estos integrarse a MOSA para realizar los pronósticos siguiendo la estructura presentada en la **Figura 14**.

Estos procesos son activados a las 02:30 horas del primer día, iniciando la descarga de condiciones iniciales de borde y forzantes para ambos dominios, estimándose el fin de la descarga a las 6:00 horas para el dominio de Chiloé-Aysén, mientras que para el dominio de Magallanes estas finalizan alrededor de las 8:00 horas del mismo día aproximadamente. Seguidamente, el sistema da inicio a la simulación de ambos dominios comenzando cada dominio al terminar su descarga, utilizando una paralelización óptima de los núcleos, que permite dicha operación dividiendo la cantidad de nodos disponibles en el servidor para cada dominio. La **Tabla 3** presenta los tiempos de cálculo con distintas configuraciones de paralelización con el dominio de Chiloé-Aysén y Magallanes con el objeto de buscar la configuración más eficiente en cuanto a tiempo de cómputo.

El tiempo de simulación del modelo operacional depende principalmente de 5 factores sobre muchos otros de menor significancia. Estos son:

- Resolución horizontal: número de elementos de la malla flexible del modelo.
- Resolución vertical: número de capas o niveles.
- Solución numérica de alto o bajo orden del tiempo de integración y discretización del espacio para resolver las ecuaciones que determinan la hidrodinámica y los campos de densidad de regímenes baroclínicos.
- Tiempo total a simular, siendo en nuestro caso 4 días en total por cada operación para ambos dominios (1 día de “hindcast”, 1 dia de “nowcast” y 2 días de “forecast”).
- Escritura de salida de los datos, en nuestro caso las salidas son horarias, sin embargo en un futuro podrían ser en periodos mayores para mejorar la eficiencia del modelo (e.g 4 o 6 horas).

En términos de operación se ha logrado mantener funcionales los pronósticos para ambos dominios. Sin embargo, la diferencia en el tamaño de las grillas entre ambos dominios se ve reflejada en los tiempos de cómputo que requiere cada dominio. A continuación se presentan los tiempos de cómputo requeridos para cada dominio, y el espacio físico que genera cada dominio entre sus condiciones iniciales, condiciones de borde, forzantes y sus salidas.

Dominio	Variables (horarias)	Espacio en disco (diario)	Tiempo de simulación	Tiempo de Cálculo
Chiloé-Aysén	T, S, u, v, Z	27 GB	96 horas	8 horas
Magallanes	T, S, u, v, Z	75 GB	96 horas	16.5 horas

Las salidas de temperatura (T), salinidad (S), y de corrientes (*U* y *V*), corresponden a campos tridimensionales con valores horarios, mientras que el nivel del mar (Z) corresponde a la superficie del nivel del mar. Los archivos de salida del modelo permiten realizar extracciones de series de tiempo en cualquier punto de los dominios. Si bien el espacio generado por cada simulación es alto, este puede reducirse, e.g cambiado la configuración de salida a periodos más largos (e.g datos cada 4 o 6 horas).
Por el momento en esta etapa se almacenarán los datos de salidas y los archivo con los cuales se construyen las simulaciones, sin embargo, una vez que MOSA comience a ser evaluado de manera más intensiva, se reducirán los archivos de almacenamiento, guardando solo las condiciones iniciales, condiciones de borde, forzantes y archivos de configuración con los cuales se construyen el modelo, para así en un futuro, si existe la necesidad de modelar ciertos periodos, la reconstrucción de tales modelos este fácilmente disponible.

Considerando los tiempos de cómputo de cada dominio, MOSA, se estima que el pronóstico del dominio de Chiloé-Aysén esté disponible a las 14 horas del mismo día.

Dominio MAGALLANES

Originalmente se trabajó con dos dominios, uno que comprende las regiones de Los Lagos y Aysén, y otro que comprendía íntegramente toda la región de Magallanes. Sin embargo en la puesta en marcha del modelo, el dominio de Magallanes demandó una mayor atención debido a la alta inestabilidad que presentó. El tamaño del dominio de Magallanes eleva de manera significativa el número de elementos que posee, siendo más del doble que el de Chiloé Aysén, esto es debido a que comprende una zona bastante más extensa, con una configuración topográfica extremadamente compleja, que da lugar a un sin número de singularidades en la máscara y en la malla del modelo, lo cual implica necesariamente un mayor tiempo de cómputo.

Los complejos patrones de circulación oceánica resultantes de la interacción con la batimetría en una zona de las dimensiones de la Región de Magallanes lo convierten de momento en un ejercicio de modelación inabordable para los recursos disponibles. Producto de las constantes caídas del dominio de Magallanes, no se ha logrado obtener resultados suficientes para poder construir un set de datos necesario para realizar alguna evaluación preliminar. Las corridas presentan errores entre las 8 y 9 horas de iniciada la simulación, y en los pocos días que logró simular (4 días) los resultados presentaron graves incoherencias y errores. Es por esto que no fue posible realizar evaluaciones del dominio. Como consecuencia de lo anterior, y para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, que se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del Modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido estable, y su menor tamaño permite gestionar los recursos computacionales de manera más eficiente, permitiendo una mayor libertad en el trabajo de evaluación y calibración.

5.1.4 Implementación de una página web.

Estos resultados son presentados en la página www.iproach.cl, sitio de Información, Pronósticos y Observaciones Oceanográficas Australes de Chile, el cual es implementado sobre un Sistema de gestión de contenidos o "CMS" llamado "Joomla". Las **Figuras 22, 23 y 24** presentan una captura del sitio web, y su interfaz gráfico, presentado pronósticos de campos superficiales de temperatura y salinidad en el dominio Chiloé - Aysén. Debido a que los resultados de este objetivo son de carácter operacional, deben ser revisados en la página web.

En vista que esta etapa del proyecto solo se contempla el acceso a usuarios limitados a la página, para acceder a ella se debe ingresar un nombre de usuario y una contraseña:

Nombre de usuario: genuser (minúsculas)

Contraseña: iproach2015 (minúsculas)

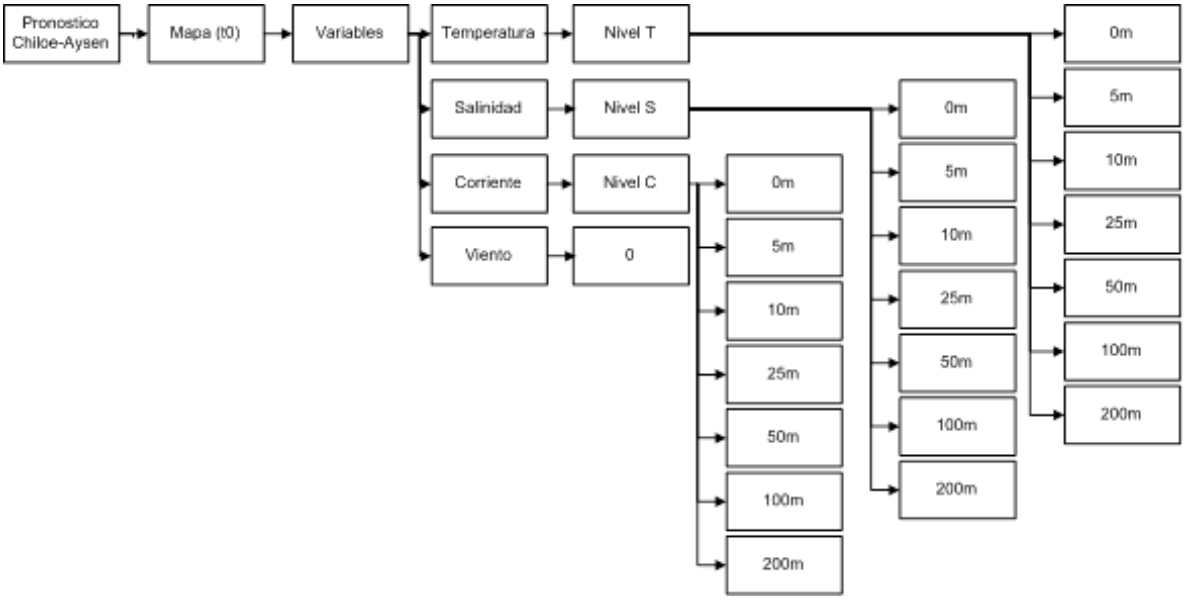
Joomla permite desarrollar sitios web dinámicos e interactivos. Permite crear, modificar o eliminar contenido de un sitio web de manera sencilla a través de un Panel de Administración. Es un software de código abierto, desarrollado en PHP y liberado bajo licencia GPL. Este administrador de contenidos puede utilizarse en una PC local (en Localhost), en una Intranet o a través de Internet y requiere para su funcionamiento una base de datos creada con un gestor de bases de datos (MySQL es lo más habitual), así como de un servidor HTTP Apache.

El sitio www.iproach.cl a través de sus distintos menús, mostrará información a través de artículos de imágenes, gráficos, animaciones flash. Información que se subirá a la plataforma a través de un panel de control o "cpanel" que conecta al "webhosting" o a través de un servidor FTP de forma remota. El diseño actual del sitio IPROACH.cl será renovado por una versión 2.0 del sitio. El cual contendrá un nuevo ordenamiento

Estructura de almacenamiento y visualización

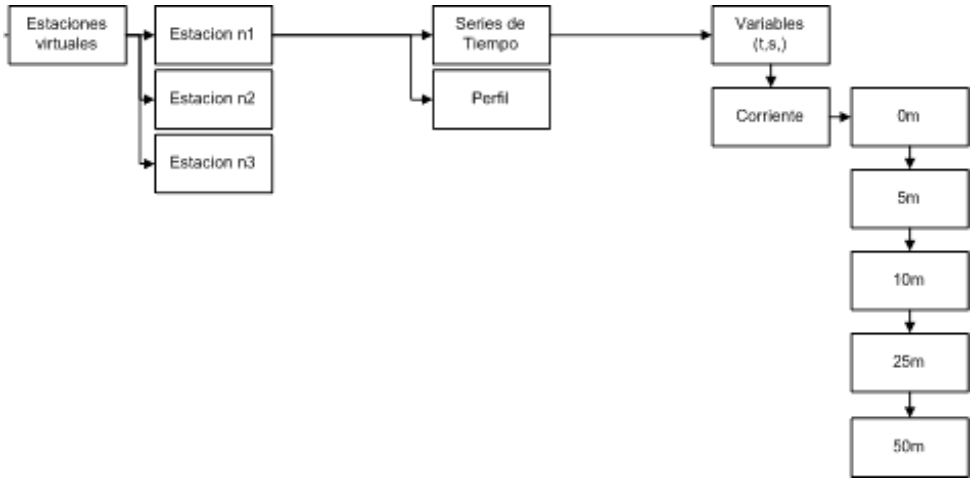
El pronóstico Chiloé Aysén consta de distintos tipos de niveles dentro de un sistema ftp en un servidor web, en el cual se almacena la información diariamente y se va sobrescribiendo para mantenerla actualizada.

Cada nivel tendrá como padre su respectiva variable (Temperatura, salinidad, corriente y viento). Estos puntos se encontrarán dentro de un mapa georreferenciado el cual contiene los puntos de mediciones.



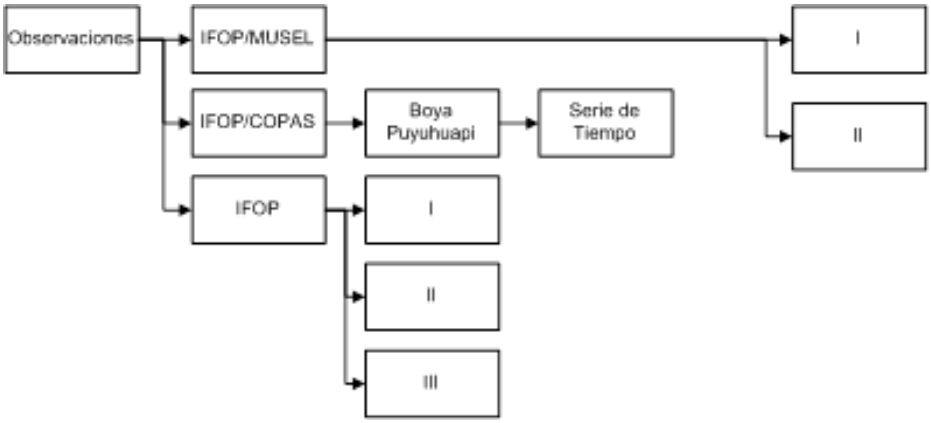
Estaciones virtuales

Al igual que el pronóstico, esta información se almacenara en un ftp con almacenamiento diario y sobrescrito para mantenimiento actualizado de la información En el caso de las estaciones virtuales, se generaran X número de estaciones la cuales constaran con información a elección por estación de series de tiempo con variables o perfiles.



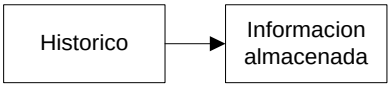
Observaciones

En la opción observaciones se podrá revisar en tiempo real, información obtenida de equipos instalados por IFOP-MUSEL, IFOP-COPAS, IFOP.



Histórico

En este punto la información se ira almacenando en un ftp en el servidor web, pero a diferencia de Pronóstico, y estaciones virtuales, estas no se irán sobrescribiendo, si no que todo lo contrario, se irán almacenando por orden en el tiempo.



5.1.5 Resultados del modelo, evaluación y calibración.

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 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.

Metodología

Para la evaluación del nivel del mar se utilizaron como puntos de control, datos de la red de mareógrafos de Chile, los cuales se encuentran disponibles en la página (http://www.ioc-sealevelmonitoring.org). Se utilizaron datos del mes de septiembre en 4 puntos del dominio de Chiloé Aysén, Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka (ver **Figura 25**), la **Tabla 4** muestra las posiciones de los equipos.

Estas series del nivel del mar pronosticadas serán evaluadas con los índices estadísticos más comunes que permiten cuantificar el error del pronóstico.

Los Índices estadísticos utilizados son:

Error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(f_n - o_n)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

Error medio absoluto (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}|f_n - o_n|$$

Error sistemático, Sesgo (BIAS)

$$BIAS = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(f_n - o_n)$$

Coeficiente de Correlación:

$$R = \frac{Cov_{xy}}{S_x\, S_y}$$

Donde:

f_n : dato pronóstico
O_n: dato observado
N: número total de mediciones

Cov_{xy} = covarianza entre el modelo y la observación
S_x = desviación estándar del modelo
S_y = desviación estándar de la observación

Ajustes y modificaciones de MOSA

La configuración inicial de MOSA, versión V1, estuvo conformada por una batimetría construida a partir de cartas SHOA, cuyo modelo de elevación digital fue evaluado de manera general, buscando que este no generara inestabilidades en el sistema más que buscar imprecisiones de esta. A partir de esta versión se ha ido realizando diversas correcciones en la batimetría del dominio a fin de construir un modelo de elevación digital acorde a la realidad. Sin embargo esta tarea se ha visto obstaculizada por la evidente falta de información en la zona, especialmente en la región de Aysén, donde existen lugares con una baja resolución. El forzante atmosférico usado en un principio fue obtenido de GFS a una resolución de 0.25 ° para pasar a una final de 0.125°. Finalmente se migró a un forzante obtenido de un modelo operacional de la Dirección Meteorológica de Chile basado en WRF a una resolución de 12 km. Las fuentes de agua dulce se han ingresado de manera gradual, a través de diferentes test de sensibilidad para evaluar su real impacto y no alterar la estabilidad del modelo.

Resumen de los diversos cambios que se han aplicado a MOSA desde su puesta en marcha:

- Julio- agosto 2015 puesta en marcha de MOSA v.1.1, forzante GFS 0.25, batimetría v1, sin fuentes de agua dulce, forzante marea v.1, Condiciones de borde MERCATOR, condiciones iniciales MERCATOR.
- Agosto-enero 2016 MOSA v1.2, forzante GFS 0.125°, batimetría v2, 10 fuentes de agua dulce (ingreso paulatino), condiciones de borde MERCATOR, condiciones iniciales MOSA.
- Febrero-Marzo 2016 MOSA v1.3, forzante GFS 0.125°, batimetría v2, 15 fuentes de agua dulce, condiciones de borde MERCATOR, condiciones iniciales MOSA.
- Abril-junio 2016 MOSA v2.1, forzante WRF (res 14 km), batimetría v3, 30 fuentes de agua dulce (ingreso paulatino), condiciones de MERCATOR, condiciones iniciales MOSA.

PRECISIÓN Y CALIDAD

Se evaluará la precisión del modelo usando datos en línea del nivel de mar disponibles en http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/ de las estaciones de Puerto Montt, Melinka, Ancud y Castro, mientras que para la salinidad y la temperatura se usaran datos de las estaciones de monitoreo de MUSELS, ubicadas en el canal Dalcahue, frente a Quiquel y en el canal Yal, frente Vilupulli, ambas en Chiloé Central. Estos puntos poseen un sensor multiparámetro de variables oceanográficas instalado a 4 metros de profundidad.

Estos estaciones poseen datos horarios a 4 metros de profundad, cuya cobertura espacial abarca desde principios de agosto hasta el día de hoy A través de un convenio con IFOP se busca dotar a estas estaciones de sensores meteorológicos y la capacidad de transmitir la información en tiempo real al sitio www.iproach.cl,

Nivel del Mar

Para evaluar el nivel del mar se utilizaron los pronósticos del día +1 del modelo en el mes de septiembre, con los cuales se construyó una serie de valores horarios en los 4 puntos indicados en la **Figura 25**. Esta serie de valores pronosticados fue contratada con valores medidos in situ. Cada serie fue descompuesta en sus constituyentes armónicas principales, verificando en los datos in situ la importancia de la componente semidiurna M2, la cual modula la conducta de la marea en la zona de canales siendo la constituyente armónica más energética (~70-80%). La amplitud de las principales constituyentes armónicas de las series observadas y simuladas se presenta en la **Figura 26.**

A su vez se estimó el porcentaje de energía (PE) que aportan las constituyentes armónicas semidiurnas M2 y S2, tanto para las series observadas como para las series simuladas. El PE es una estimación de la energía potencial y permite identificar las constituyentes principales de acuerdo a la amplitud de estas. La **Tabla 5** presenta los PE de M2 y S2 para ambas series en cada punto de evaluación.

También se construyeron espectros de energía para ambas series en cada punto. Estos espectros fueron calculados con 10 grados de libertad cada uno sobre series de 30 días con valores horarios. (**Figura 27)**.

Puerto Montt

En Puerto Montt se encuentra la mayor amplitud de marea observada, con un rango máximo mayor a 8 metros en sicigias. Las constituyentes principales son la M2 y la S2, con amplitudes de 1.8 y 1.3 m respectivamente (ver **Figura 28**), con un PE de 72 % y 20% respectivamente (ver **Tabla 5**).

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 casi 1 metro en M2 y 0.20 m para S2. Este error se acentúa en la cuadratura.

En la **Figura 28** 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 (**Tabla 6**) destaca una correlación del 89.8% entre ambas series, sin embargo el error cuadrático medio es de 1.04 m, el error medio absoluto es de 0.83 m y el error sistemático, donde el modelo sobrestima la amplitud de marea, es de +0.02 m.

En la misma figura podemos observar las constituyentes M2 y S2 de ambas series, que también presentan un alto grado de ajuste. La componente M2 presenta una correlación de 0.99 con un error cuadrático de 0.72 y un error absoluto de 0.64 m (ver **Tabla 7**).

Los espectros de las series muestran como el modelo tiende a reproducir máximos relativos en altas frecuencias, sin embargo los datos observados muestran un máximo absoluto en M2. Este máximo se ajusta con el simulado.

Ancud

En Ancud 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 (ver **Figura 29**), con un PE cada una de 72 % y 15% respectivamente (ver **Tabla 5**).

En Ancud la señal simulada presentó un ruido constante. Cerca de esta zona, a la entrada del Canal Chacao, el modelo presento reiteradas inestabilidades, siendo un foco de "Blow up". Aparentemente, la onda de marea al ingresar por el Canal Chacao, sufre un cambio dramático de profundidad (en el modelo), lo cual provoca que la onda aumente su velocidad de manera desproporcionada. Para resolver esta inestabilidad, se utilizó un paso de tiempo barotrópico de 45 segundos en la parametrización temporal de la ecuación. Esto le permite al modelo resolver con mayor margen inestabilidades de este tipo, aunque conlleva a una mayor capacidad de cómputo. Aun cuando se logró estabilizar la solución, la señal continúa presentando un pequeño ruido de alta frecuencia.

En la **Figura 29** se presentan las series del nivel del mar observado y simulado. Si bien se observa un buen ajuste de las fases entre ambas, la serie simulada tiende a subestimar la amplitud. La correlación entre la señal observada y la pronosticada es de 0.79, con errores en torno a 0.30 cm y un error sistemático de 0.03 (ver **Tabla 6**). La constituyente armónica M2 tuvo una correlación de 0.99, con errores menores a 0.20 m y un sesgo de 0.02 m (ver **Tabla 7**).

Los espectros de ambas series, presentados en la **Figura 27**, 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, es destacable que logra resolver máximos relativos cercanos a las 8 y 9 horas. Estos máximos podrían corresponder al desarrollo de componentes armónicos de aguas someras.

Castro

En Castro la amplitud de marea observada en sicigia alcanzó los 5 metros, mientras que las constituyentes M2 y S2 alcanzan amplitudes de 1.6 y 0.9 m respectivamente (ver **Figura 30**), con un PE cada una de 73.16 y 19.22 % respectivamente (ver **Tabla 5**). 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%).

Las series observadas y pronosticadas en la **Figura 30**, presentan un buen ajuste, alcanzando un 0.91 de correlación (la más alta de los puntos evaluados) con un error cuadrático medio de 0.74 m y un error medio absoluto de 0.59 m, obteniéndose el mayor error en cuadratura. El error sistemático fue de 0.01, el más bajo de los puntos observados (ver **Tabla 6**). La serie de la componente M2 también presenta un alto grado de ajuste en comparación con lo observado, logrando 0.98 de correlación con un RMS de 0.5 m. Aunque en este caso el error sistemático fue -0.02 (Tabla 7).

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 (ver **Figura 27**). 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.

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. 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 31**), cuyos PE fueron de 72.9 y 15.6 % respectivamente (ver **Tabla 5**).

Por su parte las series del nivel del mar observadas y pronosticadas presentaron un 0.88 de correlación (**Figura 31**). El error cuadrático medio y absoluto fue menor a 0.35, aumentando en la cuadratura, donde se acentúan, por su parte el sesgo fue de -0.03 m. La serie de M2 presentó un buen ajuste, logrando una correlación de 0.95 con un error menor 0.20 m y un sesgo de -0.04.

Esto sugiere que las señales están bien ajustadas, aunque al observar los espectros de ambas series, estos presentan alta coherencia para señales diurnas y semidiurnas, pero en altas frecuencias el modelo tiende a sobrestimar la energía, especialmente en la frecuencia cercana a las 8 horas, donde aparece un máximo de energía en el pronóstico, muy por encima del observado, sin embargo y observando que las señales semidiurnas aportan el 90% de la energía, podríamos considerar un buen ajuste.

Temperatura y Salinidad

A través de los datos otorgados por los puntos de monitoreo del centro de estudios MUSELS, instalados en Quiquel y Vilupulli, Chiloé Central, podemos obtener series de tiempo de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad para los periodos donde **MOSA** a estado operativo (ver **Figura 32**).

Estación Quiquel

Los datos de la estación de Quiquel, en las cercanías de Dalcahue, presentan valores horarios de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad entre agosto de 2015 y marzo de 2016. En la **Figura 33** se aprecian los resultados de la estación de muestreo junto con los valores que obtiene **MOSA** para el mismo periodo, donde podemos apreciar que la señal de temperatura simulada desarrolla una variabilidad temporal acorde a lo observado, replicando patrones sinópticos entre fines de primavera y comienzos de verano, donde **MOSA** aparentemente es capaz de desarrollar una conducta estacional, aumentando su temperatura superficial en verano a través de un procesos de fluctuaciones moderadas que podrían indicar la transición a verano en las condiciones oceanográficas. Entre enero y principios de febrero el modelo presentó algunos problemas operacionales, por lo que sus resultados en esa zona no pasaron los controles de calidad. La salinidad en Quiquel se presentó levemente desajustada, siendo poco más de 1 PSU menor durante primavera, pasando a ser 1 PSU mayor en verano. Sin embargo, a diferencia de la temperatura, la salinidad no refleja una conducta coherente con los procesos esperados en la zona, siendo de vital importancia diagnosticar este comportamiento, ya que la salinidad gobierna la densidad en la zona. Los motivos de este pequeño desajustes son, por una parte la falta de fuentes de agua dulce en la zona, procesos de mezcla no resueltos, donde la batimetría y el viento juegan un rol determinante, y en menor medida las parametrizaciones de variables atmosféricas, tales como radiación, evaporación y precipitación.

Estación Vilupulli

La estación Vilupulli, también se encuentra a 4 metros de profundidad y otorga datos de temperatura y salinidad cada 1 hora. Estos datos son contrastados con los datos de **MOSA** para el periodo entre agosto de 2015 y mayo de 2016. La **Figura 34** presenta la temperatura y salinidad observada y pronosticada, en la primera, al igual que en la estación de Quiquel esta desarrolla patrones sinópticos un tanto correlacionados con los observados, sin embargo esta estuvo más desajustada, en al menos 2°C más elevada. La serie comparada es más larga que la de Quiquel y da cuenta del inicio de otoño, donde la temperatura observada cae. Esta caída se observa en **MOSA**, aun cuando la falta de datos no permite corroborar el proceso. El desajuste en la temperatura pude deberse entre otras cosas a una pobre parametrización de variables atmosféricas, tales como radiación, precipitación, así como procesos de mezcla, sin embargo el factor principal serían las condiciones iniciales del modelo, originadas del modelo global MERCATOR, un modelo de gran escala que no resuelve de manera correcta la distribución del campo de masa en las zonas interiores del sur de Chile, donde MOSA ha ido retroalimentándose de sus propias condiciones iniciales desde febrero. Por su parte la salinidad se presentó un tanto desajustada en primavera, estando **MOSA** siempre 1 a 2 PSU más bajo que lo observado, mientras que en verano se observa un sostenido aumento de la salinidad en el pronóstico superando en 0.5 PSU lo observado, aun cuando en ese periodo se aumentó progresivamente la cantidad de fuentes de agua dulce en el modelo.

Las estaciones de Quiquel y Vilupulli se presentan como excelentes puntos de control para verificar la capacidad del pronóstico de desarrollar estructuras temporales en el campo de masa en una zona donde la salinidad gobierna la salinidad, y la mezcla se ve influenciada directamente por la batimetría, el viento y la marea. Los puntos de control dan cuenta de que si bien el modelo presenta desajustes en la salinidad, la temperatura es capaz de responder a patrones sinópticos y estacionales, dando luces que el trabajo de calibración debe enfocarse en los ingresos de agua dulce al sistema, el balance evaporación - precipitación y la batimetría. En esta parte del dominio aún no se han ingresado fuentes de agua dulce relevantes, sin embargo los resultado anteriores sugirieren evaluar la integración de estas fuentes al modelo.

CONSISTENCIA Y VALOR DEL MODELO

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. En esta parte de la evaluación se analizarán de manera cualitativa perfiles de salinidad y temperatura, como también la conducta de la corriente de marea, con el objetivo de poder ver si son consistentes o no.

I) Campo de masa

Podemos también evaluar la distribución del campo de masa en el modelo de una manera más general en todo el dominio, utilizando datos tomados por campañas de IFOP en periodos anteriores, pero coincidiendo con la estacionalidad. Debido a que **MOSA** ha operado de una manera más o menos regular desde fines de 2015, se utilizarán datos de primavera y verano para su evaluación. Notar que en un inicio **MOSA** no contenía descargas de agua dulce, las cuales han sido ingresadas gradualmente a lo largo del desarrollo del proyecto. Esta gradualidad responde a que en un principio se buscaba la operatividad estable del sistema, evitando romper la frágil estabilidad del modelo en una zona altamente compleja de reproducir a través de modelación numérica. Hoy en día el modelo opera con alrededor de 30 fuentes de agua dulce a lo largo del dominio Chiloé - Aysén, utilizando datos climatológicos obtenidos desde la DGA (**Figura 9**). Es importante destacar la importancia de estas descargas en la zona de estudio, ya que son estos aportes junto a la compleja configuración topográfica y batimétrica de la zona (y también junto a la marea y el viento) los responsables de los patrones de circulación de gran escala en la zona.

En la zona del dominio Chiloé - Aysén se puede identificar a lo menos 4 macro zonas con características oceanográficas similares, de acuerdo a los forzantes presentes y a la configuración topográfica - batimétrica presente. Estas serían: a) Archipiélagos de las Guaitecas y de Chonos, b) Aysén Continental, c) Guafo – Canal Moraleda y d) Fiordo de Reloncaví- Golfo de Ancud.

a) Archipiélagos de las Guaitecas y de Chonos

La zona insular de Aysén comprendida entre el archipiélago de las Guaitecas hasta el Archipiélago de Chonos se considera una zona de transición entre un ambiente oceánico, altamente influenciado por forzantes remotos, a una zona con propiedades estuarina, donde los forzantes son mayormente locales. Existe una gran variabilidad dentro de esta zona, precisamente por sus singularidades que resultan en zonas cercanas geográficamente pero considerablemente diferentes desde el punto de vista oceanográfico.

Evaluación primavera

Se utilizaron datos de campañas previas de IFOP en la zona, que coincidieran con el periodo en que ha estado operativo **MOSA** (ver **Figura 35**). Para ello se emplearon lances de CTD de la campaña "Chonos - primavera, 2013", realizados en los meses de octubre y noviembre, en los canales Ninualac, Byron y King. Por su parte se utilizaron datos de la campaña "Chonos- Puyuhuapi, primavera, 2014", entre los meses de octubre y noviembre para comparar los canales Puyuhuapi, Jacaf y Moraleda y finalmente para comparar el Canal Moraleda se utilizaron lances de la campaña de 2014, realizado durante el mes de noviembre. Las posiciones de cada lance se presentan en la **Tabla 8**. El análisis del campo de masa constará en verificar si las estructuras térmicas y halinas de la columna de agua son consistentes con lo observado, realizando una evaluación cualitativa de estas.

El Canal Bynon se encuentra en el archipiélago de Chonos, actuando como un canal de conexión entre el ambiente oceánico y el ambiente semi estuarino del canal Moraleda. La campaña oceanográfica de IFOP "Chonos primavera 2013", obtuvo lances de CTD durante la última semana de octubre en la zona. El pronóstico realizado para el mismo día del CTD se muestra en la **Figura 36**. La salinidad observada, muestra una capa claramente estratificada, con una haloclina cercana a los 10 metros, y con un mínimo de salinidad superficial cercano a 30 PSU. Sin embargo, el pronóstico no replica la estructura de manera adecuada, aunque es capaz de presentar una capa superficial menos salina, éste reproduce una capa superficial bien mezclada, con un aumento acotado de la salinidad en profundidad hasta llegar a 33.5 PSU, un valor casi de 2 PSU mayor al observado. Los valores solo coinciden a los 10 metros, cerca de la profundidad de la haloclina observada.

La temperatura observada presenta un perfil bastante homogéneo de 10°C, de manera similar al pronóstico de **MOSA**, que también presenta una columna con temperatura homogénea, sin embargo este último posee una temperatura de 2°C mayor.

El canal Ninualac se encuentra al sur del canal Bynon, en el archipiélago de Chonos, y al igual que Bynon, este canal conecta el océano Pacífico con el canal Moraleda a la altura de la boca del fiordo Aysén, por lo que su extremo oriental está influenciado por agua de baja densidad que aporta el fiordo Aysén al sistema marino, mientras que por el extremo occidental está influenciado por aguas

de origen oceánico, convirtiéndose en una zona de transición bastante compleja, con alta variabilidad estacional. Al igual que en el canal Bynon, los lances de CTD utilizados corresponden a la campaña "Chonos-primavera, 2013", durante la última semana de octubre.

En la **Figura 37** se observa que la salinidad muestreada presenta una estructura homogénea, sin desarrollar una termoclina definida. Tampoco se logra observar una capa superficial menos salina, evidenciando una gran mezcla en la zona. La salinidad se mantiene casi invariable en 32.4 PSU en la columna. Por su parte MOSA también desarrolla una columna casi homogénea, aumentando levemente la salinidad en profundidad hasta llegar a un máximo de 33.8 PSU, más de 1PSU de diferencia con lo observado.

La temperatura observada también se exhibe homogénea, manteniendo casi 10°C en toda la columna, mientras que MOSA también replica una columna homogénea con una temperatura de 1ºC mayor en el pronóstico.

Canal King también se encuentra en el archipiélago de Chonos, sin embargo su localización es más al norte, donde también conecta al océano Pacifico con el mar interior de Aysén, no obstante su extremo oriental es atravesado por el canal Pérez, manteniendo un contacto indirecto con el canal Moraleda, condición que modifica su dinámica con respecto a los dos canales analizados anteriormente. Los datos del canal King también corresponden a la campaña oceanográfica de IFOP "Chonos Primavera 2013".

Los perfiles de salinidad observados y pronosticados para el canal King se presentan en la **Figura 38**, donde se puede observar una columna homogénea, casi invariable en profundidad, con una salinidad marcada de 32 PSU, disminuyendo levemente a partir de los 20 metros para alcanzar un mínimo superficial de 31.5 PSU. Aun cuando **MOSA** tiende a aproximarse en superficie a lo observado, en profundidad la salinidad se incrementa paulatinamente hasta llegar a un máximo profundo de 33.6 PSU, más de 2.5 PSU que el máximo observado.

La temperatura observada también presenta una capa mezclada, con valores cercanos a los 10ºC en. Esta estructura pareciera replicarla el modelo pero con una diferencia de +2ºC en toda la columna.

Evaluación verano

Para evaluar las estructuras de verano, se utilizó una serie de lances de CTD en estaciones de referencia entre Chiloé- Palena y Aysén obtenidas por campañas de IFOP, dentro del proyecto Seguimiento Ambiental, entre diciembre y enero de 2015/2016 (**ver Figura 39**), estos perfiles son comparados con perfiles promedio entre febrero y marzo de MOSA, meses en los que se han integrado al modelo fuentes de agua dulce.

La estación 30 ubicada en el canal King presenta en los datos de CTD perfiles homogéneos tanto en la salinidad como en la temperatura (ver **Figura 40**), La salinidad es de 32 en toda la columna, mientras la temperatura es cercana 10°C, aumentando levemente a 11 °C en superficie. Por su parte los pronósticos replicaron esta estructura de mezcla, en el caso de la salinidad con valores muy cercanos a los observados, sin embargo en la temperatura, esta se presenta desajustada en al menos unos 3°C de más con respecto a lo observado.

Las **Figuras 41 y 42** presentan los perfiles de temperatura y salinidad de las estaciones 20 y 16 respectivamente, las cuales están ubicadas en los canales Darwin y Chacabuco, los cuales componen un único sistema de conexión entre el océano Pacifico y el Canal Moraleda. Nuevamente los perfiles observados presentan una columna de agua homogénea, en el caso de la estación 20 con una pequeña caída de la salinidad superficial que el pronóstico no logra replicar, mientras que la temperatura pronosticada es 2°C mayor en y toda la columna. En el caso de la estación 16 (Figura 43), es completamente homogénea, tanto lo observado como lo pronosticado, aunque se presenta un desajuste en la salinidad. Mientras el observado presenta una salinidad de 30 en casi toda la columna, el pronóstico no cambia de 34. A su vez la temperatura también se presenta invariable a lo largo de la columna de agua, aunque hay una diferencia de 3°C de más entre lo observado y lo pronosticado.

b) <u>Aysén Continental</u>

La zona de Aysén continental contiene los mayores aportes de agua dulce al sistema PALENA-AYSEN, contando varios fiordos y campos de hielo que son vitales para sostener la circulación estuarina de gran escala a menudo observada en la zona. Estos aportes de agua dulce desde el continente generan un gradiente termohalino, el cual sumado a la configuración topográfica de la línea de costa y la batimetría local general condiciones oceanográficas bastantes locales.

Evaluación Primavera

El canal Puyuhuapi se encuentra en la costa continental de la región de Aysén, en su extremo norte se conecta con el canal Jacaf y en su extremo sur se comunica con el canal Moraleda. Al estar en la zona continental, es alimentado por diversos ríos y por la presencia de algunos campos de hielo, lo cual le otorga una característica que lo diferencia de los canales anteriormente analizados, recibiendo una cantidad de agua dulce mayor, presentando una columna mayormente estratificada. Los datos fueron obtenidos en la campaña oceanográfica de IFOP "Melinka-Puyuhuapi primavera, 2014", durante los meses de noviembre-diciembre.

En la **Figura 43** se puede apreciar el perfil de salinidad, el cual presenta la típica estructura estuarina, con una capa de muy baja salinidad superficial, una haloclina fuerte a los 15 metros y un aumento atenuado de la salinidad en profundidad, presentado una estructura de 2 capas, alcanzando un mínimo superficial de 14 PSU y llegando a 34 PSU en el fondo. Por su parte **MOSA** tiende a ajustarse bien desde la haloclina hasta el fondo, sin embargo no es capaz de reproducir la

capa de agua dulce superficial observada. En parte debido a que en esta etapa experimental de **MOSA** no se han introducido fuentes de agua dulce al modelo.

La temperatura observada también presenta una estructura de 2 capas, con una capa superficial de mayor temperatura, que llega los 15ºC seguido de una termoclina bien marcada cerca de los 15 metros (cercana a la haloclina), y una capa profunda homogénea cercana a los 9ºC. El modelo nuevamente presenta una diferencia positiva con respecto a lo observado de +2ºC, y con una estructura vertical casi homogénea.

El canal Jacaf se encuentra al norte del canal Puyuhuapi, por el cual está conectado en su extremo oriental, mientras que su extremo occidental se comunica con el canal Moraleda. De manera similar al canal Puyuhuapi, el canal Jacaf recibe numerosos aportes de agua dulce de ríos y descargas glaciares, presentando una columna bastante estratificada. Los datos utilizados corresponden a la campaña oceanografía de IFOP "Melinka-Puyuhuapi, primavera, 2014", entre noviembre y diciembre.

La salinidad observada presenta una estructura bien definida de 2 capas (**Figura 44**), con una capa superficial de baja salinidad que llega a 17 PSU, seguida de una fuerte haloclina cerca de los 10 metros, y una capa profunda bien homogénea con valores cercanos a los 32 PSU. De manera similar al canal Puyuhuapi, el pronóstico se ajusta al perfil de salinidad bajo la haloclina, presentando un leve incremento de la salinidad en el fondo, hasta llegar a 33 PSU. Sin embargo la capa superficial de baja salinidad no se logra desarrollar en el modelo. Nuevamente, se espera que al incorporar al modelo más fuentes de agua dulce de agua dulce, y pase un tiempo determinado retroalimentándose sobre sus propias condiciones iniciales, este logre aproximarse a la estratificación observada.

Por su parte la temperatura observada también presenta una fuerte estratificación, con una temperatura superficial de 15ºC, seguida de una fuerte termoclina pasado los 10 metros, cercana a la haloclina, y una capa profunda homogénea que bordea los 10ºC, mientras que el pronóstico nuevamente presenta valores alejados, con una capa totalmente homogénea con valores 2ºC mayores que los observados.

Evaluación verano

La estación 74 cuya ubicación es cerca de la boca del rio Palena (ver **Figura 45**) presenta en los datos observados un perfil bastante estratificado, con una haloclina a los 8 metros, una salinidad superficial de 20 y una capa profunda de 31. Esta estructura se puede apreciar en el pronóstico con una termoclina a los 10 metros, sin embargo las salinidades superficiales llegan a los 29, mientras que la capa profunda se mantiene en 32. Se destaca que el MOSA pueda desarrollar una estratificación permanente en la zona debido a la fuente de agua dulce del rio Palena. La temperatura se presentó un tanto más homogénea, aunque tanto los datos observados como los

pronosticados presentaron una caída en superficie, aunque en general el pronóstico se presentó más cálido que lo observado, siguiendo la tendencia de todos los puntos observados.

Los datos observados de la estación 44 (**Figura 46**), la cual se encuentra en medio del canal Jacaf, presenta un perfil de salinidad de 2 capas, con una capa superficial menos salina , que llega a 22, una haloclina a los 10 , y una capa profunda de 30, rasgo típico de una zona con importantes aportes fluviales. Sin embargo y a pesar de que MOSA posee descargas de agua dulce en la zona, el pronóstico no logra desarrollar una capa superficial menos salina en la zona, generando una estructura termohalina homogénea que no varía de los 32. La temperatura a su vez tampoco es lograda, ya que se presenta una capa totalmente homogénea de 16°C, mientras la observación sugiere la presencia de una pequeña termohalina a los 5 metros, que separa una capa superficial de 14°C con una más profunda que bordea los 10°C.

La estación 46 (ver **Figura 47**) se encuentra en el canal Puyuhuapi, cerca de la unión con el canal Jacaf, una zona de alta estratificación, donde la presencia del glaciar Ventisquero y sus afluentes sumado al rio Cisnes de importante caudal, aportan grandes volúmenes de agua que conducen una circulación estuarina. Los datos observados muestra una columna estratificada, con salinidades superficiales de 12, una termoclina bien definida a los 8 metros y bajo ella salinidad de 30, los pronósticos no lograron desarrollar la estratificación observada, aun cuando el rio Cisnes está incluido como fuente de agua dulce. Notar que la profundidad es bastante menor a la real. La temperatura por su parte tampoco se ajustó, aunque en superficie alcanza valores similares (~15°C), bajo esta se mantiene una diferencia de lo menos 2°C.

En la boca del Puyuhuapi, se encuentra la estación 50 (**ver Figura 48**). En ella se observa en los datos de CTD una columna de agua de 2 capas, con una capa superficial menos salina (25), una termoclina a los 10 metros y una capa profunda con salinidad de 31. Nuevamente los pronósticos no lograron replicar la estratificación observada, desarrollando una columna homogénea tanto en salinidad como en temperatura, siendo la temperatura recurrentemente mayor a lo observado.

En el fiordo Aysén se utilizó la estación 2A, la cual se encuentra al medio de fiordo. Los perfiles de salinidad observado presentan una fuerte estratificación los primeros 5 metros, si bien los datos pasaron el control de calidad, no se descarta algún tipo de error en la toma de datos, debido a la inusitada disminución de salinidad superficial., la cual pasa de 5 PSU en superficie a 28 bajo los 5 metros (ver **Figura 49**). Aun así, los pronósticos no desarrollan una haloclina, presentando por su parte una columna invariable de 31 PSU, mientras que la temperatura observada exhibe una suave termohalina, la temperatura pronosticada no presenta variabilidad y se sitúa entre 2 a 3°C sobre lo observado.

c) Guafo – Canal Moraleda

Evaluación primavera

La zona entre la Boca del Guafo y el Canal Moraleda es más profunda que el resto, presenta la advección de aguas oceánicas con aguas de origen estuarino, mientras el viento logra ejercer mayor influencia al poseer más superficie, sus condiciones suelen poseer gran variabilidad.
El canal Moraleda es el canal principal de la región de Aysén, cruzándola de norte a sur y conectando la mayoría de los canales de la zona, su influencia es bastante variada, presentado descargas glaciares directas en el extremo sur, y comunicándose con el océano Pacifico en la Boca del Guafo en su extremo norte. En este análisis usaremos una estación cercana a su borde norte, donde se conecta con el océano Pacífico, lugar de transición entre un ambiente oceánico y un ambiente estuarino de gran escala. Los datos corresponden a la campaña oceanográfica de IFOP "Melinka-Puyuhuapi, primavera 2014".

El perfil de salinidad observado (ver **Figura 50**) presenta una columna bastante mezclada, con un leve descenso de la salinidad en superficie, llegando a 30 PSU, mientras que en el fondo esta llega a 33 PSU. El pronóstico también presenta un perfil bastante homogéneo, que se ajusta a lo observado, a excepción de que nuevamente no presenta la habilidad de replicar la caída de la salinidad superficial, llegando a 32 PSU en superficie, y a 34 PSU en el fondo.

La temperatura observada presenta una estructura de 2 capas más definida, con un máximo superficial de 14ºC una suave termoclina cercana a los 20 metros y una columna profunda homogénea de 10ºC, cayendo levemente en el fondo. Mientras que el modelo nuevamente no presenta la capacidad de representar correctamente la temperatura, presentando una columna bien mezclada cercana a los 12ºC (+2ºC de lo observado).

El golfo Corcovado es la entrada sur al mar de Chiloé, éste se conecta con el océano Pacífico y el Canal Moraleda a través de la Boca del Guafo, representado una zona característica del mar de Chiloé al sur de las Islas Desertores. Los datos usados fueron obtenidos de la campaña de IFOP "Marea Roja, 2014".

En la **Figura 51** se presenta el perfil de salinidad observado, donde se aprecia una columna levemente estratificada, con un mínimo superficial de salinidad de 32 PSU, mientras que en la capa profunda, ésta aumenta levemente a 33 PSU. Por su parte el modelo presenta una columna semi mezclada, con un mínimo superficial de salinidad cercano al valor observado, sin embargo, el aumento en profundidad es gradual pero sostenido, hasta alcanzar un máximo profundo de 34 PSU, un poco mayor al observado.

La temperatura observada se presenta como una columna completamente homogénea, al igual que la simulada, sin embargo, nuevamente el modelo presenta una temperatura al menos 2ºC mayor que la observada.

Evaluación verano

La Figura 52 presenta los perfiles de la estación 5 ubicada en el mar interior de Chiloé donde se observa una columna totalmente mezclada, tanto en la temperatura como en la salinidad. La salinidad pronosticada se ajusta con un alto grado de precisión con la observada, mientras que la temperatura pronosticada presenta una diferencia de 3°C mayor con respecto a la observada.

Los perfiles de temperatura y salinidad de la estación 2 se presentan en la **Figura 53** la cual se encuentra en la Boca del Guafo. Acá se aprecia un alto desajuste por parte del modelo, sin embargo el perfil que entrega MOSA es un promedio, cuya estructura es bastante coherente con lo publicado para la zona en esa fecha, mientras que la observación es un momento aleatorio con condiciones puntuales, que no necesariamente reflejan el estado promedio de la columna de agua. Este perfil pronosticado muestra una capa superficial menos salina, que alcanza valores de 25, con una haloclina suave presente cerca de los 5 metros.

Por su parte la temperatura observada tiende a asemejarse solo en superficie, mientras el resto de la columna parece estar bastante desajustado. No obstante notar que solo se presentan los primero 35 metros de profundad.

La **Figura 54** muestra los perfiles de la estación 39, ubicada en el canal Moraleda, cerca de la costa. Los perfiles de salinidad tanto pronosticados como observados presentan una alta consistencia, excepto en superficie, donde el CTD presenta una caída de la salinidad superficial que llega a los 28, mientras el modelo mantiene toda la columna homogénea. La temperatura pronosticada nuevamente se presenta bastante homogénea y con una diferencia positiva de al menos 2.5 °C con respecto a lo observado. La temperatura observada presenta un aumento en superficie con una termoclina a 5 metros.

Se utilizó la estación ubicada en el canal Moraleda a la salida del fiordo Cupquelán. Los perfiles observados presentan una pequeña haloclina, y un perfil de temperatura homogéneo (ver **Figura 55**). El pronóstico de salinidad por su parte exhibe una haloclina más pronunciada donde tiende a aproximarse en superficie al observado con valores similares a 25. Sin embargo, bajo la haloclina, el pronóstico presento salinidades de 31, mientras lo observado no supera los 27. La temperatura tampoco se ajustó correctamente, aunque ambos perfiles, tanto observado como pronosticado, son homogéneos, persiste una diferencia de casi 4°C en toda la columna de agua.

d) <u>Fiordo de Reloncaví - Golfo de Ancud</u>

Esta zona es altamente influenciada por el fiordo de Reloncaví, el cual aporta agua dulce y propicia una estratificación bien desarrollada cerca del estuario, mientras que el viento se hace más importante hacia sur mezclando la columna, unida a su condición de macro cuenca limitada por el las islas Desertores en el sur y el Canal Chacao por el oeste.

Evaluación verano

Las **Figuras 56 y 57** presentan los perfiles de temperatura y salinidad de las estaciones 21 y 63 respectivamente. La estación 21 ubicada cerca de Ancud presenta una columna totalmente mezclada, esta estación es bastante costera, sin embargo la salinidad se ajusta correctamente en ella, siendo un poco mayor, por su parte la temperatura se presenta igual de mezclada pero a lo menos unos 2 °C mayor que el observado. Por su parte la estación 63 ubicada próxima a la boca del fiordo Comau presenta una estratificación en la salinidad, con un mínimo superficial de 21, y una haloclina cercana a los 8 metros. Este rasgo no fue replicado por MOSA, el cual se muestra completamente mesclado y homogéneo, aun cuando dentro del fiordo Comau se han agregado fuentes de agua dulce.

Temperatura Superficial del Mar (TSM)

La **Figura 58** presenta la TSM obtenida de MODIS (Transparent *Model Checking of Unmodified Distributed Systems*) a una resolución de 4 kilómetros para el mes de marzo en entre las regiones de los Lagos y Aysén, junto con su varianza y el número de días con observación. Mientras que la **Figura 59** presenta el promedio mensual de marzo de TSM pronosticado por MOSA para la misma zona y la **Figura 60** muestra la desviación estándar de dicho promedio. Si bien los puntos de observación con CTD mostraron un alto grado de desajuste de la temperatura en la columna de agua con respecto a los pronósticos, la tendencia mostró que las mayores aproximaciones de esta fueron en superficie. Si comparamos los promedios de TSM observados versus los pronosticados podemos notar que a gran escala se logra una notoria consistencia del modelo para desarrollar zonas frías y cálidas. Esto es una zona cálida en el océano abierto con TSM cercana entre 18 y 20 °C, y zona cálida en el seno Reloncaví con TSM cercanas a 17 °C. Mientras las zonas más templadas las encontramos en las costas occidentales y en el mar interior de Chiloé con valores que no superan los 14°C.

Aunque existe un alto grado de incertidumbre con respecto a las zonas más interiores, donde MODIS con una resolución de 4 kilómetros no logra determinar la TSM, se destaca la capacidad de MOSA de generar estos patrones de gran escala, siendo un elemento de consistencia vital para continuar su desarrollo.

Salinidad superficial de mar (SSS)

Si bien aún no se dispone de información satelital para SSS que resuelva la zona de estudio de manera útil, es bueno poder observar si MOSA logra desarrollar rasgos esperables para la zona de estudio.

La **Figura 61** muestra los promedios mensuales de salinidad superficial en febrero marzo y abril, donde observa claramente las zonas más estuarina, identificando como éstas el fiordo Reloncaví, el Fiordo Comau, Riñihue, la boca del rio Palena, rio Cisnes, rio Aysén y la Laguna San Rafael.

II) CORRIENTES

Al igual que con el campo de masa, para evaluar la conducta de las corrientes se utilizó datos obtenidos en diversas campañas de IFOP en la zona de estudio entre 2010 y 2015, las cuales cuentan con mediciones de ADCP. Si bien no podemos comparar las series de tiempo observada y pronosticada, al no contener los mismos periodos, podemos utilizar las elipses de la corriente de marea de la constituyente M2 (12.42 horas) para apreciar la capacidad del modelo de replicar la componente barotrópica de la marea, en una zona donde la mayor energía la concentra la componente M2 de la marea.

Para construir las elipses de correnties de la componente M2, se extrajo un promedio de la corriente en toda la columna de agua, así se obtiene una serie de tiempo, a esta serie se le extrae la señal de 12.48 horas, correspondiente a la M2.

La comparativa será a través de la perspectiva de cambios que ha tenido MOSA. Definiremos como MOSA V1, a la configuración inicial usada del modelo, la cual estaba montada con una batimetría más cruda y menos trabajada, extraída directamente de las cartas náuticas de SHOA. El forzante atmosférico utilizado era obtenido de GFS (Global Forecast System), y no contenía fuentes de agua dulce. En un comienzo el forzante de marea contenía un error en la amplitud del armónico S2, el cual estaba bastante subestimado para la zona de Aysén Sur. La versión MOSA V.2 contiene una serie de modificaciones, una reconstrucción del modelo de elevación digital adhiriendo mejoras puntuales en la batimetría (revisión manual de valores anómalos), una corrección a la amplitud del armónico S2 en el forzante de marea, la adición paulatina de fuentes de agua dulce al dominio (a día de hoy cuenta con a lo menos 30). También se incorporó del modelo WRF como forzante atmosférico de MOSA, lo cual puede suponer una representación del viento más acorde a la anterior, debido a una mayor resolución. Otro aspecto nuevo es que en MOSA V2, las condiciones iniciales de cada pronostico son generadas por el mismo modelo, lo cual le da la capacidad de retroalimentarse, y a largo plazo lograr una estabilidad que permita una distribución más realista del campo de masa.

Para obtener una visión general nuevamente se dividió la zona de estudio es zonas con características un tanto comunes para contextualizar la conducta del modelo. En la zona de Reloncaví-Golfo de Ancud se usaron datos en Paso Nao, Canal Chacao y Fiordo Comau (**Figura 62**). En Chiloé Central se usó datos en Isla Chaulinec, Isla Tranqui, Isla Linlin, en Isla Llingua (**Figura 63**). En Corcovado se usó un ADCP instalado al interior del golfo al igual que la entrada del Canal Moraleda (**Figura 64**), mientras que en zona de Aysén Continental se usaron equipos en Isla Marta Puerto Gaviota (Canal Puyuhuapi),y Aysén sur en canal Errazuriz, canal Darwin y Canal Utarupa **(Figura 65)**. Por su parte en la zona de Archipiélago de Chonos se utilizó datos de equipos en Canal Bynon, Canal King, Canal Ninualac, y canal Pérez norte **(Figura 66**).

a) Reloncaví. Golfo de Ancud

En la zona está altamente influenciada por el fiordo de Reloncaví y el fiordo Comau, los cuales aportan aguas de baja salinidad al sistema construyendo un ambiente de características estuarina, con alta variabilidad estacional, mientras que la batimetría juega un rol primordial al limitar una macro cuenca al norte de las islas desertores que propician una zona de características especiales. La **Figura 62** presenta las posiciones de los equipos utilizados en esta zona.

En la **Figura 67** se observan las elipses de M2 obtenidas en Paso Nao, para MOSA V1, V2 y los datos observados, donde podemos apreciar como la versión inicial de MOSA se presenta un desajuste en la orientación, aunque es la magnitud lo que se presenta más alejado de la observación, la cual se exhibe subestimada. La versión V2 logra ajustar en gran medida la magnitud, aun cuando la orientación se muestra un poco desajustada, el resulta exalta la capacidad de MOSA de reproducir de manera correcta la corriente de marea en Paso Nao. Los desajustes estarían dados por la representación de la batimetría en la zona.

Por su parte en Canal Chacao (**ver Figura 68)** se observa lo mismo con la magnitud, un desajuste inicial, pero corregido parcialmente en la V2, sin embargo, aun el modelo subestima la magnitud, esto puede deberse completamente a una representación poco fiel de la batimetría en la zona, son embargo el eje de oscilación parece adecuado. Notar que la posición del ADCP no está en el medio del canal.

En el Fiordo Comau (**Figura 69**) la V1 de MOSA presenta una mínima oscilación, esto debido a que la posición del equipo ADCP se encuentra en una zona que no estaba correctamente representada en la versión inicial. Ya en la V2 esta se mejora y logra reproducir los patrones esperables, aun cuando la magnitud también aparece subestimada con respecto a lo observado, la orientación parece estar un tanto ajustada. Mejoras en la batimetría nuevamente podrían mejorar la orientación y magnitud de la elipse de M2.

b) Chiloé central

Esta zona se caracteriza por poseer varias islas y canales que permiten el desarrollo de condiciones bastante locales por la parte de Chiloé, donde la marea y la batimetría se alzan como los forzantes predominantes en la circulación marina. La **Figura 63** presenta los puntos de control usados en la evaluación.

La **Figura 70** presenta las elipses cerca de la Isla Chaulinec donde podemos notar como la V1 de **MOSA** presenta un mínimo desplazamiento mientras que la V2 presenta una elipse con un eje principal bastante demarcado. Esto producto de correcciones la batimetría cercana a la zona. Aun cuando las magnitudes parecen convenir, los datos observados dan cuenta de una elipse de mayor

excentricidad, exhibiendo en **MOSA** una tendencia a desarrollar un eje de desplazamiento más definido. Por su parte, las elipses cerca de Isla Tranqui (ver **Figura 71**) presentan un aumento considerable del eje mayor de la elipse entre las versiones 1 y 2 en **MOSA**, sobrestimando de manera notable lo observado. En esta parte se deberá verificar con un mayor énfasis cuales podrían ser los motivos de semejante conducta por parte del modelo, sin embargo y al igual que los casos anteriores, en este proceso, la construcción de un modelo de elevación digital acorde a la zona se hace imperativo.

Las **Figuras 72 y 73** presentan las elipses de M2 obtenidos cerca de las islas Linlin y Llingua respectivamente. Si bien estos puntos son cercanos entre sí, pertenecen a sistemas un tanto diferentes, aun cuando sus elipses observadas son similares, MOSA logra acercarse en su versión 2 a lo observado en Linlin, por su parte en la Isla Llingua esta se exhibe totalmente desmedida sobrestimando de manera critica la amplitud de los ejes y orientado la elipse en un eje 45° desfasado. Nuevamente la batimetría empleada en la zona podría explicar este desajuste en la amplitud, sin embargo la construcción de la máscara también podría ser importante en el desfase, ya que suaviza los contornos de la isla, generando líneas de costa e isóbatas que no corresponden a la realidad.

c) <u>Golfo de Corcovado y Canal Moraleda</u>

La posición de los equipos utilizados en esta zona se presenta en la **Figura 64**. Esta es una zona de cuencas más extensas, por donde se produce la renovación de las aguan interiores de Chiloé y Aysén.

En la **Figura 74** se presentan las elipses de M2 en el Golfo Corcovado. En ellas podemos notar como MOSA en su versión inicial no lograba desarrollar la elipse adecuadamente, subestimando su magnitud severamente, sin embargo en su versión actual, esta de se acerca a la amplitud observada aunque la orientación está desfasada. Por su parte en canal Moraleda las elipses pronosticadas ha presentado una mejora en la magnitud, sin embargo el eje de orientación de estas está desfasado al igual que en el Golfo Corcovado (**ver Figura 75**). Estos desfases se podrían explicar por una incorrecta representación de la batimetría, ya que estas comparativas se hace en el mismo punto que en el modelo, donde la construcción del modelo de elevación digital puede conducir una interpolación errónea.

d) <u>Aysén Continental</u>

Esta zona se caracteriza por poseer numerosos accidentes geográficos, constricciones, y numerosos aportes de aguas dulces provenientes de glaciares y ríos de régimen mixto siendo un ambiente altamente estratificado. Los equipos utilizados en esta zona se muestran en la **Figura 65.**

El equipo colocado en Isla Marta, en el Fiordo Puyuhuapi presenta solo datos en la versión 2 de **MOSA**, esto debido a que la configuración inicial poseía errores en el dominio en esta zona, no logrando una correcta simulación del lugar **(Figura 76).** Las elipses de **MOSA** y la observada sugieren una subestimación de los efectos mareales en la zona del canal Puyuhuapi, donde el modelo presenta una elipse con un semi menor alcanza mayor amplitud, mientras lo observado sugiere un eje de oscilación bien definido con un eje semi menor muy débil. Por su parte en Puerto Gaviota las elipses evidencian una evolución favorable de **MOSA** desde su versión inicial a la actual, acercándose a la estructura de la elipse observada, aumentando su amplitud pero desviando el eje de rotación (Ver **Figura 77**).

El Canal Errazuriz, localizado en el extremo sur del canal Moraleda luce elipses de M2 en sentido casi oeste- este, influenciado por el canal Vicuña, que lo conecta de manera casi directa con el Océano Pacifico (ver **Figura 78**). Las elipses exhibidas por MOSA muestras que si bien hubo un pequeño ajuste entre la versión inicial y a la actual, aún queda bastante por resolver. El desarrollo de una máscara más suavizada en pos del rendimiento, ha afectado esta zona, donde la línea de costa no ha sido lo suficientemente bien representada, la falta de datos batimétricos ha conllevado a una suma de imperfecciones que han aumentado el error. En Canal Darwin las elipses se ven menos ajustadas (**Figura 79**), tanto en amplitud, como en la dirección, no afectando los cambios realizados en el modelo, donde la observación sugiere una conducta bastante mareal y un eje bien definido, al igual que los casos anteriores, esto es debido a la mala representación de la topografía y batimetría de la zona. Finalmente tenemos las elipses obtenida en el Canal Utarupa (ver **Figura 80**), en la convergencia entre los canales Vicuña y Darwin, donde las elipses observadas denotan una conducta bastante mareal de la corriente, rasgo levemente replicado por el modelo, donde se observa una leve mejora en las amplitudes de los ejes, pero no de la dirección. Sin embargo en esta zona es el punto que mejor se ajusta a lo observado.

e) <u>Archipiélago de Chonos</u>

La zona insular de Aysén comprendida entre el archipiélago de las Guaitecas hasta el Archipiélago de Chonos se considera una zona de transición entre un ambiente oceánico, altamente influenciado por forzantes remotos, a una zona con propiedades estuarina, donde los forzantes son mayormente locales. Existe una gran variabilidad dentro de esta zona, precisamente por sus singularidades que resultan en zonas cercanas geográficamente pero considerablemente diferentes desde el punto de vista oceanográfico. Donde la influencia de la marea varía de un lugar a otro de manera considerable. Los equipos usados en esta zona se muestran en la **Figura 66.**

En canal Bynon se presentan elipses relativamente bien ajustaste en la configuración actual de **MOSA**, estando un tanto desfasada de la observada (ver **Figura 81**). Por su parte en el Canal Pérez Norte presenta una conducta mareal fuertemente marcada, la cual es lograda por MOSA en su versión actual, donde la configuración anterior no era capaz de lograr la elipse de manera correcta subestimando su amplitud de manera drástica (**Figura 82**). Finalmente para esta zona tenemos el

punto de control, en Canal King, presentando sus resultados en la **Figura 83**. En ella podemos notar que si bien los ejes de rotación y oscilación de la componente M2 son correctos, las amplitudes nuevamente son subestimadas por MOSA, aun cuando esta mejora leventemente entre su versión inicial y la actual.

III) VIENTO

Se utilizó 3 puntos de control para evaluar el forzante del viento utilizado en MOSA, uno en Ancud, otro en Chaitén y otro en Puerto Aysén, basados en estaciones de la Dirección meteorológica de Chile (ver **Figura 84**). Al comienzo se utilizó como forzante atmosférico datos extraídos diariamente de GFS. Estos datos en un inicio tenían una resolución de 0.25°, pasado a ser de 0.125°. Luego se migró al uso de datos obtenidos de un modelo operacional de la Dirección Meteorológica de Chile para la zona. Este modelo está basado en WRF y tiene una resolución de 12 km. Para realizar una comparativa se construyeron rosas de viento para los datos observados y los pronosticados, usando valores horarios. Se usó el mes de marzo como muestra de GFS, y el mes de mayo, donde ya está implementado WRF.
La estación de Ancud muestra un viento dominante del sureste durante marzo, mientras el modelo GFS presenta un viento oeste bien marcado, con magnitudes levemente más débiles que las observadas (ver **Figura 85**). En mayo, mes donde ya se usa WRF, los datos observados dan cuenta de un viento norte y noroeste principalmente, mientras que el modelo presenta un viento norte y noreste bien marcado aunque nuevamente el modelo subestima las magnitudes (**ver Figura 86**).

En Chaitén podemos observar un viento predominante del oeste para el mes de marzo, de igual modo el modelo GFS indica un viento oeste, siendo predominante del noreste con magnitudes bastante similares entre ambos casos (ver **Figura 87**). En mayo se observa un viento predominante del norte, rasgo que alcanza a replicar levemente el viento modelado por WRF, donde el viento predominante es noreste con una componente importante de viento oeste (ver **Figura 88**). Las magnitudes parecen estar dentro de los rasgos observados. Este desajuste podría deberse a la compleja topografía que rodea la zona la cual conduce a singularidades en los modelos atmosféricos.

La estación en Puerto Aysén presento un viento suroeste bien definido para el periodo de marzo (ver **Figura 89**), mientras que GFS en el mismo periodo se mostró más variable y un tanto alejado de lo observado, con predominancias de viento oeste, este y algo de viento sur, refleja las particularidades de la zona, un lugar rodeado de grandes elevaciones que conducen a patrones locales de viento.

En mayo, periodo usado para contratar el uso del modelo WRF, el viento predominante fue norte noreste este en la estación, rasgos que también se aprecian en el modelo WRF, cuyas predominancias estuvo en vientos norte y noreste, con magnitudes bastante ajustadas por parte del modelo (ver **Figura 90**).

5.2 Objetivo N°2

Desarrollar un estudio de evaluación de las tecnologías asociadas a la obtención de información en tiempo real desde terreno y su producción para diferentes niveles de usuarios existentes.

El desarrollo de este objetivo obedece una prueba piloto cuya función es generar alternativas de bajo costo para monitoreo de aguas interiores y junto a esto, generar una convergencia de la información disponible de distintas instituciones en observación oceanográfica en la zona sur austral de Chile. Los datos derivados de estos sistemas de monitoreo serán funcionales en sí mismos como información relevante para estudiar cambios y tendencias de variables oceanográficas y eventualmente para su utilización en alertas tempranas, sin embargo, en el corto plazo (etapa III) será utilizado para calibrar y evaluar el modelo de pronostico hidrodinámico regional MOSA.

Con el fin de presentar una cronología de las actividades que se desprenden en cada una de las etapas del proyecto, se presenta de forma esquemática en la **figura 91,** una línea de tiempo y las actividades asociadas a cada una de estas etapas. Si bien es cierto, este informe incluye los objetivos y actividades de la Etapa II, se incluye lo realizado tanto en primeras etapas como las perspectivas de la Etapa III, de manera que se tenga una comprensión más cabal de desarrollo integral del objetivo.

5.2.1 Diagnostico situación actual de la observación oceanográfica en tiempo real en fiordos y canales de sur de Chile:

- **Nivel del Mar –SHOA**: El nivel del mar es el que posee en la actualidad mayor cantidad de mediciones, encontrándose en el área un total de 11 mareógrafos distribuidos entre Puerto Montt y Puerto Williams (**Figura 92),** los cuales cuentan con transmisión de datos en línea y son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), cuyos datos se pueden visualizar en el sitio http://www.ioc-sealevelmonitoring.org. Estos datos pueden ser integrados a la red de observaciones del sistema predictivo para validar el nivel del mar del modelo, la cual es una condición esencial para resolver la hidrodinámica estuarina de la zona.

- **Boya COPAS – Puyuhuapi**: Boya oceanográfica y meteorológica en el Canal Puyuhuapi, ubicada a una profundidad de 188 metros (fondeo) y a 900 metros de la costa. Esta boya registra en forma continua variables oceanográficas mediante un módulo marino (sonda YSI 6600-V2) que mide cada 1 hora la temperatura, salinidad, oxígeno y pH superficial; y un módulo atmosférico que mide, cada 3 minutos, la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, y magnitud y dirección del viento. Esta boya se encuentra bajo la administración del programa Sur-Austral de COPAS.

- **Plataformas de observación de MUSELS – Chiloé Central**: 2 plataformas flotantes que forman parte del sistema de monitoreo oceanográfico-ambiental del Núcleo Milenio MUSELS, en dos áreas geográficas del mar interior de Chiloé, los canales Lemuy y Dalcahue. Las plataformas, que están sujetas a los sitios de muestro mediante sistemas de anclaje permanente, tienen acoplados equipos oceanográficos (WetLab WQM – SeaBird) que registrarán datos marinos de alta calidad. (Temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila y turbidez más un sistema de medición de pH de alta precisión).

- **Boya oceanográfica INTEMIT – Chaulinec, Chiloé**: Como parte del proyecto Innova Corfo N°13BPC3-19145. El Instituto Tecnológico de la Mitilicultura (Intemit) busca fortalecer la sostenibilidad de la industria mitilicultora nacional, mediante la generación información ambiental, para esto fue instalada una boya oceanográfica, administrada por la empresa consultora INNOVEX, ubicada al sur de isla Chaulinec. Actualmente, este sistema de monitoreo ambiental autónomo (SIMA) registra cada 10 minutos las variables de temperatura, oxígeno disuelto, la velocidad y dirección de corrientes.

La **Tabla 10** muestra las características de cada uno de los sistemas descritos anteriormente. 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, excepto de boya ubicada en Puyuhuapi. Información de corrientes es también muy escasa, debido a los mayores costos asociados al instrumento (ADCP). En relación a la transmisión 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 datos. 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 recientemente (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, se asegura una mayor 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. En comunicación personal con el investigador responsable de estas plataformas, Dr. Diego Narváez, indicó que los rangos de las variables se corresponden a los valores de la zona y a las mediciones de control realizadas.

La boya ubicada en las cercanías de isla Chaulinec, en Chiloé que se encuentra bajo la responsabilidad del Instituto Tecnológico de la Mitilicultura (Intemit) y la asesoría técnica de la empresa INNOVEX, presenta sensores desarrollados por esta última, cabe señalar al respecto, que la medición de corrientes es realizada por un equipo (minitilt) que contiene un acelerómetro y un inclinómetro, con el cual, calcula la velocidad y dirección de la corriente, no existiendo información que permita comprobar su exactitud. Respecto de datos de otras variables se tuvo acceso a información de salinidad, encontrando rangos en la superficie muy superior a los observados en la zona (>34 psu), la temperatura presenta saltos escalonados en su variación temporal, probablemente asociado a un mal ajuste en el redondeo de decimales.

Dado este primer diagnóstico respecto de las plataformas de observación evaluadas, se comenzaron las gestiones para generar vínculos colaborativos con 2 de estas entidades: Copas Sur-Austral y Musels, para lo cual, ya existen protocolos de acuerdo para la firma de convenios entre IFOP y estas instituciones.

- Convenio Copas Sur-Austral - IFOP: En general, el acuerdo entre las instituciones es compartir la información, además del compromiso de IFOP de poner en operación el módulo atmosférico y cubrir el costo de las mantenciones del fabricante.

- Convenio Musels-IFOP: El compromiso de IFOP respecto de estas plataformas es un primer punto es generar la trasmisión en tiempo real y agregar una estación meteorológica en cada uno de estos sistemas de observación, para esto se cuenta con un sistema de transmisión de datos vía GSM.

5.2.2 Implementación de nuevos puntos de Observación.

Adquisición de equipos: El equipamiento adquirido por IFOP consta de lo siguiente:

- 3 equipos multiparámetro INW: Conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, presión.
- 5 Estaciones meteorológicas Gill: Viento (ultrasónico), presión atm., temperatura, humedad relativa.
- 5 Logger HOBO RX3000 de almacenamiento y transmisión de datos en tiempo real via GSM (red celular).

Como parte de la implementación del sistema de observación y transmisión de datos, se contó con la colaboración de Unisource Ingeniería, empresa especializada en ingeniería e instrumentación medio ambiental. El objetivo de esta asesoría era la integración de todos los instrumentos al sistema de transmisión de datos. Cabe señalar que la compra tanto de los equipos como el posterior acople de estos por parte del consultor, tomó mayor tiempo de lo esperado, por lo cual, solo fue posible contar con todo el equipamiento los primeros días de junio de 2016 provocando un retraso generalizado en las pruebas iniciales.

La puesta en marcha en modo prueba del sistema fue implementada de manera tal que se permitiera evaluar el sistema en varios puntos. Para esto se instalaron dos sistemas de monitoreo (estación meteorológica, multiparámetro INW y transmisión de datos) en cada una de las plataformas de tiene el Núcleo Milenio Musels en los sectores de Quiquel y Vilipulli, cercanías de Dalcahue y Chonchi respectivamente. Estos lugares permitían una adecuada supervisión de los equipos dada la cercanía de estos lugares con el centro de IFOP en Castro y además de esto, permite evaluar los sensores marinos contra las mediciones de un equipo robusto como el WQM-SeaBird que tiene Núcleo Milenio Musels en estas instalaciones, de esta forma, al término del periodo de pruebas se podrá contar con un valor cuantitativo de desviación entre los equipos. Finalmente, estos lugares cuentan con cobertura de señal celular y además están bajo el resguardo de personal de los centros de cultivo de mitilidos en que se encuentran ambos lugares.

La instalación de los equipos en ambos sectores se realizó sin inconvenientes, quedando los sensores marinos a una profundidad de 4 m. y la estación meteorológica, junto al sistema de almacenamiento y transmisión a 2 m. sobre la plataforma **(Figura 93**). Los equipos transmitieron información sin inconvenientes, que era posible visualizarla a través de la plataforma web Hobolink (www.hobolink.com) **(Figura 94).**

Durante el tiempo de supervisión de los datos se observaron en algunos periodos saltos en las series de datos que sugerían fallas en la correcta lectura de los sensores **(Figura 95).** De esta manera, ingenieros de Unisource llegaron a la conclusión, mediante distintas pruebas, que el sensor ultrasónico de viento de la estación meteorológica genera súbitamente un consumo muy alto de energía que colapsaba la placa que interpreta las distintas señales de cada instrumento. Esto se producía al aumentar la intensidad del viento, de manera automática el sensor ultrasónico eleva la cantidad de muestras de manera de elevar la resolución temporal de la medición generando un alto consumo de energía durante estos instantes y generando un “bloqueo” de la placa electrónica que se encarga de ser la interfaz entre los sensores y la transmisión. Esto derivó en que los instrumentos fueron retirados y enviados a Unisource para que se implementen las mejoras necesarias para el correcto funcionamiento de los equipos. Se estima que para fines del mes de julio de 2016, estén operando de manera normal en las plataformas para el periodo de evaluación de datos.

Las siguientes actividades pertenecen a la Etapa III de este proyecto, sin embargo, se explican de manera general para mantener el contexto del desarrollo de las tres etapas.

5.2.3 Plan de monitoreo y validación de plataformas de observación IFOP.

Esta actividad tiene por objetivo conocer las desviaciones y rangos de exactitud de los equipos marinos instalados, contrastándolo con un equipo robusto (WQM de SeaBird) instalado en los mismos lugares y a la misma profundidad. Junto a esto, al menos una vez al mes, se realizarán visitas a los equipos para chequear su estado y realizar limpieza de fouling, durante estas visitas se harán lances de CTD y de tomarán muestras de agua para determinar la concentración de oxígeno disuelto a través de método Winkler y así evaluar el sensor óptico de oxígeno disuelto del equipo.

5.2.4 Búsqueda de sectores geográficos para ubicación de plataformas

Posterior a la validación de las plataformas de observación implementadas, estas serán ubicadas en lugares selectos que deberán cumplir criterios para un adecuado funcionamiento. Desde el punto de vista oceanográfico la visión es monitorear las distintas cuencas del mar interior de Chiloé, o sea aquellos sistemas separados por límites topográficos relevantes y que sean lo más representativo de condiciones generales, evitando en la medida de lo posible, perturbaciones locales como puede ser: bahías o canales muy pequeños, zonas de poca profundidad y rangos de marea muy altos, cercanía a ríos o esteros no cuantificados, etc. Por tanto, tenemos el sistema representado por el golfo Corcovado hasta el cinturón de islas Desertores, un segundo sistema representado por el golfo de Ancud (entre Desertores y la entrada al golfo de Reloncaví) y finalmente el golfo de Reloncaví **(Figura 96).**

Desde el punto logístico existen algunos criterios que deben cumplirse:

- **Cubertura de señal celular:** La cubertura de señal celular es bastante reducida en el mar interior de Chiloé, con amplias zonas sin señal, especialmente en la provincia de Palena (Chiloé continental). La **figura 97** muestra las torres (antenas) de celular disponible en la zona de acuerdo a información de la Subsecretaria de Telecomunicaciones (http://antenas.subtel.cl). En esta etapa no se evaluó un sistema de trasmisión satelital, ya que los costos para los 3 puntos de monitoreo estaban sobre el presupuesto.

- **Seguridad**: Se refiere a un sector que permita tener bajo el cuidado y protección al sistema de monitoreo, esto con el fin de evitar daños por condiciones naturales (tormentas), pero por sobre todo, evitar daño de terceras personas (vandalismo).

- **Costos mantención**: Hay lugares que debido a lejanía representan un desafío mayor en cuanto a la operatividad para mantenciones, esto desemboca en mayores costos y mayor tiempo de ejecución de las mantenciones.

De las zonas con cobertura de señal celular, se seleccionaron algunas áreas **(Figura 98**) de deben corroborarse in situ en términos de otros criterios como interés oceanográfico, seguridad y los costos asociados a las mantenciones. Esta actividad será desarrollada en la etapa III. De manera de cruzar toda la información y poder implementar de mejor forma los puntos de observación.

5.2.5 Almacenamiento, control de calidad y visualización de datos en plataforma web de sistema operacional:

La información que es transmitida desde los sensores debe ser almacenada y procesada en al menos 2 servidores (sistema redundante) para asegurar la información ante posibles fallos que puedan surgir por su uso continuado, entregando protección y confiabilidad al sistema. Este tipo de sistemas se encarga de realizar el mismo proceso en más de una estación de trabajo, ya que si por algún motivo alguna dejara de funcionar o colapsara, inmediatamente otro tendría que ocupar su lugar y realizar las tareas del anterior. Está información deberá ser revisada de manera automatizada a través de códigos informáticos para asegurar que los rangos de las observaciones se mantengan dentro de la variabilidad natural del sistema. Finalmente, la información será procesada y presentada en el sitio web del sistema operacional, en este se mostrarán distintos tipos de productos que serán desarrollados como parte de la etapa III.

5.3 Objetivo N°3

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

Para desarrollar este objetivo, se han realizado diversas actividades enfocadas en la difusión y en el intercambio de opiniones entre diversos grupos de trabajo que serán el público objetivo del sistema MOSA. Estas actividades consistieron en talleres de difusión, presentación en seminarios, talleres de trabajo, jornadas de trabajo con personal de Subpesca, firma de convenios de cooperación y consultas con programadores web para desarrollar una versión final del portal de información IPROACH, que este orientado a un uso práctico directo y rápido.

Una de las componentes principales de trabajo en este proyecto ha sido mantener un canal abierto de comunicación constante con la contraparte técnica de la Subpesca, hecho que ha sido fundamental en la conducción del proyecto, puesto que son ellos los principales usuarios de los productos de MOSA.

Talleres de Difusión y Seminario

Se realizaron 2 talleres de difusión de estado de avance de este proyecto. Estos talleres fueron abiertos a la comunidad aunque enfocados a la discusión académica con diversos especialistas en modelación y oceanografía en Chile.

Taller de difusión n°1

Lugar: Hotel Gran Pacifico, Puerto Montt

El día 14 de agosto de 2015, 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, personal de la Dirección Meteorológica de Chile, personal de la Subsecretaria de Pesca 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. El hito más relevante de este encuentro de centró en la gestación de vínculos entre la Dirección Meteorológica de Chile e IFOP en términos del uso del modelo WRF para forzar modelo operacional MOSA.

Taller de difusión n°2

Lugar: Hotel Los Ñirres, Coyhaique

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. Estuvieron presentes académicos, autoridades de IFOP, personal de la Dirección General de Aguas, personal de la Subsecretaria de Pesca entre otros. Este taller contó con la presentación de varios expositores, entre los que contó con una rigurosa explicación del sistema de observación de caudales de la Dirección General de Aguas, esto permitió un acercamiento entre las instituciones con posibilidades de cooperación en la extensión de medición de caudales en ríos aun no cuantificados.

Exposición en seminario de Geofísica

El día 6 de noviembre, 2015 se realiza el seminario "*Modelación numérica océano-atmósfera como herramienta de gestión costera: Ejemplo de la acuicultura en el Sur-Austral de Chile*", en el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, donde el investigador Elías Pinilla, perteneciente al grupo de trabajo de Putemún, IFOP, presenta el trabajo realizado hasta la fecha, destacando los avances en modelación hidrodinámica y observación logrados, despertando un gran interés en la comunidad académica presente, dando lugar a una fructífera discusión. A su vez los académicos presentes muestran gran interés en el desarrollo de las actividades del proyecto, sugiriendo varias propuestas para mejorar el enfoque y desarrollo de este. Se concilió la postura que es necesario aumentar las observaciones en la zona y que se hace imperativo contar con una red de monitoreo.

Trabajo de intercambio de información con Subsecretaría de Pesca y Acuicultura

Entre los días 25 y el 29 de enero de 2016 visitó las dependencias de IFOP en Putemún, la M. Sc en Oceanografía Susana Giglio, en representación de Subsecretaria de Pesca. Esta visita tuvo como objeto familiarizar a la institución con el trabajo de IFOP en modelación, presentar las herramientas de trabajo disponible, los resultados obtenidos a la fecha, las metodologías utilizadas y recopilar la mayor cantidad de información posible, a su vez de capacitar a la invitada en el manejo de las herramientas de modelación empleadas por IFOP. De este modo se pudo generar un marco de discusión sobre la conducción de los proyectos y sus líneas de investigación.

Se explicó en detalle cada uno de los proyectos que se han ejecutado en el pasado pero con especial énfasis en la ejecución de este proyecto. Se detalló en funcionamiento del modelo de pronósticos, sus fortalezas, limitaciones y potencialidades. Esta visita permitió conocer desde el punto de vista de uno de los principales usuarios del sistema, cuales son los requerimientos o preguntas que deben sintetizarse en las aplicaciones o productos que derivan, tanto de las observaciones, como de los modelos implementados, centrándose en la necesidad de herramientas que permitan estimar o predecir el transporte de patógenos ante un brote virus, esto referido a la industria acuícola, como necesidad de la autoridad para la toma de decisiones.

Reuniones académicas con el consultor académico a lo largo del proyecto

Se han realizado diversos de talleres de trabajo de carácter académico con docentes de la Universidad de Concepción, quienes a su vez son los asesores técnicos en la implementación del modelo. A través de esta forma de trabajo se ha dado lugar a un ambiente de discusión continua que ha permitido acercar las visiones de cómo desarrollar este tipo de modelos en Chile, apoyados por la experiencia del Dr. Andrés Sepúlveda, quien ha participado en las pocas experiencias anteriores en el país con este tipo de sistemas.

A su vez se ha establecido reunión de carácter técnico con docentes de la misma universidad, pero de distintos grupos de trabajo, como MUSELS y COPAS-SUR AUSTRAL, con quienes se han firmado convenios de cooperación para potenciar la red observacional de Chile. En estas reuniones se ha podido presentar MOSA, donde ellos como futuros usuarios han podido aportar.

Portal IPROACH

El portal hasta ahora ha funcionado a modo pruebas, en parte debido a que el modelo aún no cuenta con suficiente evaluación como para montar resultados de mayor confianza. Sin embargo, se ha mantenido un canal de comunicación estrecho con Subpesca en cuanto a recoger las necesidades principales que debe satisfacer el portal. En torno a esto se ha recopilado diversas propuestas de consultores de páginas similares a modo de generar un diseño final que permita una expansión natural del portal, agregando información en tiempo real de una red de monitoreo ambiental in-situ, pronósticos de condiciones oceanográficas y la posibilidad de revisar información histórica, así como también vinculación a portales con bases de datos relevantes.

La experiencia de este tipo de portales en Chile ha sido acotada, por lo que la conducción a una versión final ha tomado una discusión más compleja de lo estipulado inicialmente, ya que los usuarios iniciales serán autoridades y tomadores de decisiones, por lo que el portal, si bien debe tener un carácter académico, a su vez debe ser amigable, eficiente y directo. Se pretende que al finalizar la etapa III, cuando este sitio este completamente operativo, se realice una serie de talleres de difusión de su contenido a los diversos usuarios a los cuales está enfocado.

6. DISCUSIÓN

Diseño del sistema operacional

Este proyecto se encuentra divido en 3 etapas, siendo el presente informe, la parte final de la etapa II, sin embargo, hay que tener en cuenta que el desarrollo del sistema operacional en su conjunto, no entrará en marcha sino hasta la etapa III.

Se construyó un marco conceptual para el desarrollo de la oceanografía operacional en la zona Sur-Austral de Chile. Este modelo esquemático **(Figura 12)** presenta los módulos principales de un sistema de estas características, estos son: un sistema de observación, un sistema de gestión y asimilación de datos y modelos numéricos, en general, la mayor parte de este tipo de sistemas desarrollados alrededor del mundo tienen ese esquema.

Cada una de las etapas contempla el desarrollo escalonado de cada uno de los módulos **(Figura 12**), así en esta primera etapa se presenta el diseño del sistema operacional relacionado principalmente con la implementación y evaluación del modelo numérico ROMS_AGRIF en modo pronósticos, un diagnóstico de sistemas de observación en la zona sur de Chile y el desarrollo de un sitio web experimental. La segunda etapa, contempla de modo general la calibración y evaluación del modelo ROMS_AGRIF, principalmente en lograr consistencia en rasgos típicos de la zona (amplitud de marea, estratificación vs mezcla, sensibilidad a fuente de datos de viento, etc.), en esta etapa también se contempla el levantamiento de nuevos puntos de observación. Finalmente, la etapa III contempla la optimización del modelo, que básicamente es la continuación del proceso que debe ser permanente de evaluación y calibración, en este caso las etapas anteriores permitirán direccionar de mejor forma el mejoramiento del modelo (mejora fuentes de datos, anidamientos, etc). La puesta en marcha de aplicaciones relacionadas con conectividad también se visualiza como parte de esta etapa que comprende la marcha oficial del sistema.

Experiencias anteriores en Chile

Respecto de experiencias anteriores en Chile, cabe señalar algunos puntos importantes en los cuales se debe poner atención. En primer lugar, el sistema operacional desarrollado para la acuicultura, liderado por SalmonChile y financiado por Corfo, carecía fundamentalmente del capital humano y experiencia suficiente como para direccionar la mejora constante del sistema, eso contribuyó a que los procesos de evaluación-calibración no fueran los adecuados, al mismo tiempo, la estructura rígida de presentación de resultados no lograba conectar con las necesidades del usuario específico (industria del salmón).

Para el caso del sistema implementado en la IV región (Ramos, 2012), se incluía distintos niveles de modelación (hidrodinámico, bio-físico, bio-económico) para abordar estudios sobre especies

costeras con fines de asesoramiento para el manejo, sin embargo, la dificultad de replicar los patrones de circulación costero a través de modelos de escala oceánica dificultaron el desarrollo de los restantes modelos. La implementación de modelos costeros de mayor resolución como FVCOM, pueden mejorar la circulación costera pero a un mayor costo computacional.

El desarrollo de este sistema operacional toma en cuenta las dificultades encontradas en los sistemas operacionales anteriormente planteados, o al menos en parte. En este sentido, la formación de capital humano en procesamiento y análisis de observaciones oceanográficas y la implementación de modelos hidrodinámicos en el sur de Chile, contabiliza ya un desarrollo de 5 años, en donde se ha formado una masa importante de profesionales especializados en estos tópicos, aunque sigue siendo insuficiente. Junto a esto, se ha realizado un acercamiento permanente hacia académicos tanto chilenos como extranjeros relacionado a estas temáticas.

El principal usuario de este sistema, al menos en su concepción original, es el Estado de Chile a través de las instituciones encargadas de la regulación de la acuicultura (Subpesca y Sernapesca), por tanto, las aplicaciones que se desarrollan en la etapa III están dirigidas a resolver algunos de los problemas más recurrentes en la industria acuícola, como son la conectividad de partículas entre centros de cultivo, barrios y macrozonas, principalmente respecto a transporte de patógenos y contaminantes.

Otro punto que cabe mencionar, es la aparición en el diseño conceptual de un modelo biogeoquímico, que si bien no forma parte del desarrollo de las 3 etapas, si debiese acoplarse en una siguiente fase. Dado que existe un proyecto paralelo llevado por IFOP en donde se ha comenzado su implementación en el mar interior de Chiloé. Este modelo funcionaría acoplado a la hidrodinámica pronosticada, pudiendo entregar parámetros críticos para el manejo medioambiental, tales como oxígeno disuelto, clorofila, nutrientes, etc. Es por esta razón, que es imprescindible que la continuación del sistema operacional forme parte de un programa permanente que permita en un futuro en manejo de la acuicultura de manera integral.

El marco conceptual, por tanto resume como debiera funcionar este sistema operacional en su etapa final, es decir, un modelo que es forzado por un modelo atmosférico acoplado, y que recibe condiciones de borde y condiciones iniciales de modelos operacionales globales. Mientras que una red de observaciones entra a un sistema de gestión de datos y a través de procesos de asimilación de datos, modifican la condición inicial de este, mejorando considerablemente el desempeño del modelo. Los resultados del modelo y observaciones finalmente son presentados en una página web como un producto enfocado a distintos tipos de usuarios.

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 48 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 desarrollo del modelo contempló la creación de 2 dominios, uno que comprende los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén y otro exclusivo para la región de Magallanes. Esto permite una mejor evaluación de los modelos, como también una mejor configuración de los núcleos para su corrida, haciendo más eficiente la operatividad y mejorando los tiempos de cómputo, los cuales siempre son un limitante en la realización de modelaciones hidrodinámicas. Los dominios tienen resoluciones horizontales cercanas a 1 Km y 32 niveles verticales tipo sigma, la cual es una distribución que considera la configuración topográfica del fondo marino, dándole peso a los accidentes batimétricos que interfieren la dinámica de la zona. Sin embargo, en la puesta en marcha del modelo, el dominio de Magallanes demandó una mayor atención debido a la alta inestabilidad que presentó. El tamaño del dominio de Magallanes eleva de manera significativa el número de elementos que posee, siendo más del doble que el de Chiloé Aysén, esto debido a que comprende una zona bastante extensa, con una configuración topográfica extremadamente compleja, que da lugar a un sin número de singularidades en la máscara y en la malla del modelo, lo cual implica necesariamente un mayor tiempo de cómputo. Como consecuencia de lo anterior, y para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, que se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del Modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido estable, y su menor tamaño permite gestionar los recursos computacionales de manera más eficiente, permitiendo una mayor libertad en el trabajo de evaluación y calibración.

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.

En este sentido, MOSA recoge 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).

En términos de operación, MOSA es capaz de entregar resultados de pronósticos de variables oceanográficas con un horizonte de 48 horas, realizando simulaciones del tipo -1,+3, esto quiere decir que simula un día anterior y 3 días hacia adelante, siendo el mismo día que comienza la simulación parte del pronóstico. Como este proceso demora cerca de 9 horas (entre las descargas de datos iniciales, la ejecución del modelo y la presentación de datos en la web), cuyos resultados estarían disponibles cerca de las 12:00 pm, es que se realiza un pronóstico de 3 días, así se logra que la predicción de 48 horas se pueda cumplir.

Resultados y Evaluación de MOSA

Para evaluar el modelo sinóptico (MOSA) es previamente imperativo establecer las complejidades del desarrollo de un sistema de estas características, a modo de conducir una discusión objetiva, pero también flexible en cuanto a la rigidez de los resultados, los cuales fácilmente pueden ser castigados por valores estadísticos brutos, que no ahondan en las virtudes del modelo. Las complejidades mencionadas vienen dadas básicamente por tres factores principales: a) la compleja configuración topográfica y batimétrica de la zona, que inducen a innumerables singularidades en el ambiente marino, b) la carencia de una red de monitoreo in-situ que permita establecer de manera más acabada la variabilidad temporal y espacial del sistema marino, y c) la limitante en la capacidad de computo disponible, para desarrollar modelos de mayor resolución que sean capaces de resolver estas singularidades.

Ante lo expuesto se hace justo adherir que el modelo empleado (ROMS AGRIF) ha sido desarrollado por la comunidad científica con el objeto de resolver patrones de circulación oceánicos de gran escala, los cuales responden a forzantes de carácter planetario y no necesariamente a procesos locales, costeros ni menos estuarinos, cuyos mecanismos están sujetos a escalas diferentes.

La evaluación de MOSA tiene como objeto diagnosticar e identificar aquellos procesos que se encuentran resueltos de manera errónea y que mediante cambios en datos de entrada (condiciones de borde e iniciales, fuentes de agua dulce, viento, etc.) o bien parametrizaciones pueden ajustarse para disminuir el error. La falta de datos en tiempo real ha supuesto una limitante para evaluar los pronósticos de manera operacional, por lo que una parte de la evaluación se ha enfocado en la

búsqueda de la consistencia del modelo, esto es, desarrollo de patrones generales y estructuras típicas esperables para la zona de estudio, y otra utilizando los pocos datos disponibles en evaluar la calidad del pronóstico.

Precisión del pronóstico

La precisión se evaluó en el nivel del mar y en la temperatura y salinidad de 2 puntos de muestreo en Chiloé Central, Canal Dalcahue y Canal Yal (Isla Lemuy).

En el nivel del mar se consideró que la variabilidad de las corrientes está dominada por la variabilidad de la marea de tipo semidiurno M2 (Salinas & Hormazábal, 2003), la cual contiene el mayor porcentaje de energía (PE), por tanto se asume que si el modelo logra resolver de manera adecuada la constituyente M2, será capaz de resolver la circulación en canales de régimen mareal, por ejemplo el Archipiélago de Chonos.

A través de los resultados se encontró que MOSA resuelve de manera correcta el nivel del mar en los puntos de evaluación, a su vez de manera separada se evaluó la componente M2, la cual junto con la componente S2 conservan el 90% energía mareal de la zona. Las correlaciones entre lo observado y lo pronosticado bordearon el 90 %, así como también las correlaciones entre las constituyentes M2 pronosticadas y observadas. Los errores fueron en gran parte de los casos menores a 50 cm, con la excepción de Puerto Montt, que fue levemente mayor a 1 metro. Aun cuando el modelo logró reproducir de manera consistente la conducta del nivel del mar, éste presentó sus mayores errores en cuadratura, tendiendo mayormente a sobrestimar las amplitudes. Si bien el error puede ser inducido por una pobre representación topográfica y batimétrica de la zona, también se debe tomar en consideración que el modelo obtiene sus condiciones de borde en zonas oceánicas, donde la marea no interactúa con el borde continental; pero que al ingresar a la zona de canales se ve perturbada y modificada al interactuar con la topografía costera, generando componentes de aguas somera. Estas pequeñas imperfecciones pueden ser corregidas a través de una mejor resolución del fondo marino, sin embargo esto implica la necesidad de poseer mejor cobertura de datos batimétricos y modelos de mayor resolución, temas que aún no son resueltos.

Por su parte, el uso de las estaciones de monitoreo de MUSELS en los canales Dalcahue y Yal (Isla Lemuy) representó una herramienta extremadamente útil para verificar la desviación del modelo. Estas estaciones registran la temperatura y la salinidad a 4 metros de profundidad y son un punto de control con un valor indiscutido, ya que permite observar el error del modelo en tiempo real. Lo observado sugiere que MOSA fue capaz de desarrollar la variabilidad temporal en la temperatura en la transición primavera/invierno exhibiendo patrones bien ajustados con los observados, aunque generalmente siendo levemente más cálido el modelo.

Sin embargo, la salinidad, parámetro crítico en la zona de estudio, que modula la densidad y por ende la circulación estuarina, fue pobremente lograda. Los valores de salinidad estuvieron

subestimados en primavera verano y sobrestimados en otoño. Los factores que influyen en estos desajustes de salinidad superficial son diversos. Por una parte tenemos la cuantificación de agua dulce proveniente de los ríos, la cual en muchos casos responde a valores de calibración y ajuste más que a observaciones. Si bien la DGA cuenta con una red de monitoreo de caudales de rio a lo largo de Chile, está enfocada principalmente en los ríos mayores, y solo en contados casos las mediciones son realizadas en la boca del ríos, que es el punto donde cae la totalidad de la descarga, el resto posee mediciones en puntos rio arriba, los cuales no denotan la cantidad real aportada al sistema.

Otro factor determinante es la fuente de las condiciones iniciales del modelo, las cuales en esta etapa están construidas de una base de datos de MERCATOR, aunque desde enero es MOSA quien genera sus propias condiciones iniciales a partir de sus pronósticos, es sabido que debido a sus características globales, MERCATOR no está enfocado para resolver procesos termohalinas en zonas semi estuarinos, como lo es el sur de Chile. Con respecto a lo anterior, se pretende construir las condiciones iniciales de carácter estacional para MOSA, a partir de datos obtenidos en diversos cruceros oceanográficos de IFOP, enmarcados en los proyectos de desarrollo de modelos de alta resolución en el sur de Chile.

En este periodo se están implementando nuevos puntos de monitoreo entre Chiloé, Palena y Aysén, que permitirán, entre otras cosas, establecer un mayor grado de cuantificación del error del modelo, como así también, realizar en modelos anidados experimentos de asimilación de datos, donde se utiliza la información in-situ para mejorar las condiciones iniciales del modelo.

Consistencia del pronóstico

La zona de estudio se caracteriza por poseer patrones de circulación que resultan de la conjunción de forzantes locales, donde la batimetría, la marea, el viento y las descargas de agua dulce construyen un ambiente de características especiales que la diferencian notablemente de su entorno oceánico, donde estos forzantes son de carácter remoto.

La interacción entre aguas de origen fluvial y oceánicas provoca una circulación de gran escala que aparece de promediar el movimiento del agua a través de uno o varios ciclos de marea, (Valle-Levinson, 2015). Este proceso, se vuelve clave a la hora de buscar consistencia en el modelo, puesto que es el indicador que permite orientar el trabajo de calibración en la zona. La presencia de estas estructuras hidrográficas típicas de la zona en los pronósticos, cobran mayor relevancia a la hora de evaluar ya que indica que el modelo es capaz de desarrollar condiciones locales.

En busca de patrones de circulación y de estructuras termohalinas típicas de la zona se comparó MOSA con observaciones obtenidas en la zona de estudio por IFOP. El campo de masa y la corriente de marea fueron evaluados en diversas zonas del dominio, agrupadas en pequeñas macro áreas con rasgos oceanográficos similares, de modo de evitar las singularidades que puede

presentar la evaluación sobre un solo punto específico y entendiendo que aquellas marco áreas presentarán con una conducta similar.

Para este efecto se establecieron 5 áreas de estudio, Golfo de Ancud- Reloncaví, Chiloé Central, Canal Corcovado y Moraleda, Aysén Continental, Aysén Insular (Archipiélago de Chonos, Guaitecas), donde se evaluó la variabilidad estacional del campo de masa, ya que Mosa opera desde agosto de 2015 aproximadamente, y por otra parte se evaluó la corriente de marea semidiurna tipo M2, rasgo que permite cuantificar la capacidad de transporte de la zona.

Campo de masa

Los resultados de estas evaluaciones mostró que MOSA sobrestimó la temperatura (+2ºC). Esta tendencia se observó en todas las zonas referidas, donde en Aysén continental el modelo tendió a aproximarse en superficie a lo observado, sin embargo en el resto de la columna de agua se mantiene el desajuste. En la zona de estudio, la temperatura puede ser alterada por las descargas de ríos con regímenes mixtos, la radiación solar y la mezcla. Este diagnóstico hace imprescindible la revisión de las condiciones iniciales de modelo, debido a que las usadas hasta ahora provienen de MERCATOR, un modelo global que no está diseñado para resolver procesos estuarino de gran escala.

Por su parte la salinidad tuvo una conducta variable. En los sistemas levemente estratificados como en el archipiélago de Chonos, o canal Moraleda, la estructura vertical se aproximó en algunos casos a la observada, incluso con los mismos valores, sin embargo, en la mayoría de los casos no fue capaz de reproducir la capa superficial de baja salinidad presente, haciéndose notar con mayor intensidad en el sistema Jacaf-Puyuhuapi, el cual es altamente estratificado debido a diversos aportes de agua dulce presentes. Aun cuando MOSA usa sus propias condiciones iniciales pronosticadas para alimentar los pronósticos siguientes, es necesario resaltar la conducta del sistema, que presenta periodos de renovación bastante largos en algunos casos. Esto influye directamente en la capacidad de MOSA de desarrollar una mezcla adecuada.

Es probable que el uso de datos provenientes, por ejemplo, de campañas con medición de temperatura y salinidad (CTD) puedan mejorar estas condiciones, aunque su uso conlleve otro tipo de limitaciones como la extensión espacial de los datos, por tanto, no es evidente que por sí sola esta acción mejore los resultados, sin embargo, es necesario realizar experimentos para evaluarlo.

Aun cuando MOSA posee diversas fuentes de agua dulce, el modelo aparentemente tiende a mezclar de sobre manera la columna de agua, o en algunos casos a mantener focalizada las plumas de descarga, no permitiendo una correcta propagación de ellas, generando fuertes gradientes horizontales de densidad. Esto podría deberse a varios factores, por ejemplo la condición inicial es utilizada solo al comienzo de la operación, donde 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. Esta evolución podría demorarse un tiempo adecuado para encontrar el equilibrio, por lo general de debiera espera un año para determinar la capacidad del modelo desarrollar estacionalidad.

Corrientes de marea

Corrientes de segundo orden, estacionarias, impulsadas solamente por las interacciones no lineales del flujo de marea de primer orden pueden ser un componente importante del campo de flujo residual en canales de marea estrechas o estuarios (Ianniello, 1979). A su vez la respuesta de los mares costeros de las mareas depende forzando sobre las propiedades de las mareas en alta mar, los detalles de la profundidad del agua y la costa, y la influencia de la fricción .(Sutherland , *et al*. 2004). La variación de la anchura y profundidad alteran el campo de corriente residual suficiente como para justificar su inclusión en los modelos de circulación residual de las mareas inducida (Ianniello, 1979). Estos rasgos son indistintamente principales en la zona de estudio, por lo que se evaluó el desarrollo de elipses de la corriente de marea tipo semidiurno M2 como un estimativo confiable para ver si MOSA responde adecuadamente a las complejidades expuesta.

Esta evaluación se hizo con la perspectiva de los continuos cambios que sufre la configuración del modelo, donde se identificó una versión inicial (v1), y una versión casi actual (v2), que contiene sustanciales modificaciones, entre ellas ajustes en la batimetría, en los forzantes y en las fuentes de agua dulce entre otros.

En general, se evidenció mejoras en la v2 generando un efecto dramático en la capacidad de MOSA para desarrollar elipses de corriente de marea M2. Fue evidente que un principio el modelo subestimaba dramáticamente el transporte inducido por la marea, sin embargo luego de diversos ajustes este tiende a aproximarse al observado. En la zona de Reloncaví y Golfo de Ancud las elipses se presentaron mejor ajustadas en Paso Nao, mientras los otros puntos evaluados muestran una subestimación del transporte. Al contrario, en la zona de Chiloé Central MOSA tiende a sobreestimar el transporte mareal de la M2 en algunos casos de manera exagerada, sugiriendo una revisión profunda de la batimetría y la línea de costa en esa zona. En zona de grandes superficies, como el Golfo de Corcovado y el Canal Moraleda el modelo se mostró con poca precisión en la dirección, pero la amplitud de las elipses se ajustaron con respecto a la versión inicial.

En Aysén continental podemos distinguir 2 zonas de características bien definidas, por una parte el sistema de los fiordos Jacaf y Puyuhuapi, donde este último ha sido identificado como uno de los únicos lugares en la Patagonia chilena con condiciones de hipoxia < 2 ml L (Schneider et al, 2014). En este fiordo las elipses de marea semidiurna se presentaron bien orientadas, mostrando una enorme mejora en el ajuste con respecto a la versión inicial de MOSA. Mientras que el resto de la zona de Aysén, hacia el sur, MOSA presentó resultados más pobres, con pequeñas aproximaciones

con la observación y una leve mejora con respecto a su versión inicial, aunque exponiendo la necesidad de contar con información batimétrica de mayor calidad.
Sin embargo, en la zona del Archipiélago de Chonos (Aysén insular) es donde se encuentran los mejores resultados der MOSA, presentando gran consistencia en la mayoría de los casos, y una evolución positiva con respecto a la versión inicial de MOSA. La calidad de los datos batimétricos con los cuales se construye el modelo, la topografía menos compleja de los canales y su cercanía con el ambiente oceánico son los factores que explican principalmente los resultados.

Viento

En una zona con las características estuarina como el sur de Chile, donde puede existir una fuerte estratificación en el fiordo causada por la presencia de aguas de alta boyantes, el viento se vuelve importante ya que, la estratificación atrapa la respuesta de la tensión del viento en las capas cercanas a la superficie (Svendsen *et al.,* 1978).

La información en línea disponible para la zona de estudio permitió evaluar el uso del modelo atmosférico GFS como forzante y contrastarlo con el uso de WRF, ambos modelos operacionales con resoluciones similares, pero construidos desde perspectivas diferentes. Mientras GFS es un modelo global, que busca reproducir vientos a gran escala, el modelo operacional de WRF (implementado por la DMC) contiene un enfoque más local, y busca resolver las complejidades topográficas que dan como resultado el desarrollo de complejos patrones locales. En este caso se logró observar que uso del viento WRF presento mejores resultados que GFS, sin embargo en la estación de Chaitén esta mejora no fue evidente, aun cuando la zona presenta una topografía altamente compleja. No obstante se cumple con mejorar el forzante y da lugar a una continuidad en el uso de este modelo, pues se espera desarrollar un modelo operacional especial para MOSA, implementado en la base de Putemún, IFOP, lo cual permitirá aumentar la resolución de este buscando resolver las singularidades de la topografía de la zona.

En resumen, en esta etapa de desarrollo del proyecto se tiene un modelo operacional, capaz de generar pronósticos de corrientes, salinidad, temperatura y nivel del mar, que si bien aún está en etapa de pruebas, ha evidenciado una evolución positiva en los resultados, desarrollando en ciertas zonas las estructuras observadas, especialmente en zonas donde la influencia mareal es mayor. Por su parte la componente baroclínica de la circulación aun exige un gran número de desafíos por superar. Estos desafíos se componen de diversos elementos, por una parte el trabajo dentro del modelo, relacionado con mejoras en las parametrizaciones, el modelo de elevación digital, la resolución de la máscara, el ingreso de fuentes de agua dulce, mejorar el forzante atmosférico. Y por otra parte se encuentra la componente observacional, la cual es un pilar fundamental en el sistema, ya que de ella obtendremos la cuantificación real del error de los pronósticos, y nos permitirán mejorar las condiciones iniciales 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, excepto de 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 recientemente (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, se 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 en julio de 2016 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.

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 una objetivo muy difícil. 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 batimetrías 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. Se espera que para la etapa III, se puedan seguir sumando actores relevantes que contribuyan a un mejor destino de este importante objetivo.

7. CONCLUSIONES

Se generó el diseño para el desarrollo de oceanografía operacional en la zona Sur-Austral de Chile. Este marco conceptual consiste en una serie de módulos que deben desarrollarse durante las 3 etapas de desarrollo del sistema operacional (2014-2017). Estos módulos incluyen: Sistema de monitoreo, sistema de control y asimilación de datos, modelo atmosférico, submodelo de agua dulce, modelo hidrodinámico y plataforma de visualización de información.

Se implementó un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS_AGRIF, con pronósticos a 48 horas de variables oceanográficas (temperatura, salinidad y corriente en esta primera etapa), desarrollándose la automatización de los elementos que alimentan el modelo. Se dividió en 2 dominios el área de estudio, uno que comprende los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén y otro exclusivo para la región de Magallanes. Se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del MOSA, y así concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido estable, y su menor tamaño permite gestionar los recursos computacionales de manera más eficiente, permitiendo una mayor libertad en el trabajo de evaluación y calibración.

Para el dominio Chiloé Aysén, MOSA logra pronosticar de manera confiable el nivel del mar en los puntos de control, obteniendo correlaciones cercanas al 90 % en todos los casos, y logra también reproducir la componente M2, principal constituyente armónica de la marea. Este rasgo fue parcialmente replicado en las corrientes, donde elipses de corriente de marea para M2 reflejan un mayor ajuste de MOSA en zonas donde el transporte por marea se hace significativo.

El campo de masa arrojó resultados variables, no logrando reproducir la estratificación adecuadamente en la mayoría de los casos. La temperatura aún está alejada de los valores observados, no siendo capaz de reproducir la termohalinas observadas y mostrando valores de +2ºC de diferencia con lo observado en toda la columna. Todo esto estaría indicando que las condiciones iniciales basadas en el modelo global Mercator son inadecuadas para zonas estuarina internas, a su vez parece claro existe una subestimación del volumen de agua dulce que ingresa al sistema marino, sin embargo es necesario esperar un tiempo suficiente para estudiar la evolución del modelo y su capacidad de estabilizarse.

Se migró desde un forzante atmosférico de características globales (GFS) a uno con un enfoque más local, basado en WRF, perteneciente a la Dirección Meteorológica de Chile, el cual presentó mayor consistencia en los puntos evaluados, permitiendo una continuación en su uso a través de una futura implementación de un modelo operacional de WRF de mayor resolución exclusivo para MOSA.

Desde la región de los Lagos a Magallanes se identificaron 5 puntos de observación permanentes de los cuales 3 de ellos presentan posibilidades ciertas de ser utilizadas en el sistema operacional, estas se ubican en canal Dalcahue y canal Lemuy en Chiloé central, mientras que la restante se ubica en canal Puyuhuapi, ambas pertenecientes a instituciones académicas. El resto de las observaciones o presentan datos no confiables o no se encuentran disponibles para su uso.

Se implementaron 3 sistemas de observación en tiempo real que cuentan con parámetros atmosféricos (presión atm, viento, humedad relativa, temperatura del aire) y marinos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y presión). El sistema presentó una falla electrónica asociada a sobre carga del sensor de viento, esto retraso la puesta en marcha, sin embargo, esta falla ya está siendo corregida y prontamente estarán desplegados para el periodo de pruebas que corresponde.

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

Chassignet, Eric P., Verron, Jacques (Eds.). 2006. Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography, XII, 577 p.

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.

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-

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.

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.

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

FIGURAS

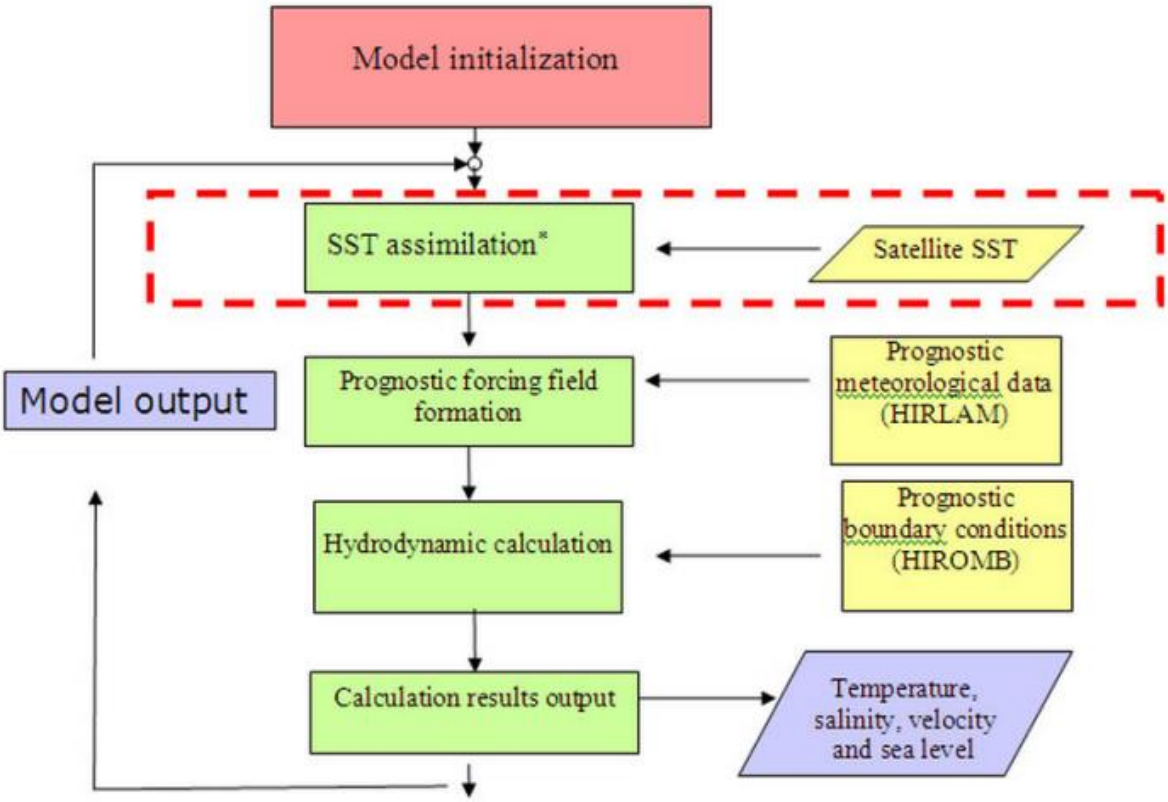


Figura 1. Sistema oceanográfico operacional en el golfo de Finlandia.

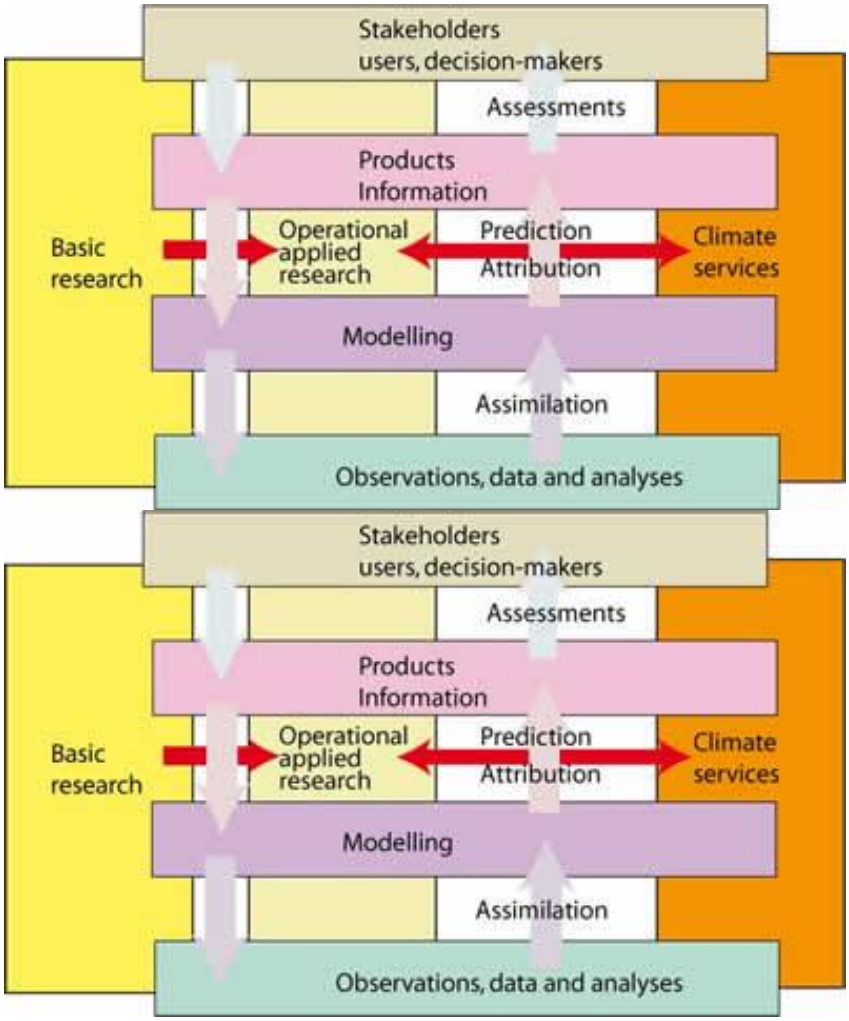


Figura 2. Marco conceptual para un sistema de información sobre el clima. Fuente: Trenberth (2008), Boletín de la OMM 57 (1).

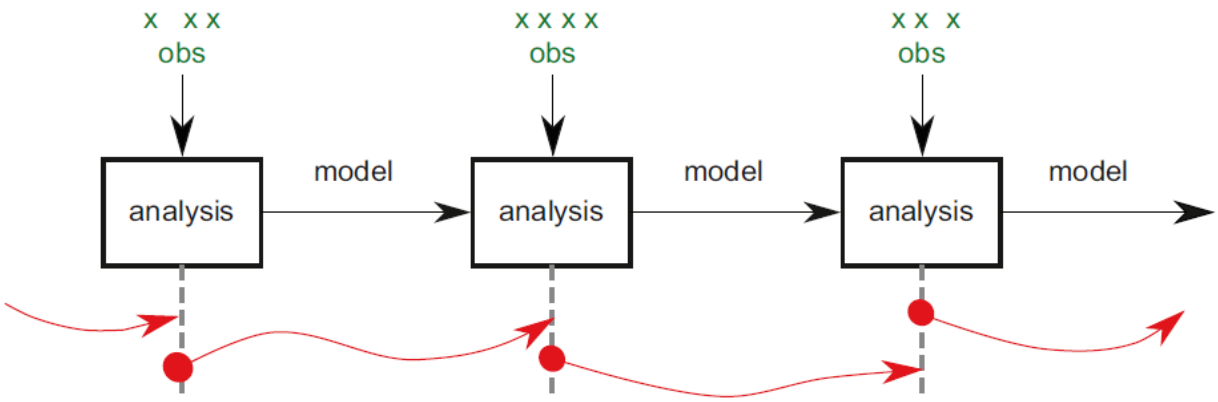


Figura 3. Análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo. Las lines rojas indican el estado del oceano predecido a partir de condiciones iniciales en el tiempo de analisis (puntos rojos). Las observaciones obtenidas dentro dse la vetana de análisis (verde) se han agrupado y asimilado solo en los tiempos de analisis. Figura obtenida de Andreas Schiller, Gary B. Brassington: Operational Oceanography in the 21st Century, 2011.

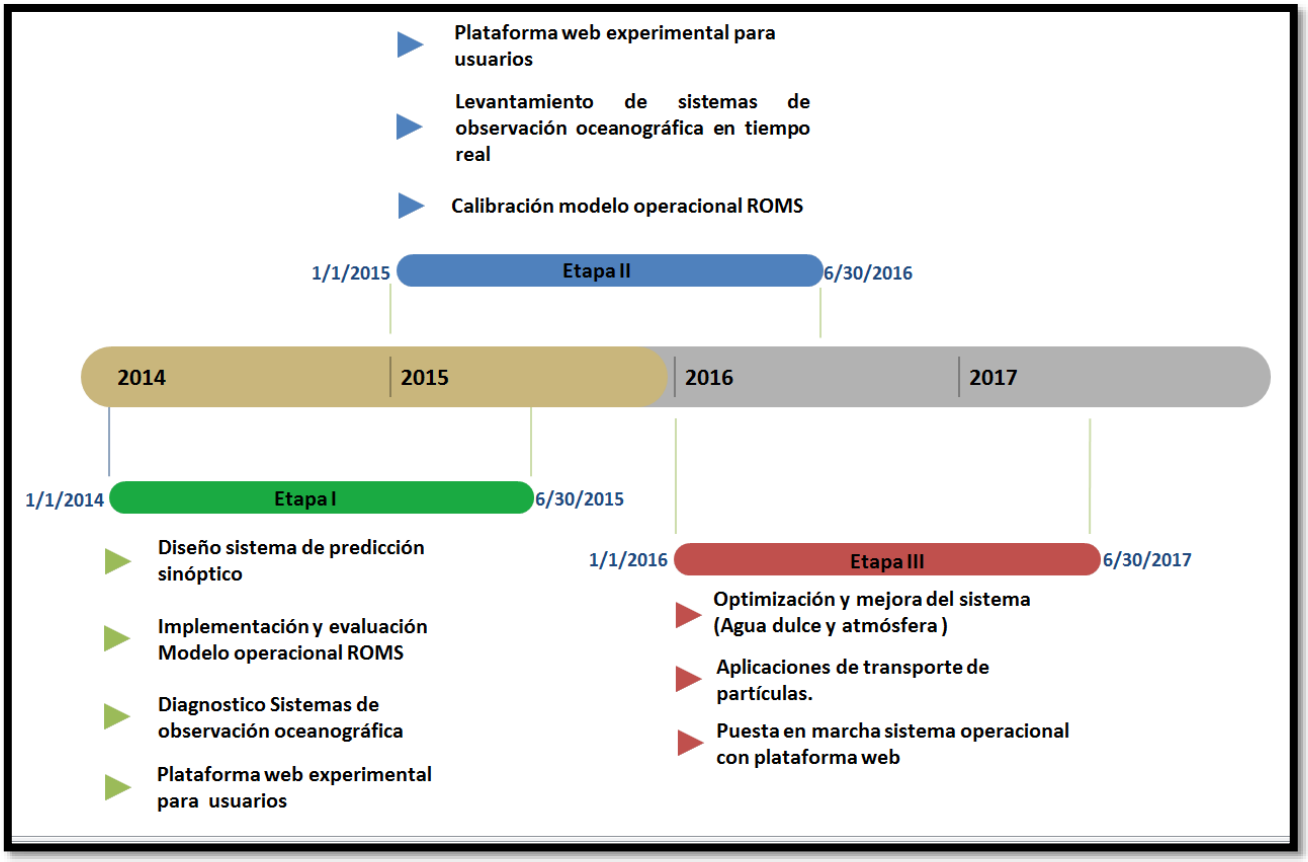


Figura 4. Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional en tres etapas (2014-17).

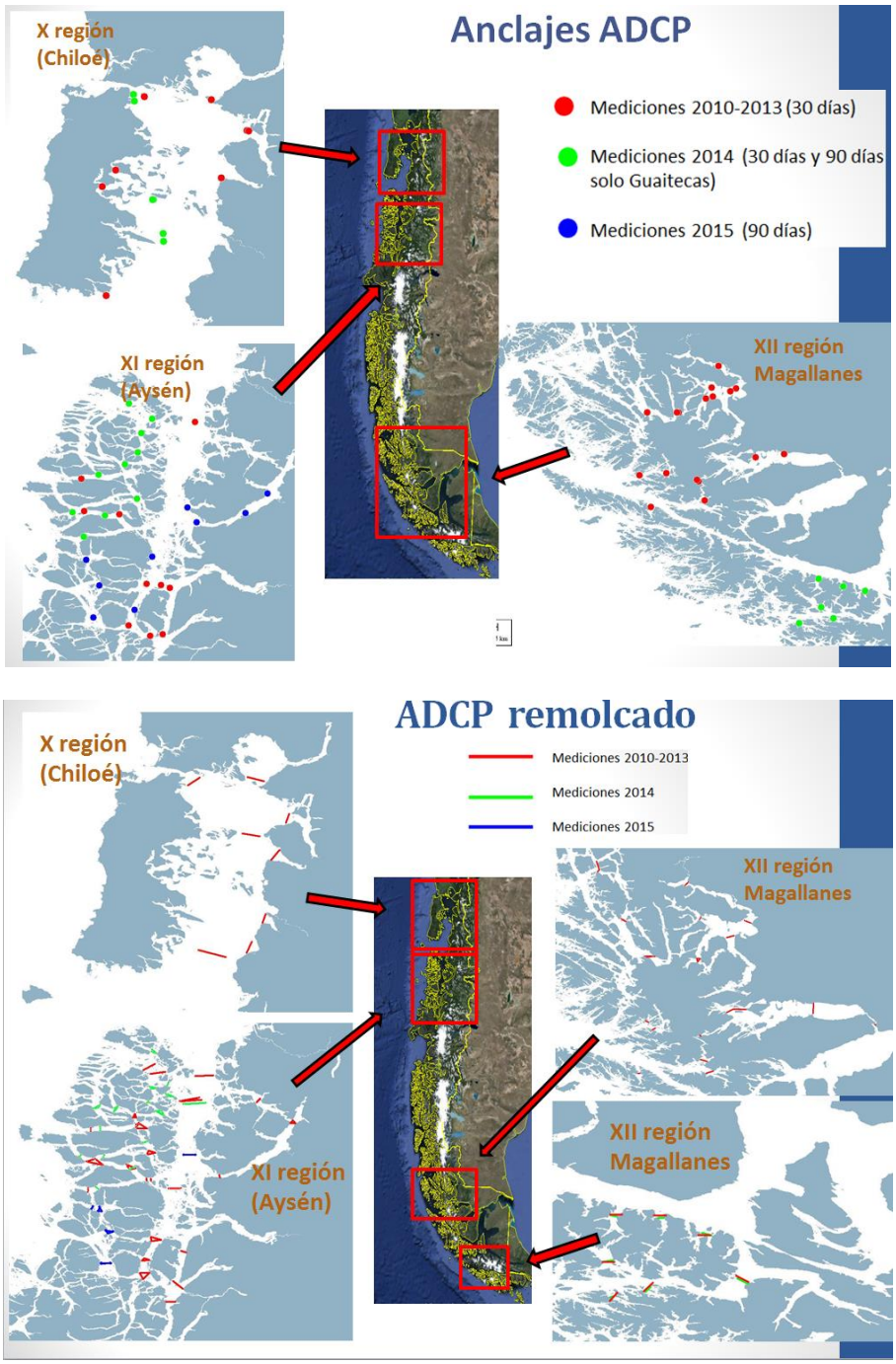


Figura 5. Observaciones de corrientes en la zona Sur-Austral realizadas por IFOP (2010-2015).

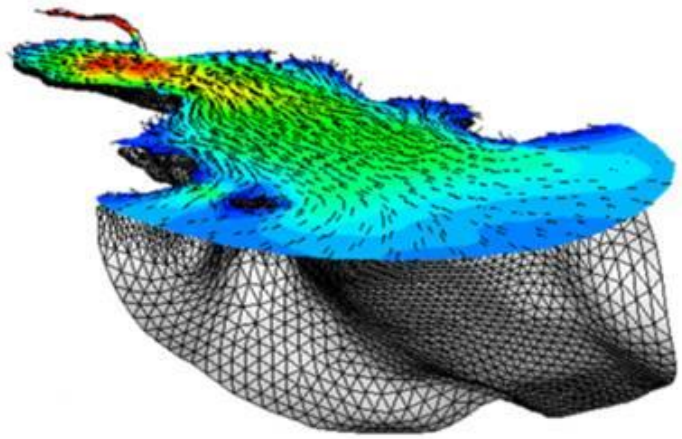


Figura 6. Campo tridimensional estático utilizado como condición de inicial en un modelo hidrodinámico.

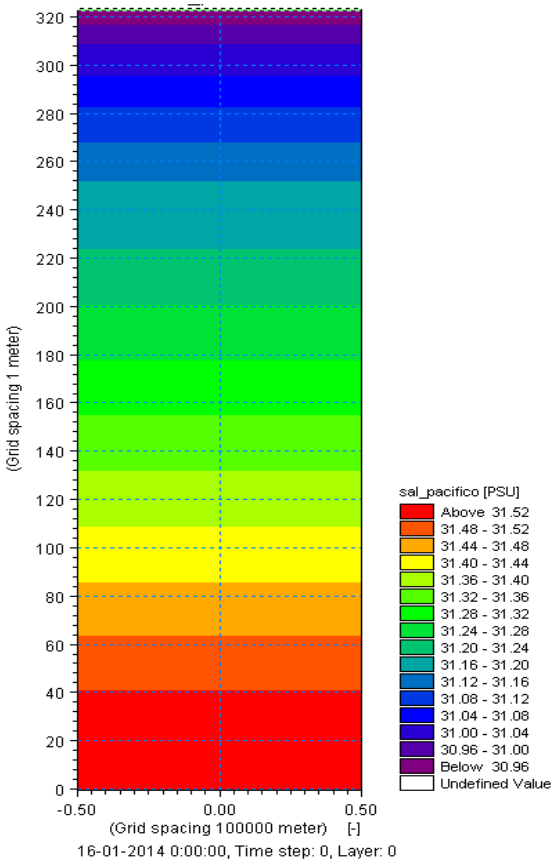


Figura 7. Sección transversal de salinidad utilizada como condición de borde en un modelo. Notar que estos valores presentan variabilidad temporal y espacial.

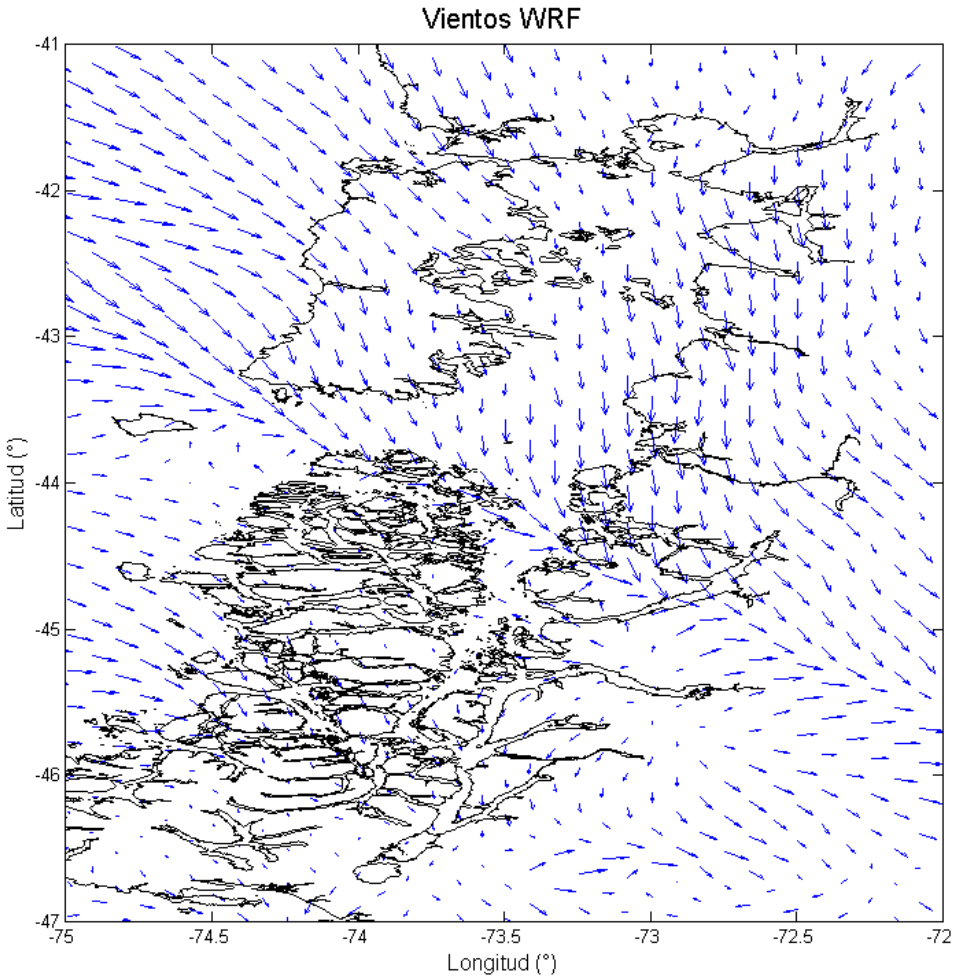


Figura 8. Campo de viento de ejemplo, utilizado en un dominio similar a MOSA otorgado por la Dirección Meteorológica de Chile, basados en WRF. Este campo tiene una resolución temporal de 6 horas.

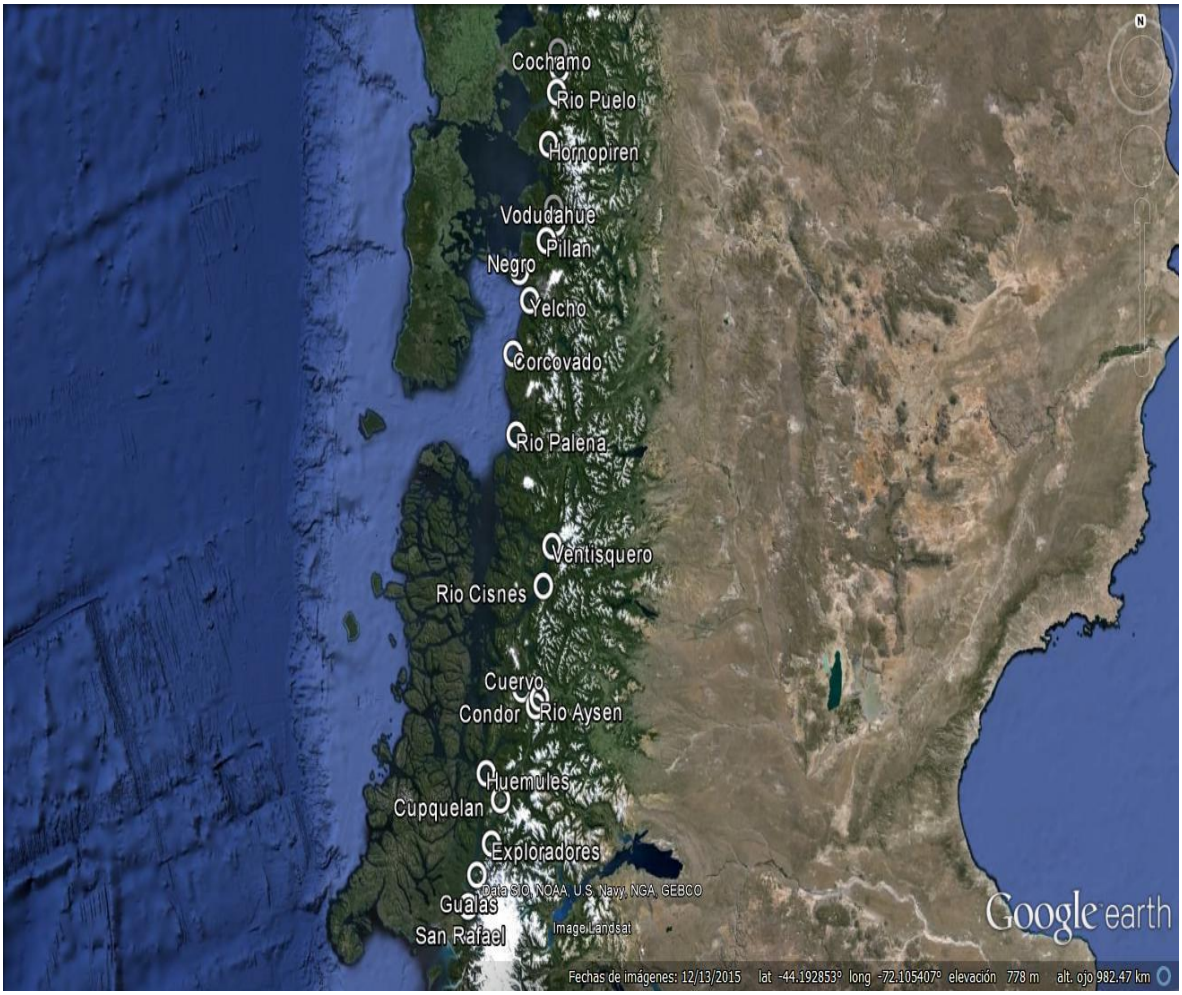


Figura 9. Ubicación de las fuentes de agua dulce ingresadas hasta ahora a MOSA.

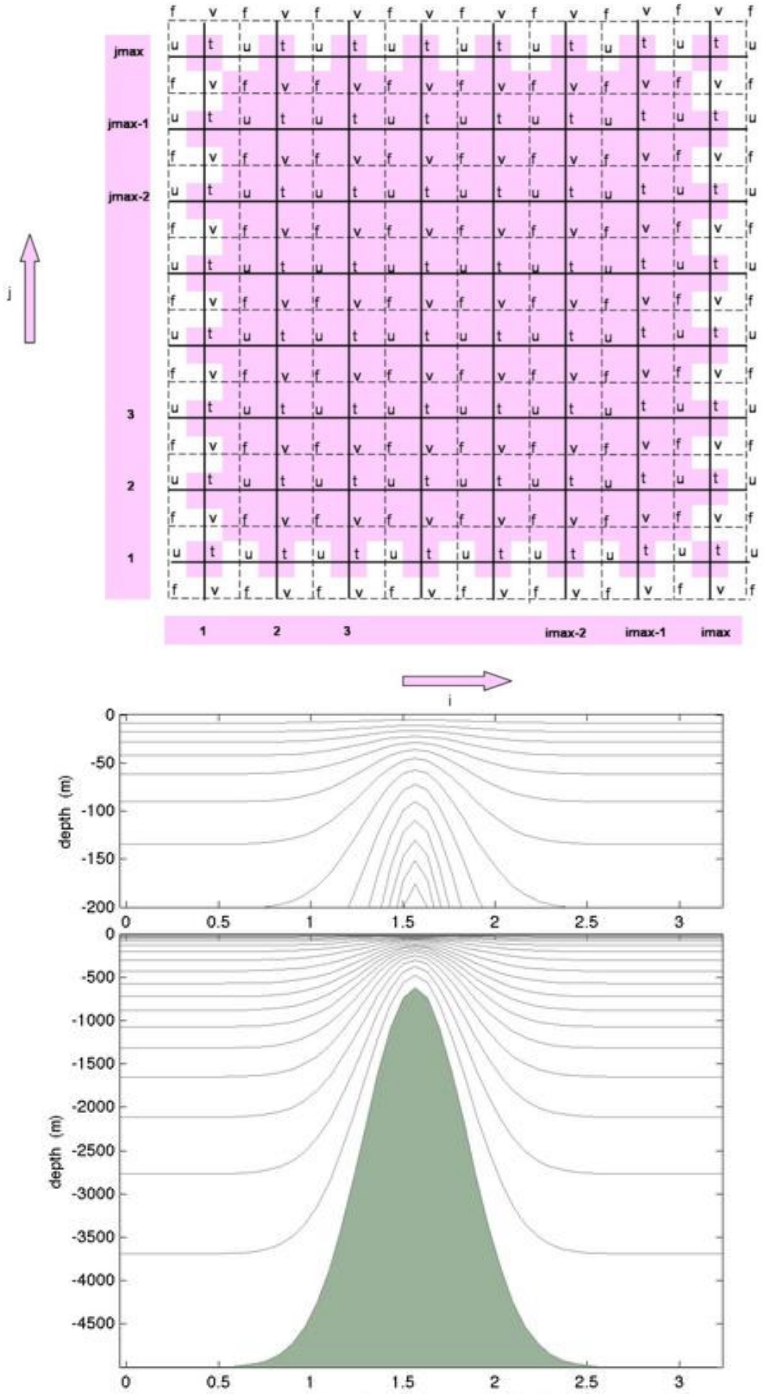


Figura 10. (Arriba) Estructura de grilla tipo Arakawa –C utilizada en MOSA, (abajo) distribución de niveles verticales tipi sigma, similar a la utilizada en MOSA.

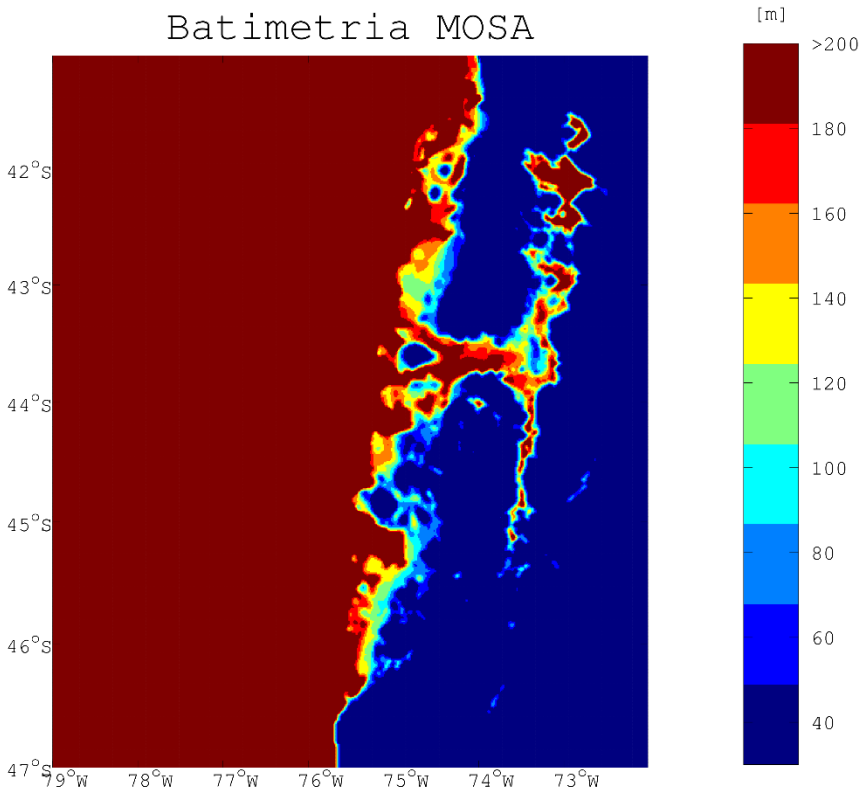


Figura 11. Domino de MOSA, construido con batimetría obtenida de cartas SHOA y proyectos de investigación realizados en la zona.

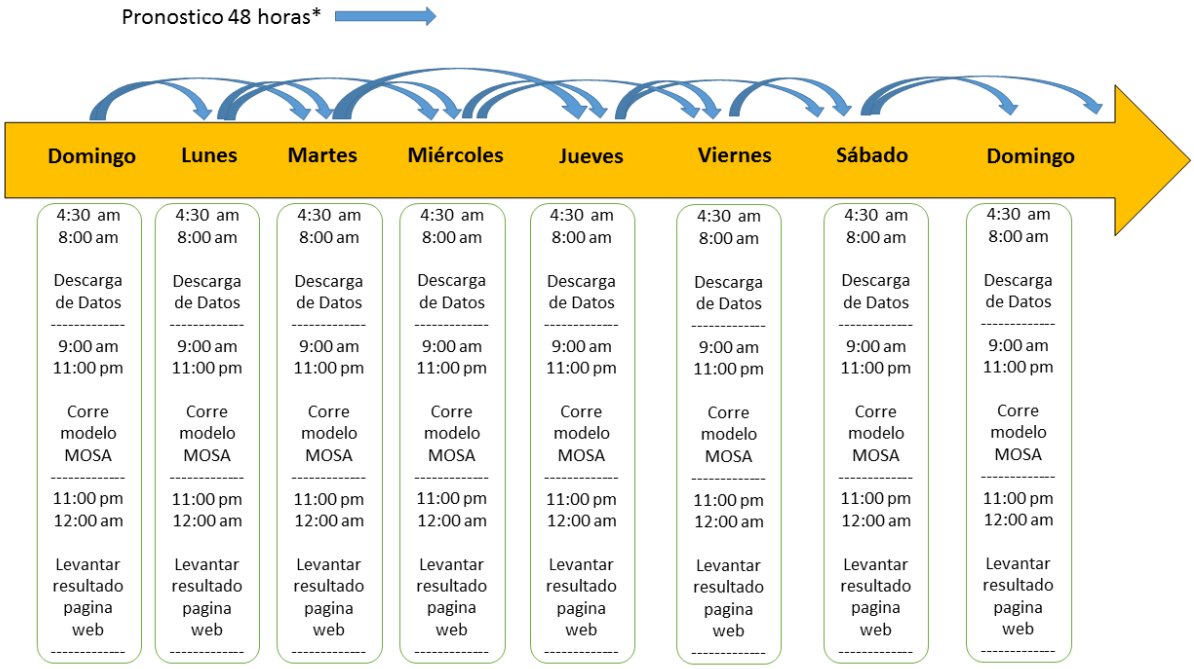


Figura 12. Diagrama que describe la operación periódica de MOSA.

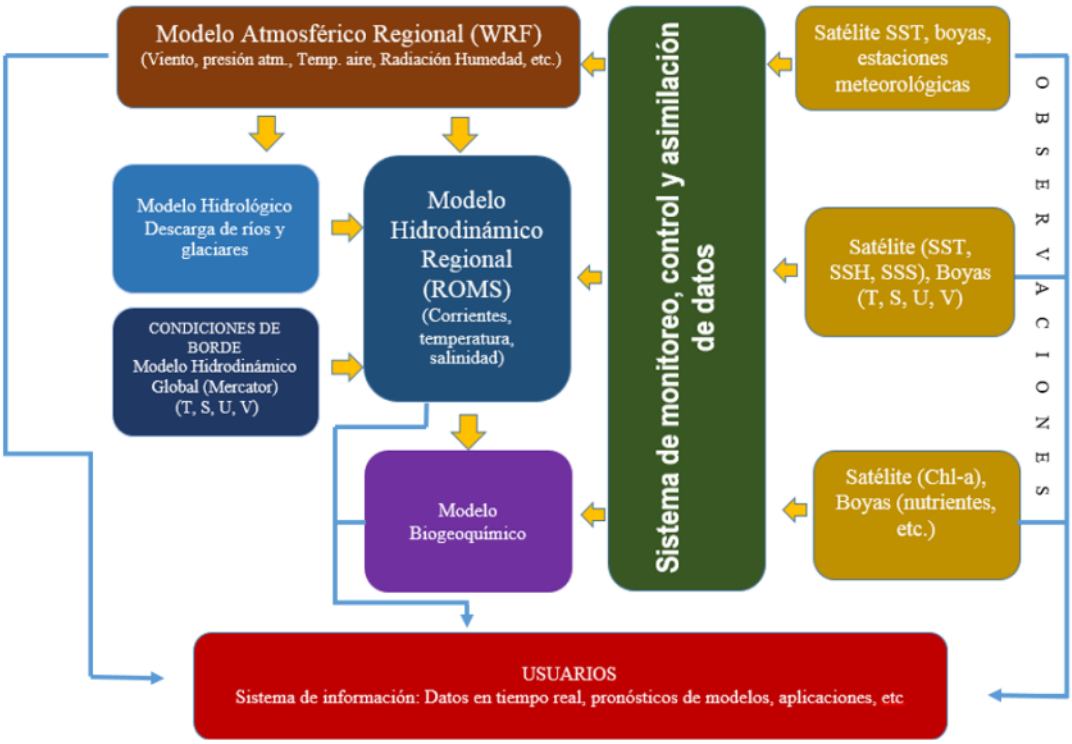


Figura 13. Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo de MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.

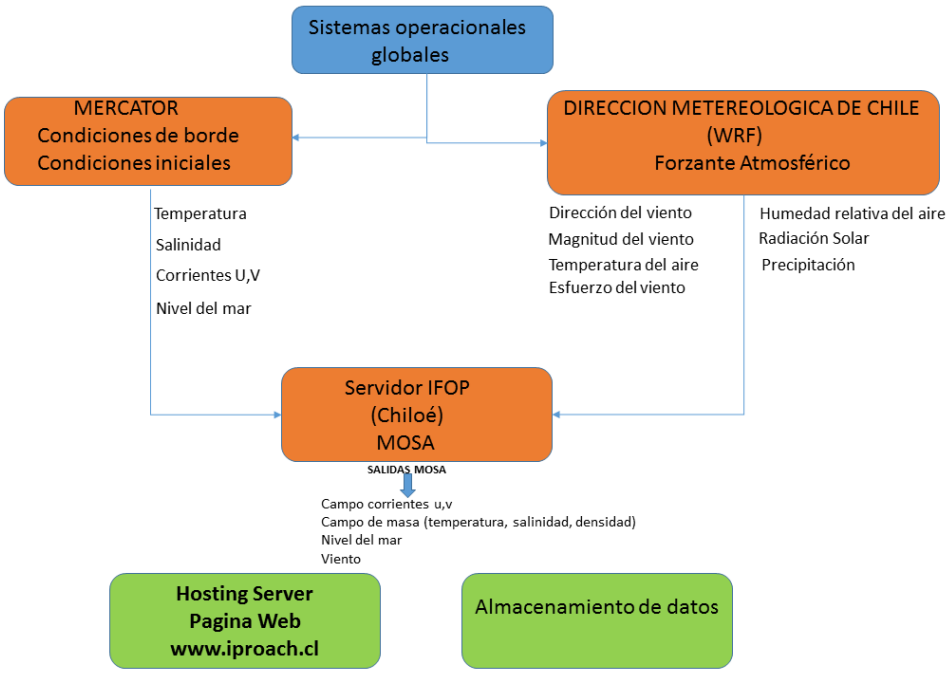


Figura 14. Diagrama de flujos que representa la estructura de funcionamiento de MOSA.

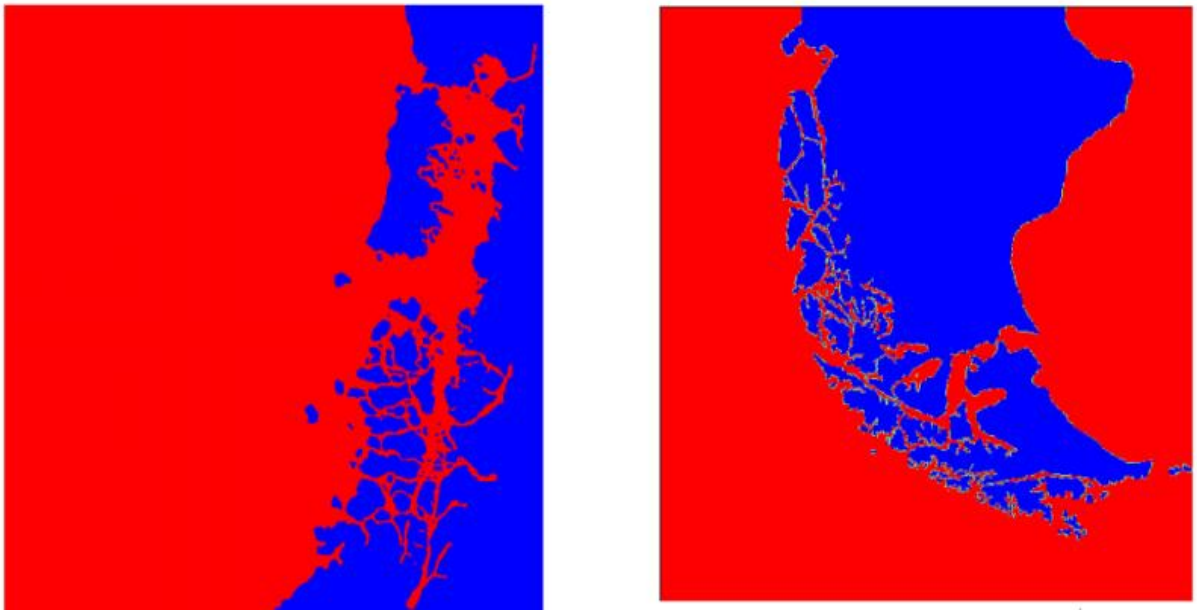


Figura 15. (Izquierda) Mascara del dominio de Chiloé-Aysén, (derecha) mascara del dominio de Magallanes.

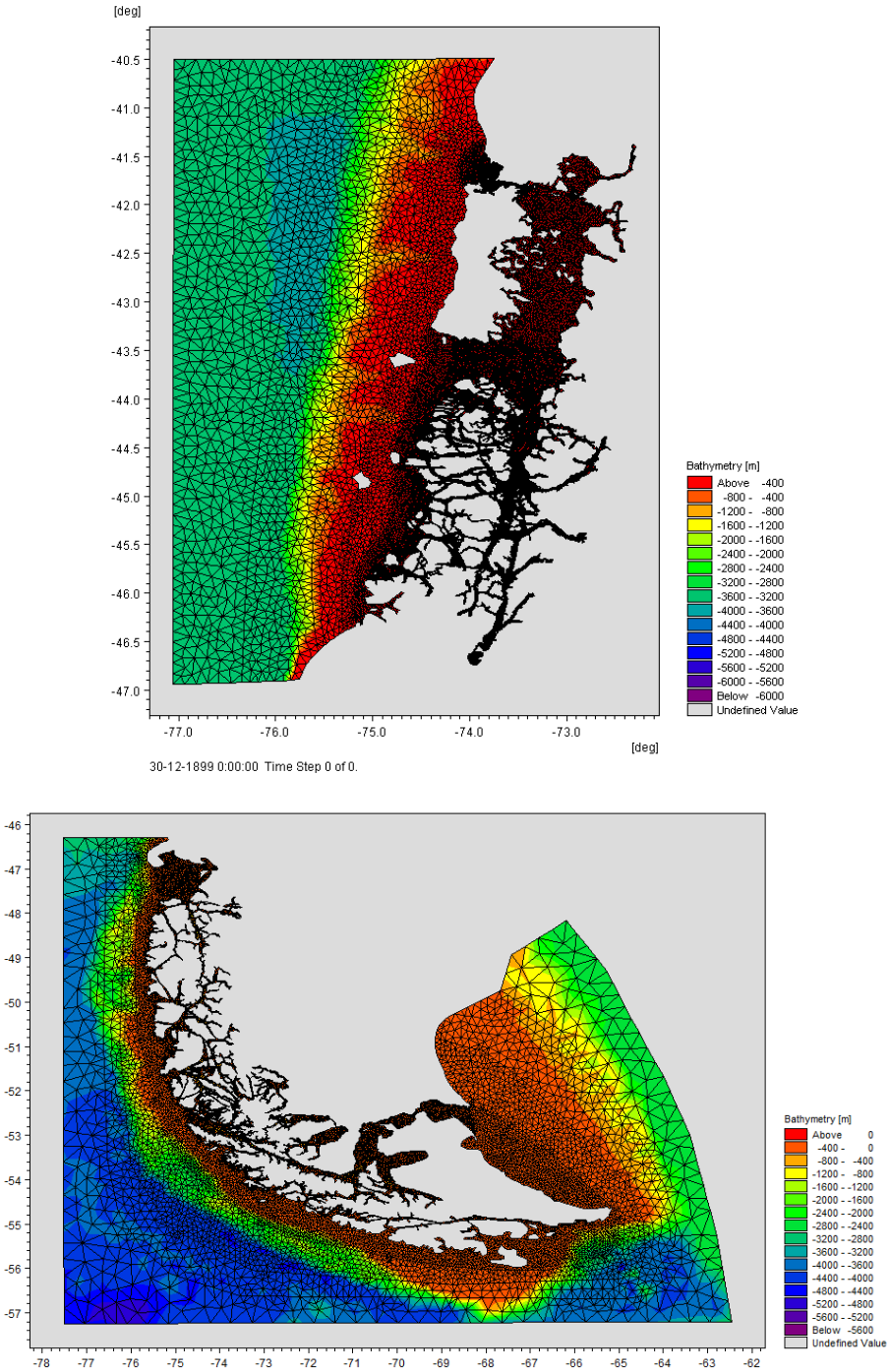


Figura 16. (Izquierda) Modelo de elevación digital del dominio de Chiloé-Aysén, (derecha) Modelo de elevación digital del dominio del dominio de Magallanes.

Figura 17. (A) Dispositivo infiniband mellanox, (B).sonómetro, y (C) sistema de aire acondicionado.

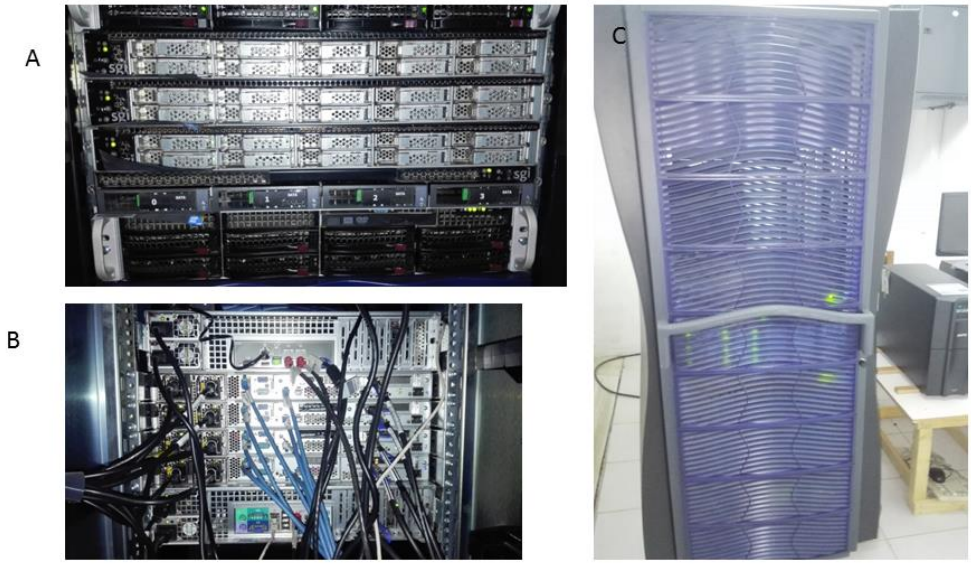


Figura 18. Cluster empleado por IFOP, Putemun, (A) vista frontal nodos,(B) vista posterior nodos, y (C). Rack Cluster.

Figura 19. Sistema UPS Tripplite encargado de regular la energía del cluster.

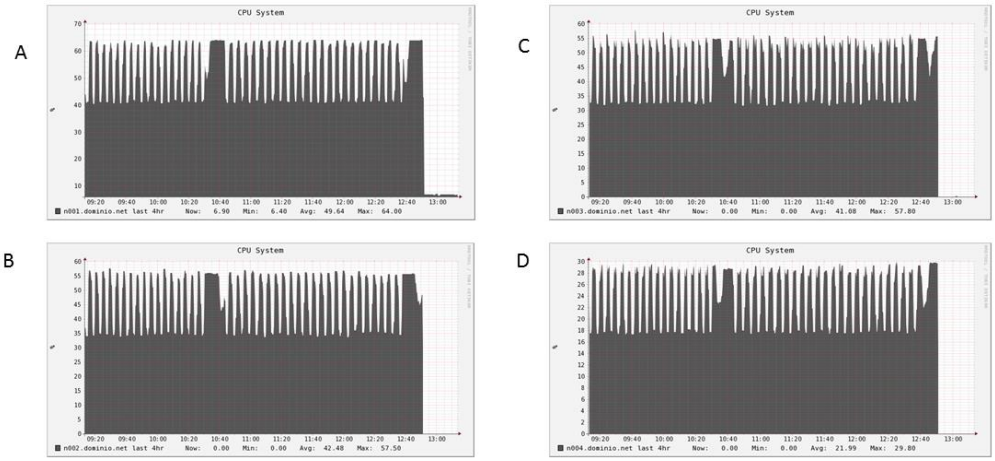


Figura 20. Capacidad de procesamiento usada en los modos de cómputos empleados para el pronóstico.

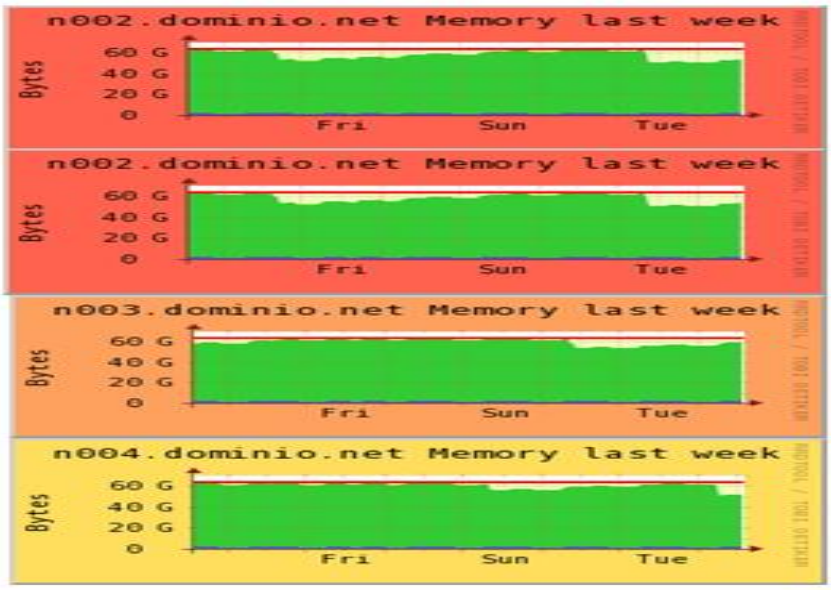


Figura 21. Memoria usada por los nodos de cómputo en una ventana de 3 días.

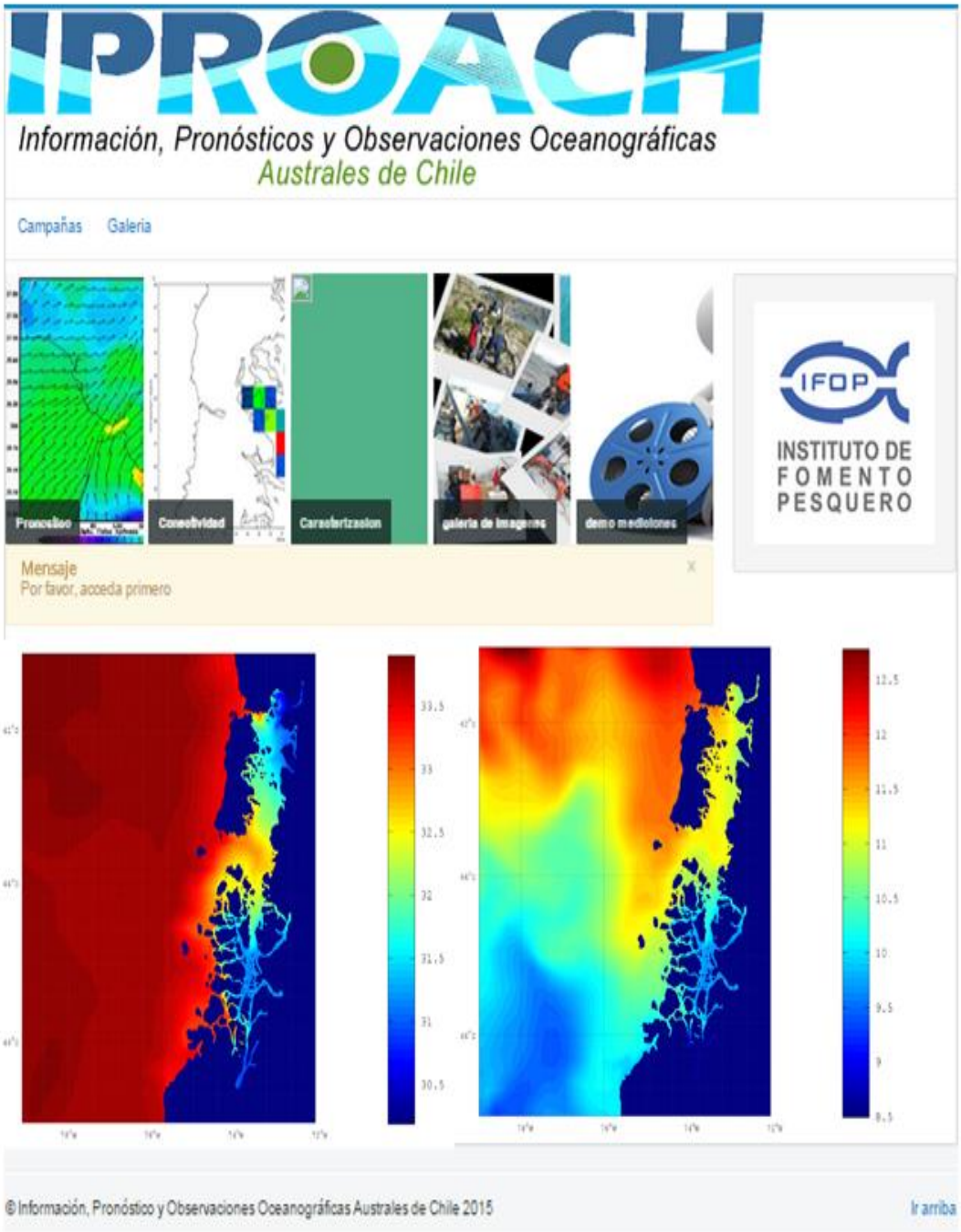


Figura 22. Aspecto inicial del sitio web www.iproach.cl, el cual presentara los resultados de MOSA, será la plataforma de trabajo para montar otras herramientas de gestión ambiental.

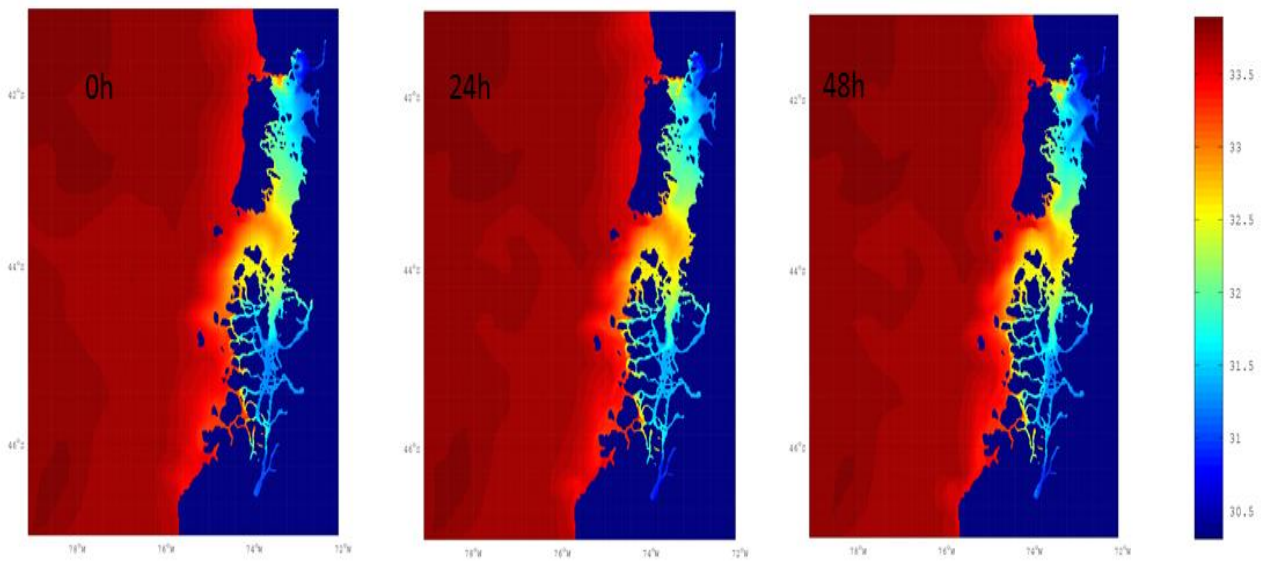


Figura 23. Pronóstico de salinidad superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.

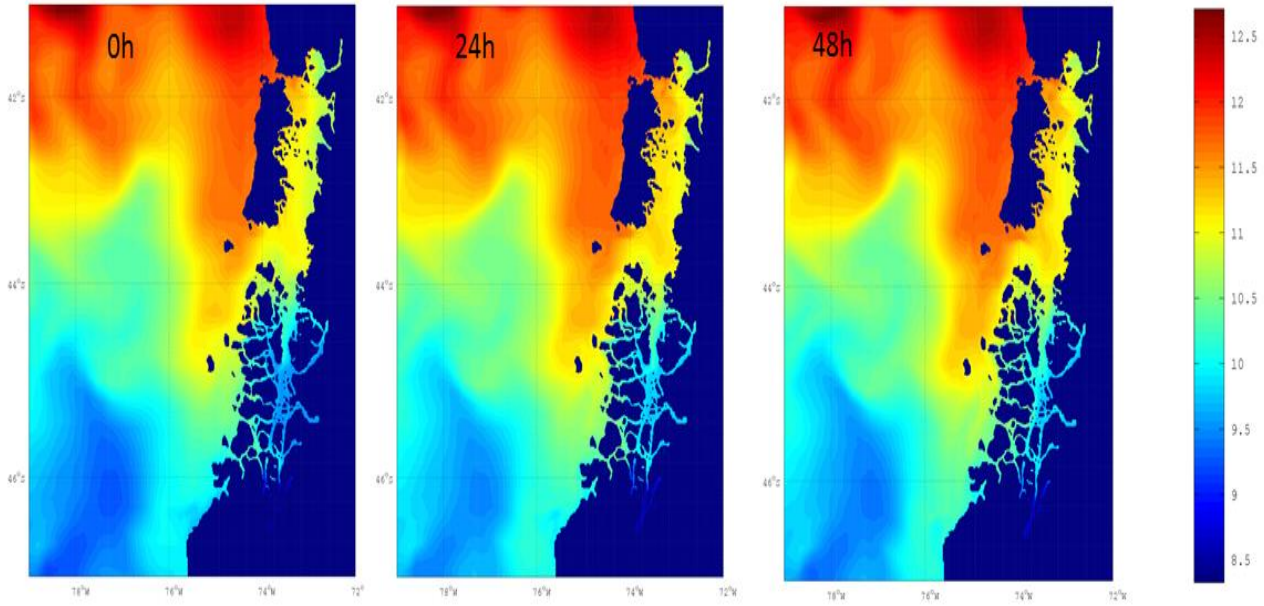


Figura 24. Pronóstico de temperatura superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.

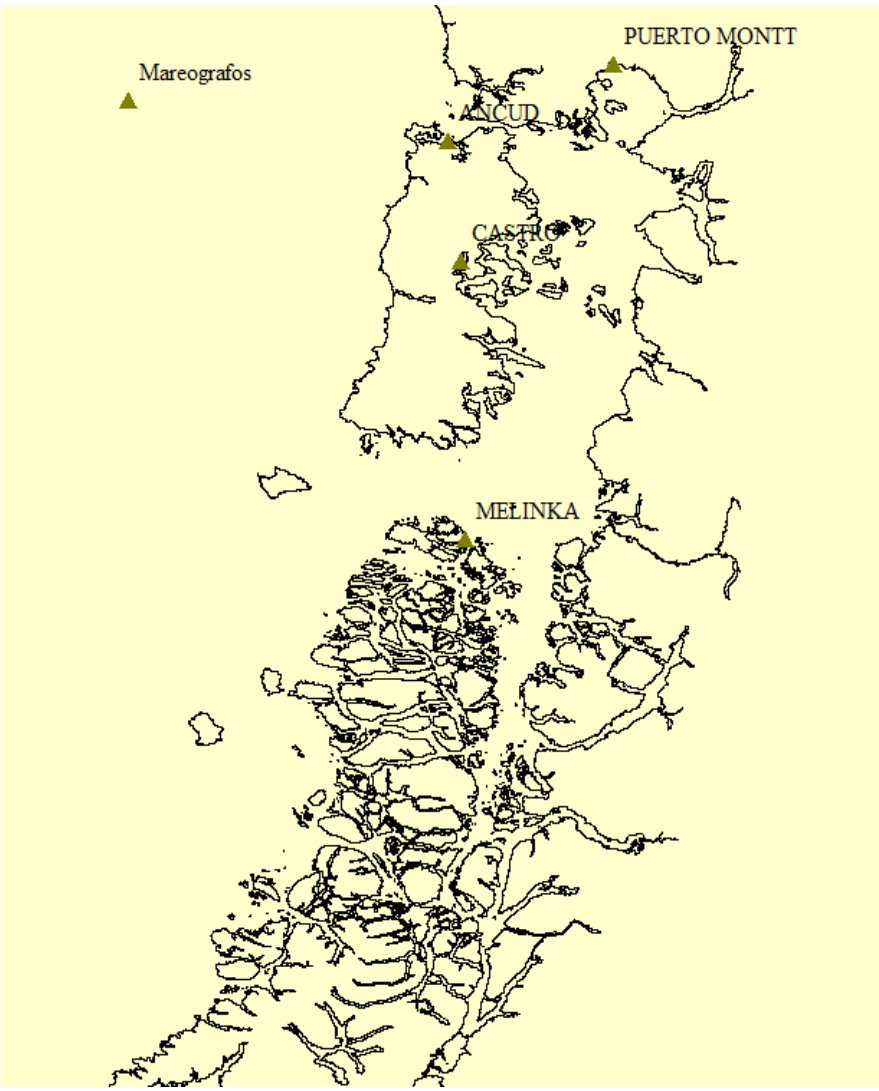


Figura 25. Red de mareógrafos que disponen información en línea a través del portal www.ioc.org presentes en el sur de Chile, los cuales son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

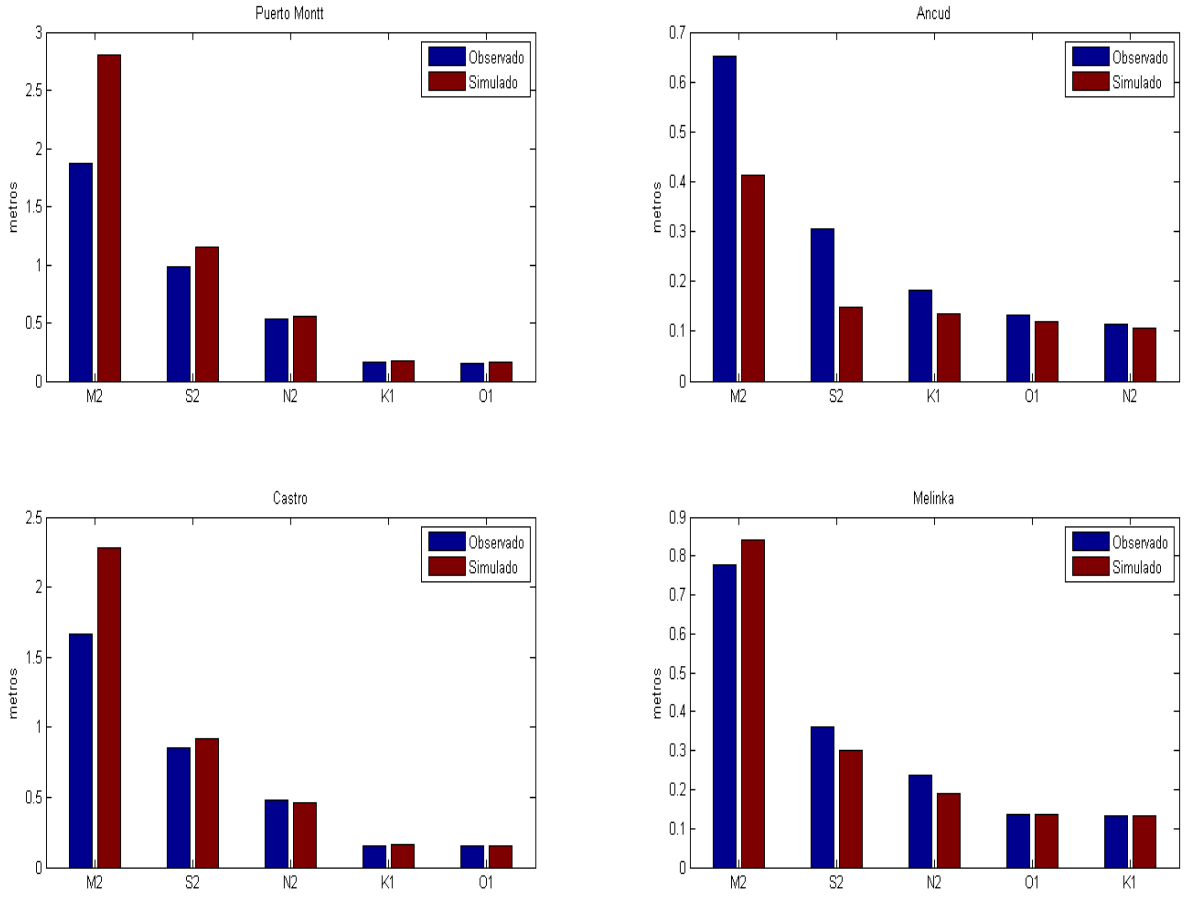


Figura 26. Histograma de la amplitud en metros de las principales constituyentes armónicas observadas del nivel del mar en Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka, para una serie de 30 días de valores horarios, correspondientes al mes de septiembre de 2015.

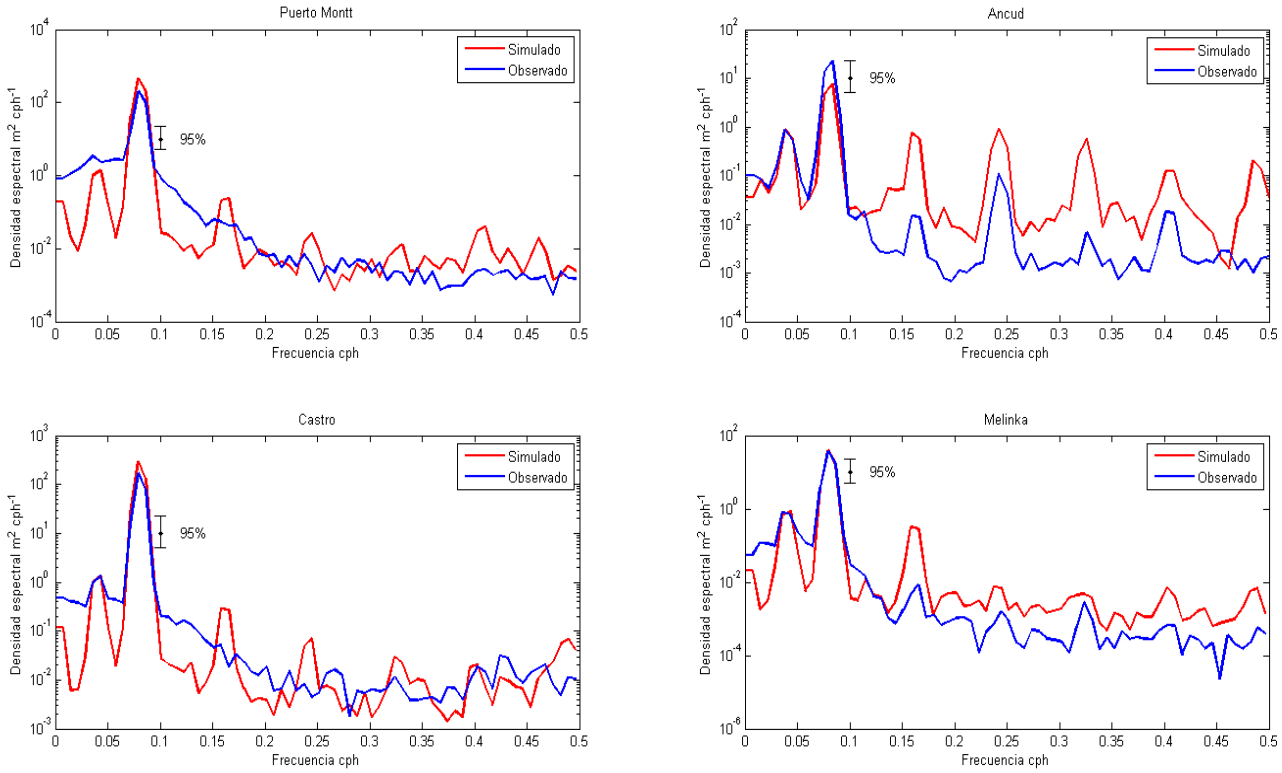


Figura 27. Espectros de energía del nivel del mar para las series observadas (azul) y simuladas (rojo) para Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka. Los espectros fueron construidos con 10 grados de libertad y corresponden a series con valores horarios de 30 días.

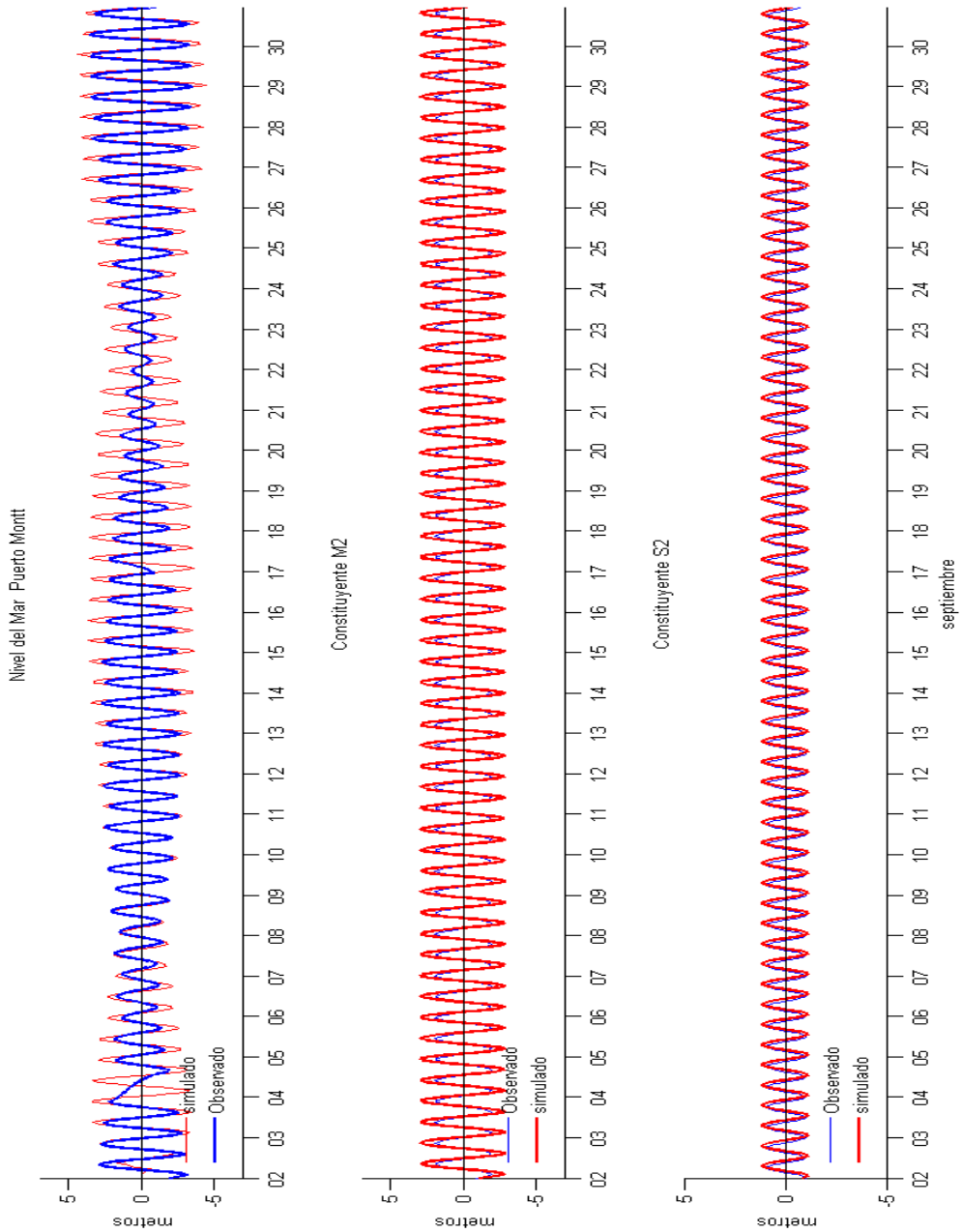


Figura 28. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Puerto Montt. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

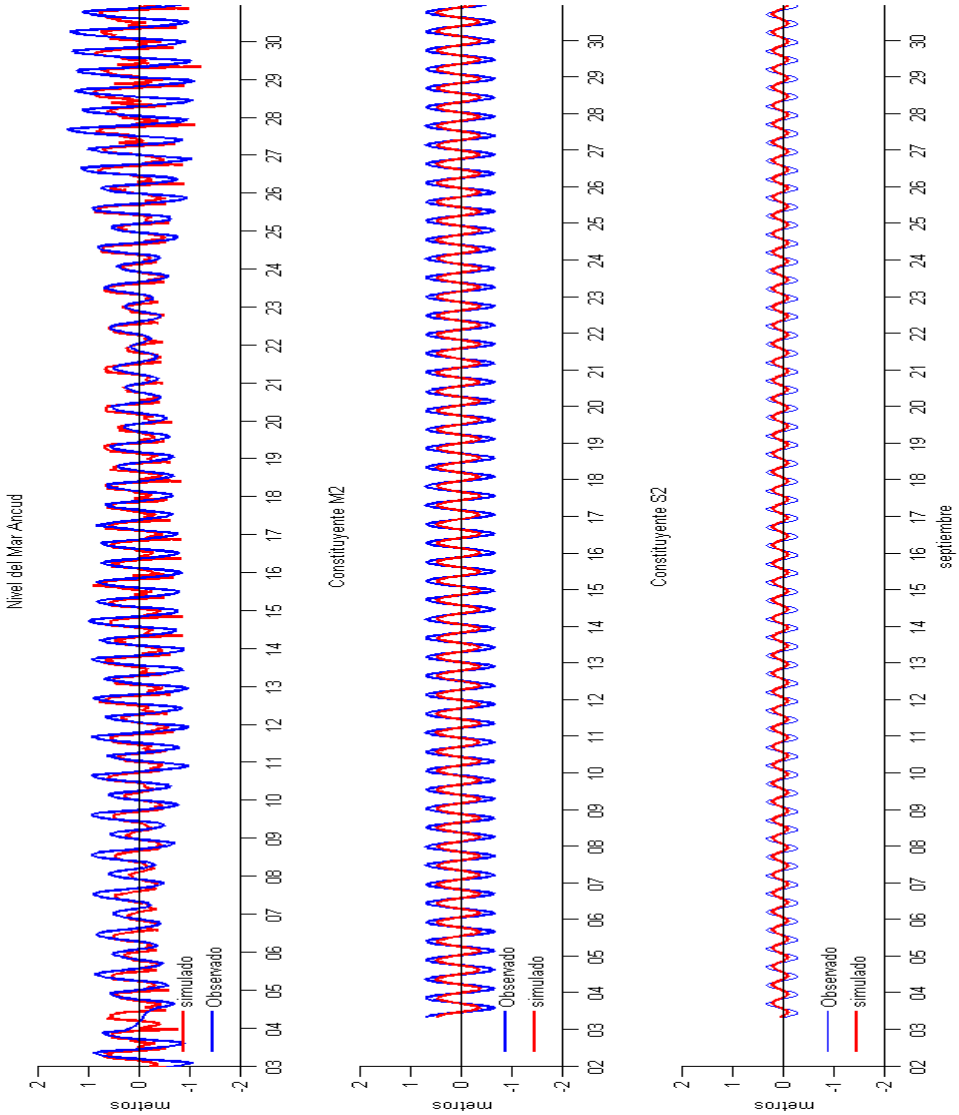


Figura 29. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Ancud. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

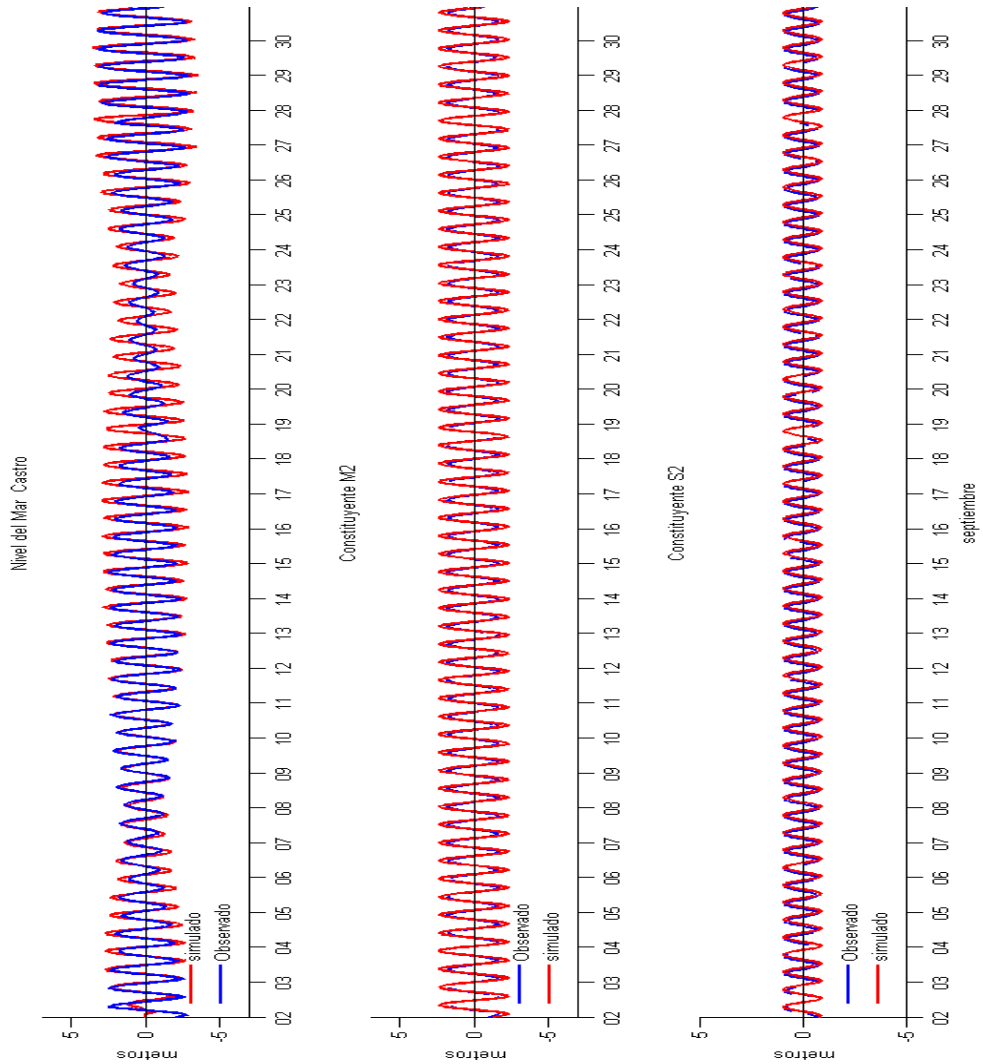


Figura 30. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Castro. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

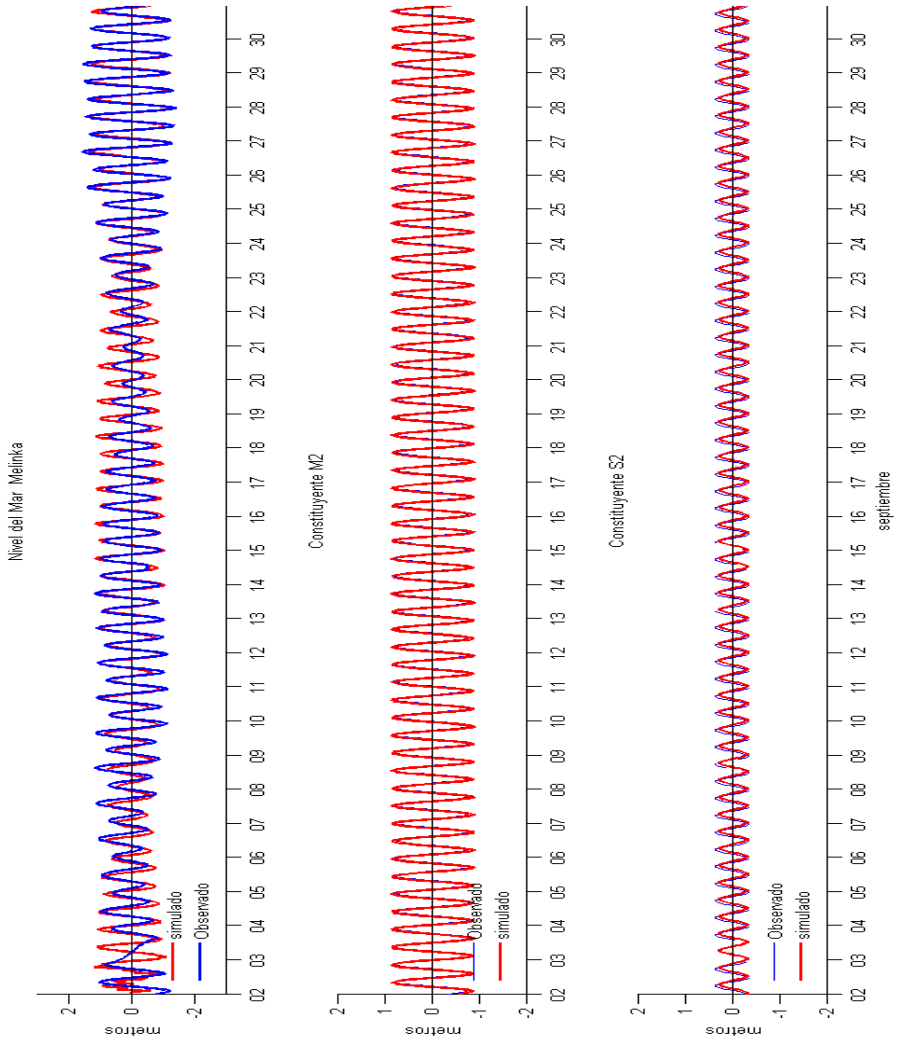


Figura 31. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Melinka. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

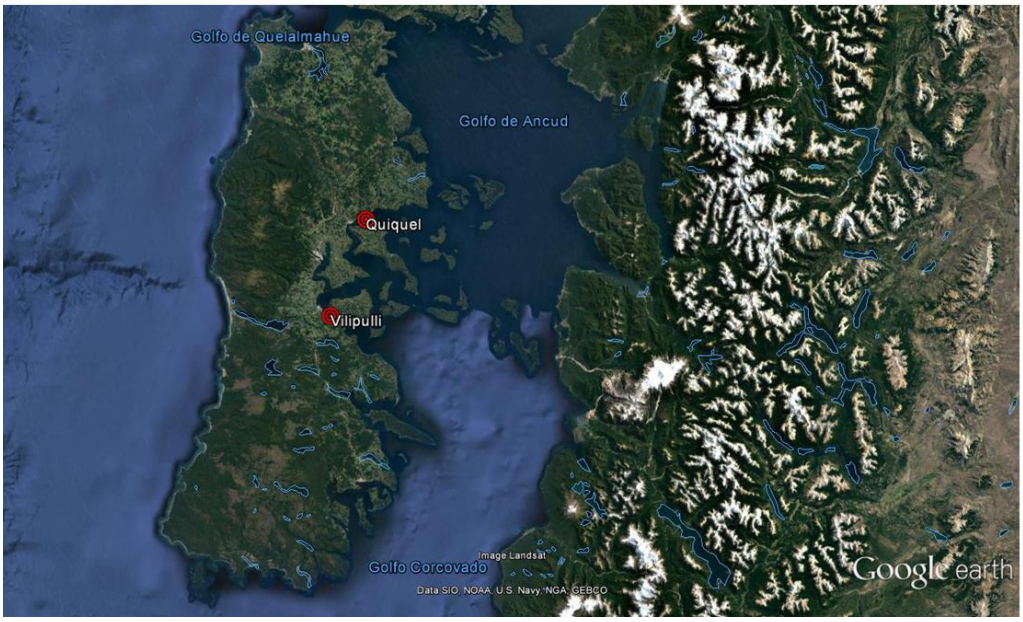


Figura 32. Estaciones de monitoreo oceanográfico de MUSELS, localizadas en Quiquel y Vilupulli, en los canales Dalcahue y canal Yal respectivamente. Estas estaciones cuentan con series de tiempo de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad, y próximamente contaran con información meteorológica en línea gracias a un convenio con IFOP.

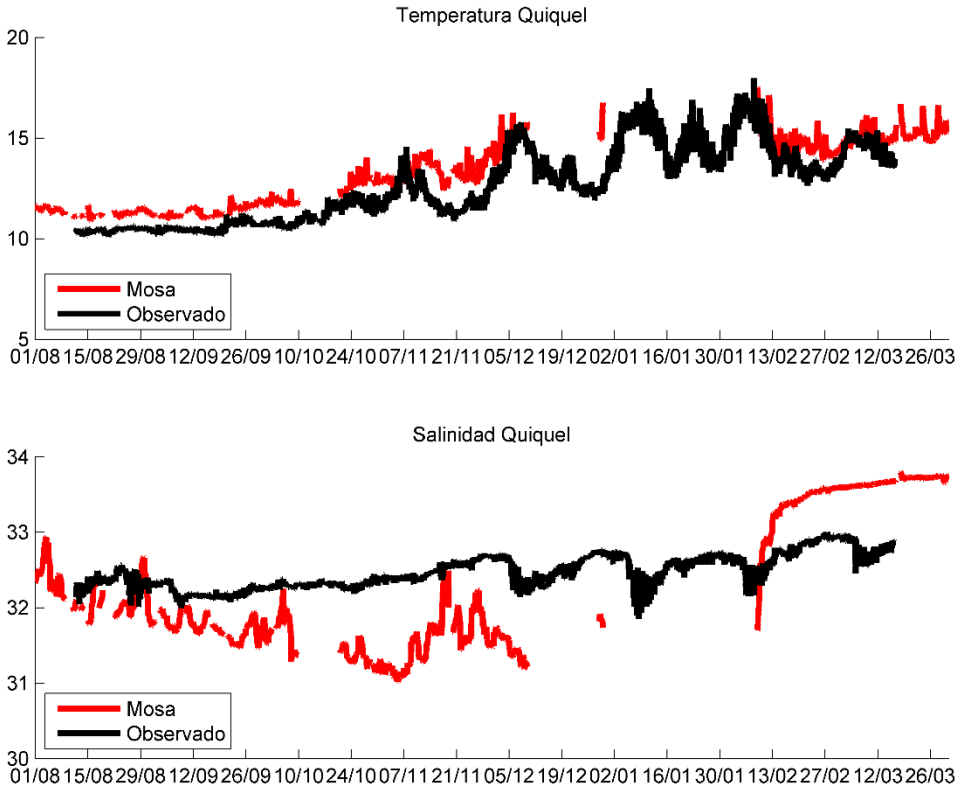


Figura 33. Series de tiempo de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad entregadas por la estación Quiquel, mantenida por Musels, y contrastadas con los resultados de MOSA en el mismo punto entre agosto de 215 y, marzo 2016.

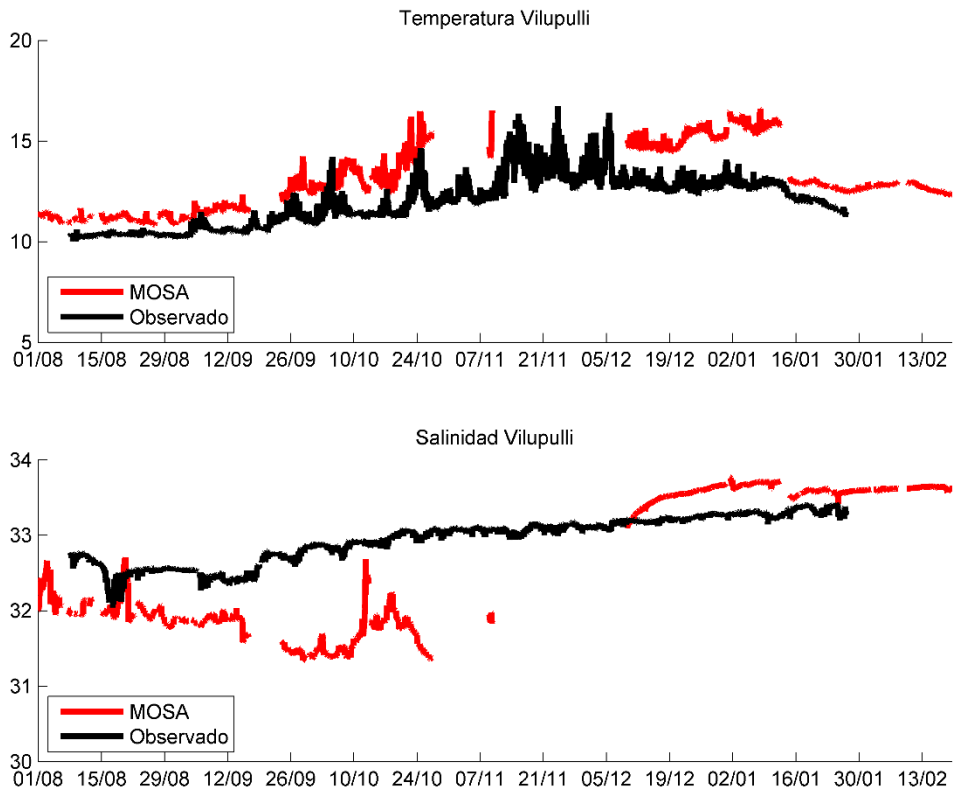


Figura 34. Series de tiempo de temperatura y salinidad a 4 metros de profundidad entregadas por la estación Vilupulli, mantenida por Musels, y contrastadas con los resultados de MOSA en el mismo punto entre agosto de 215 y, marzo 2016.

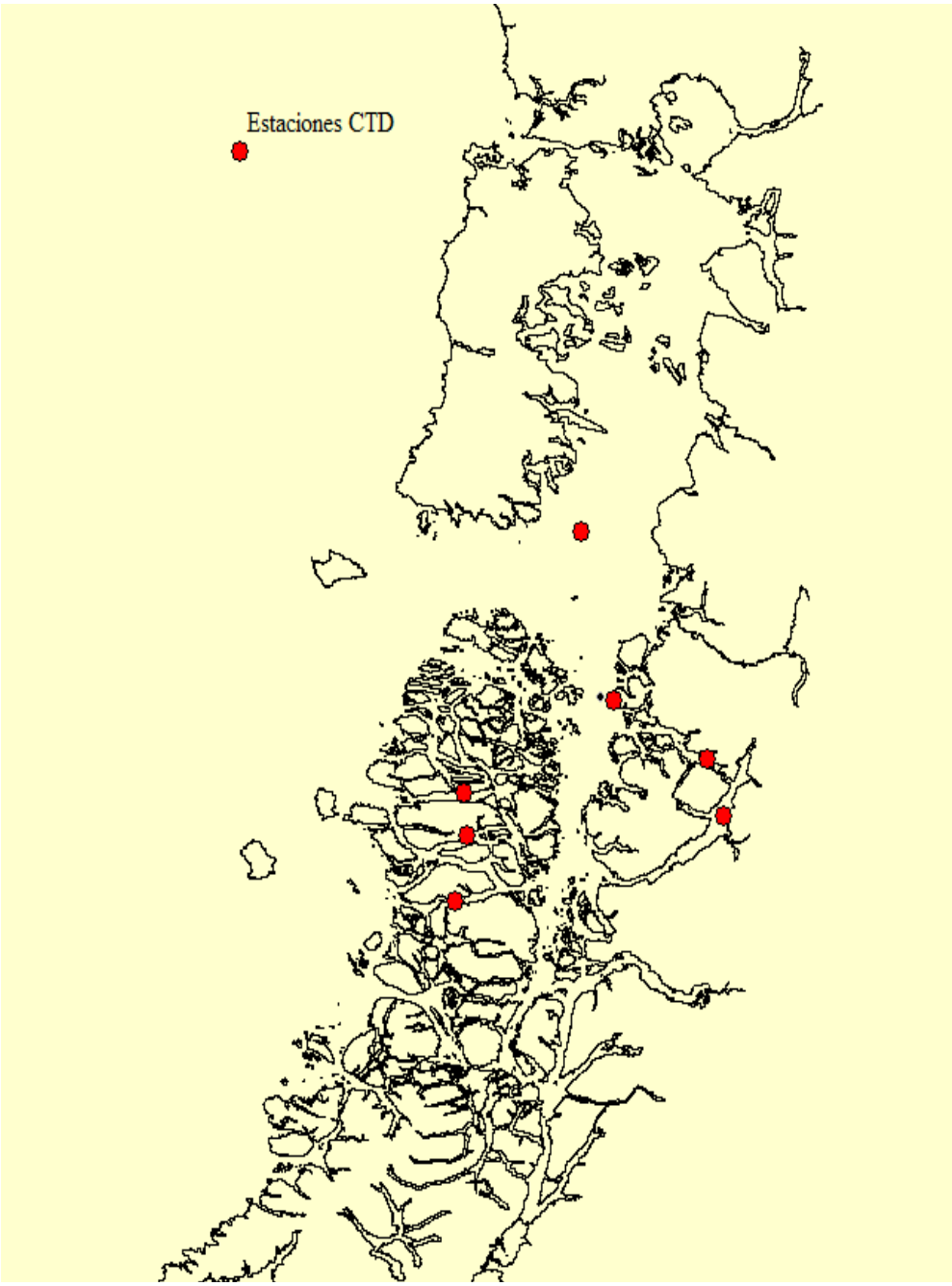


Figura 35. Puntos de evaluación para el campo de masa de MOSA. Estas estaciones corresponden a lances de CTD efectuadas por IFOP durante la primavera de los años 2013 y 2014.

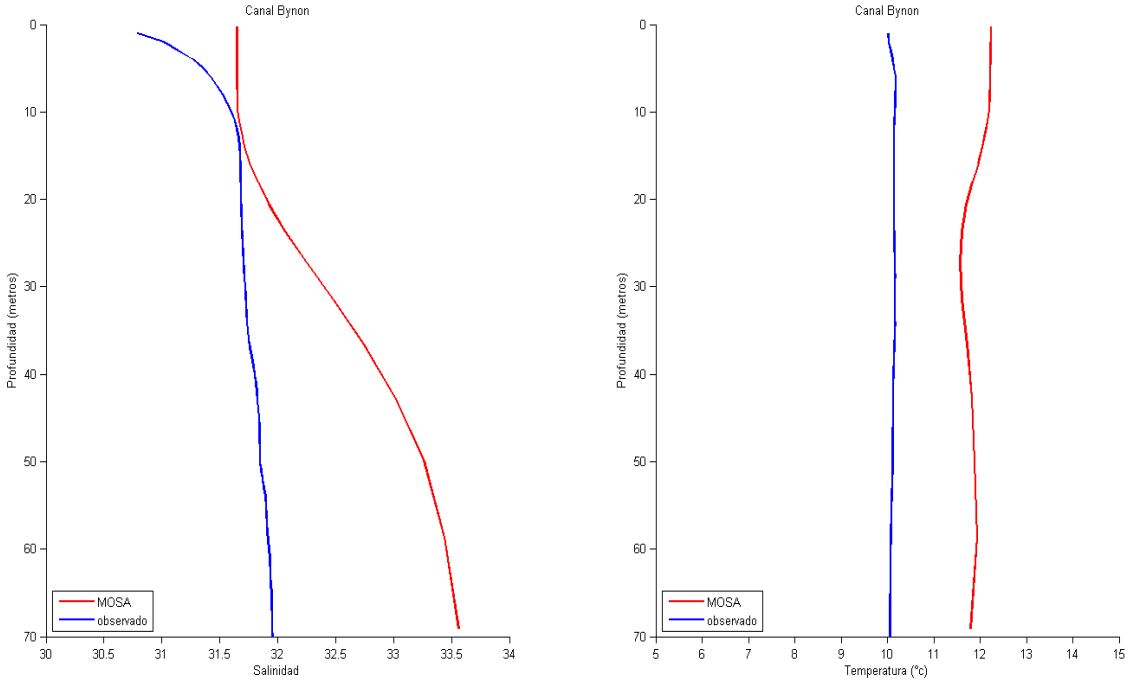


Figura 36. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Bynon, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

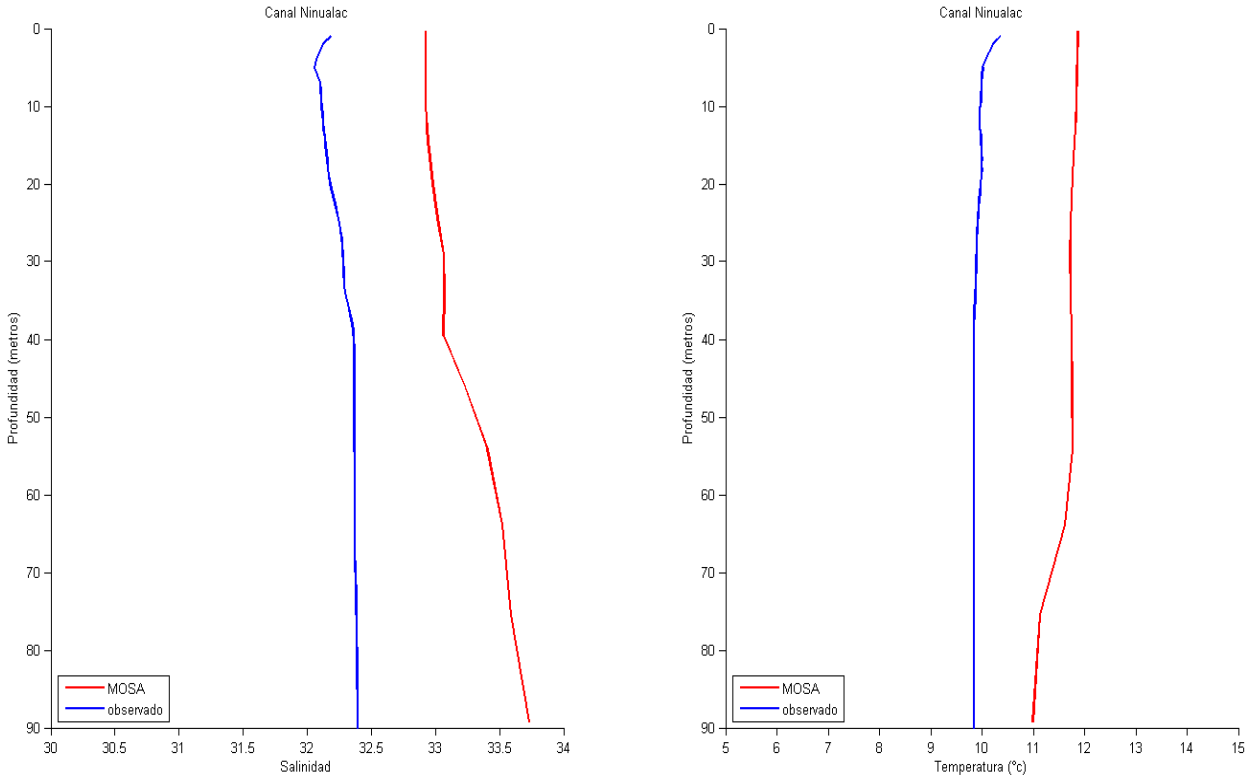


Figura 37. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Ninualac, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

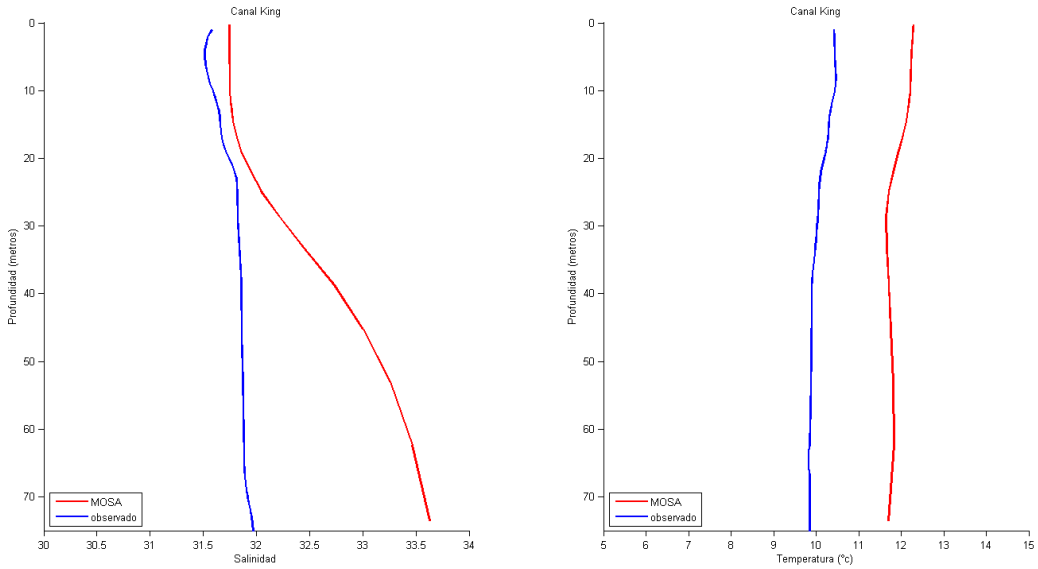


Figura 38. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal King, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

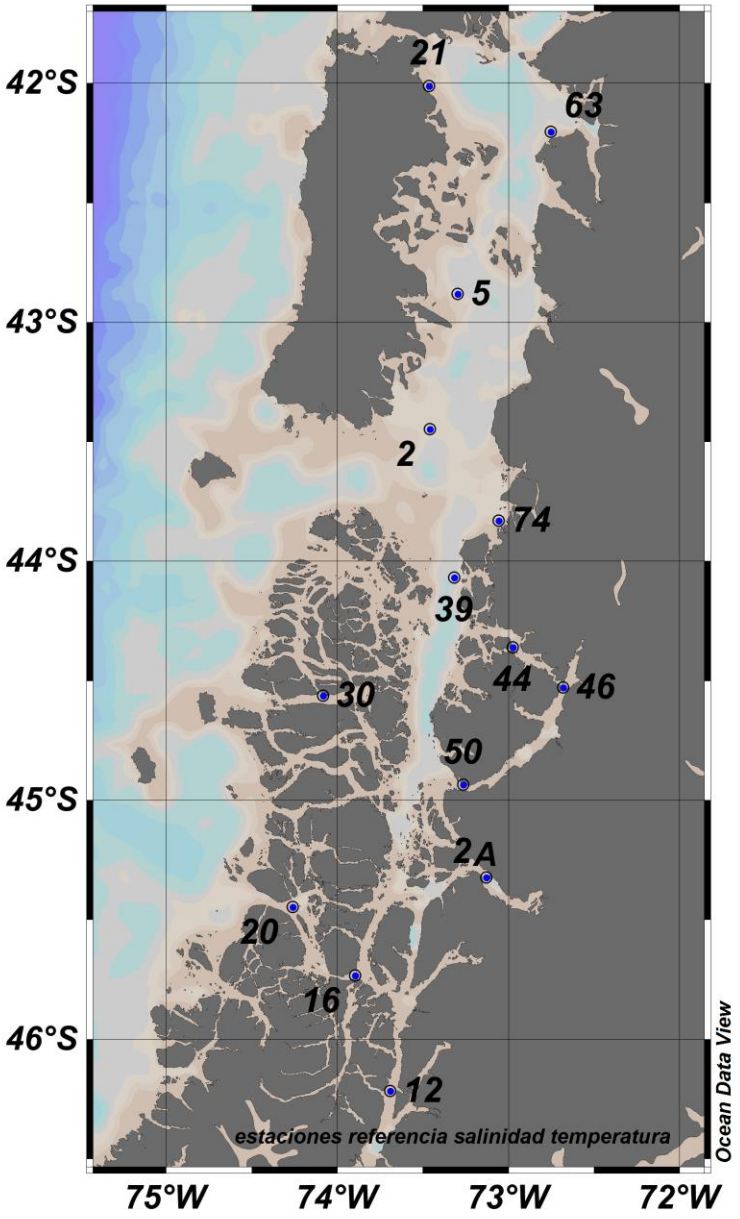


Figura 39. Estaciones de referencia para evaluar el desempeño de MOSA en verano.

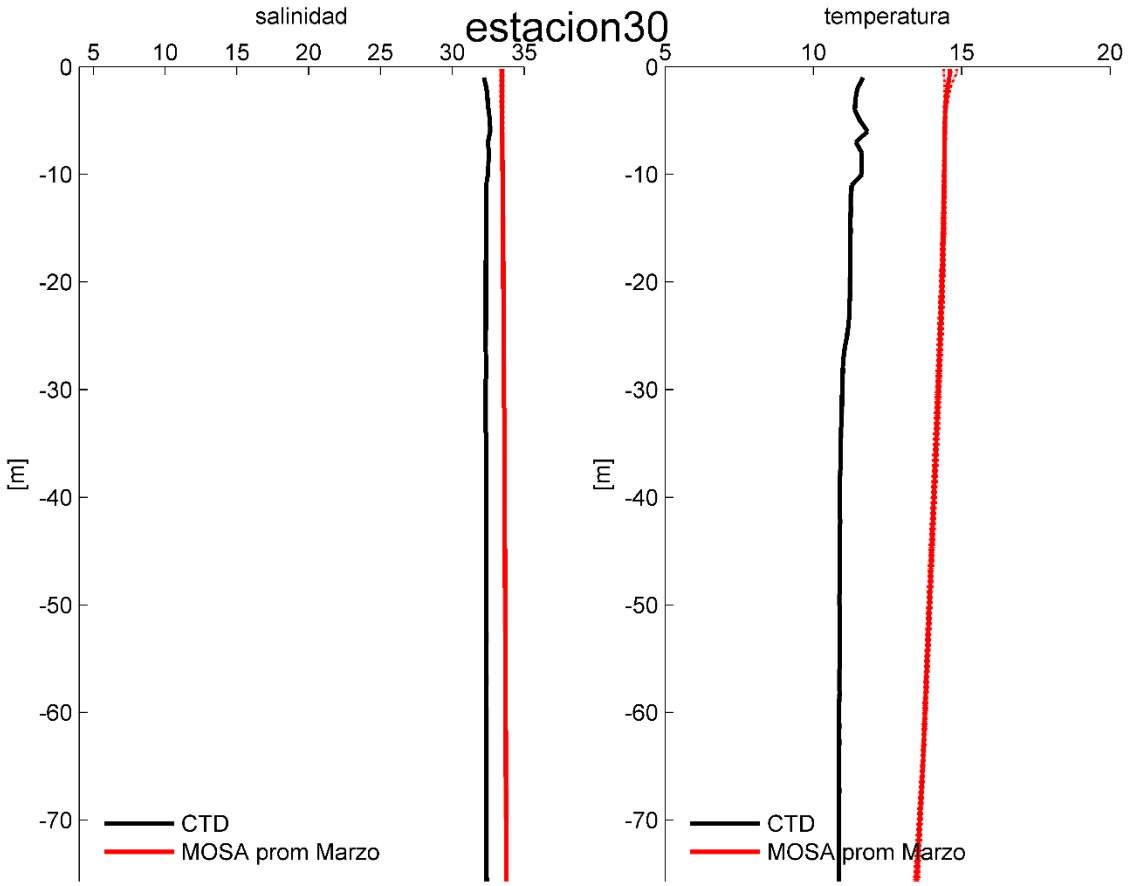


Figura 40. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 30. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

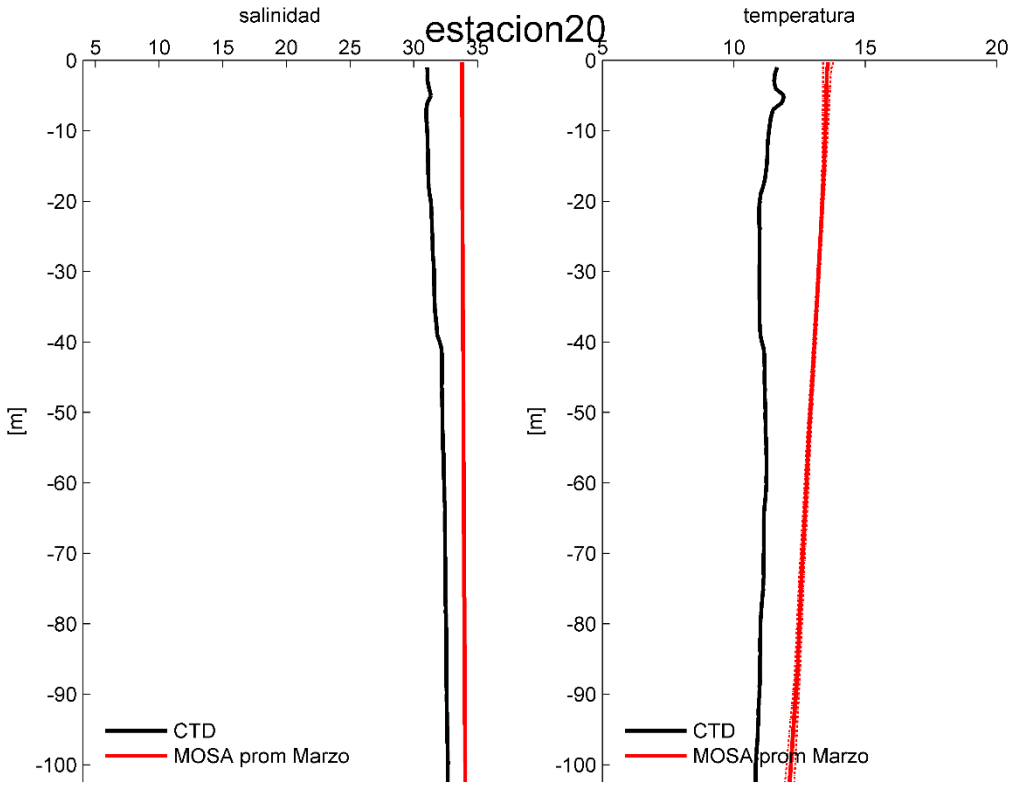


Figura 41. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 20. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

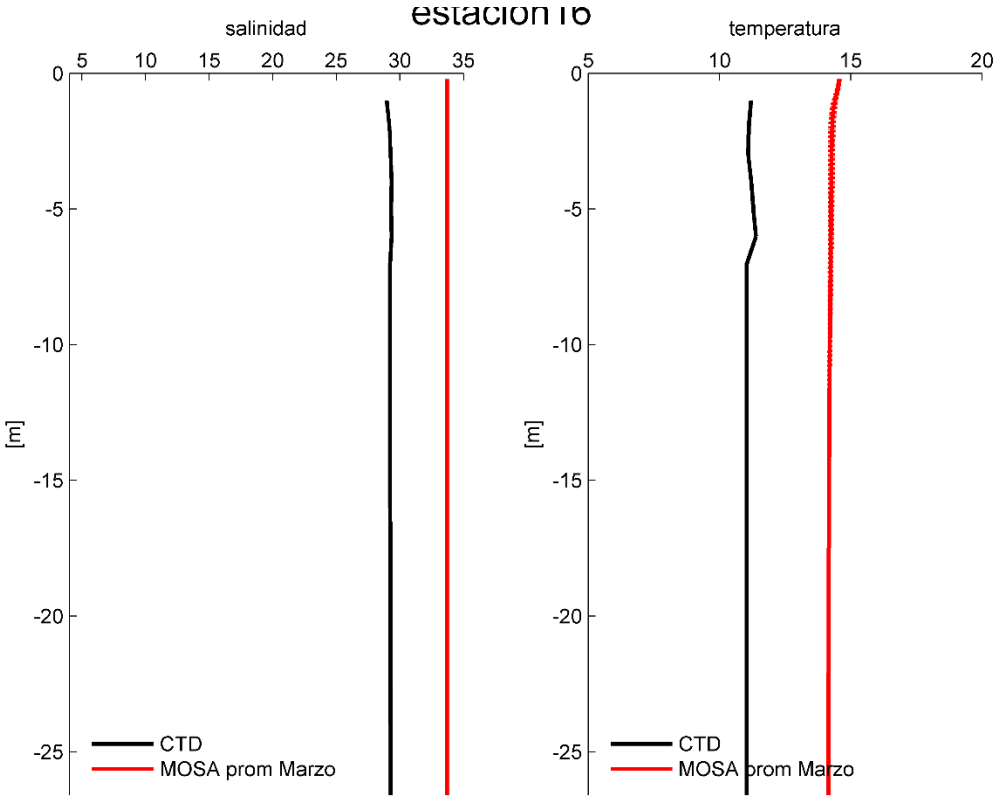


Figura 42. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 16. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

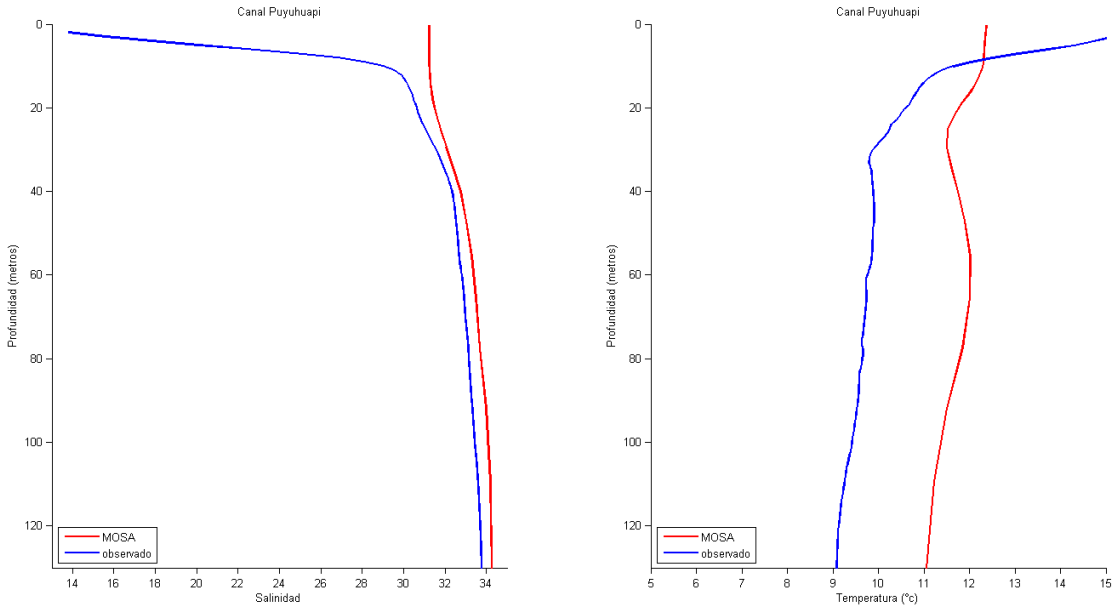


Figura 43. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Puyuhuapi, Región de Aysén.

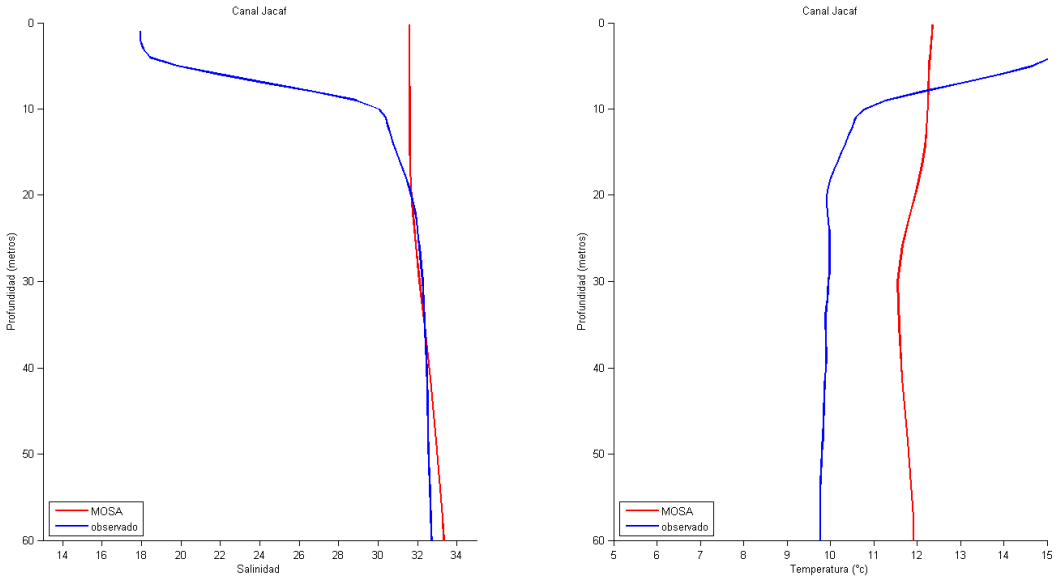


Figura 44. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Jacaf, Región de Aysén.

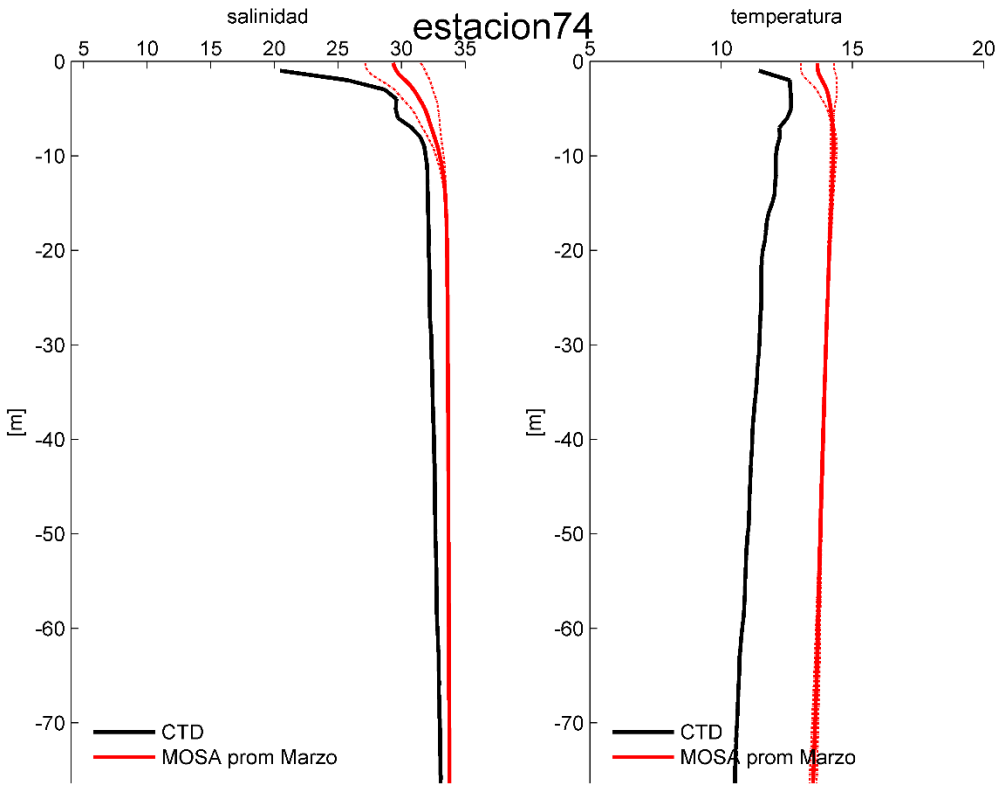


Figura 45. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 74. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

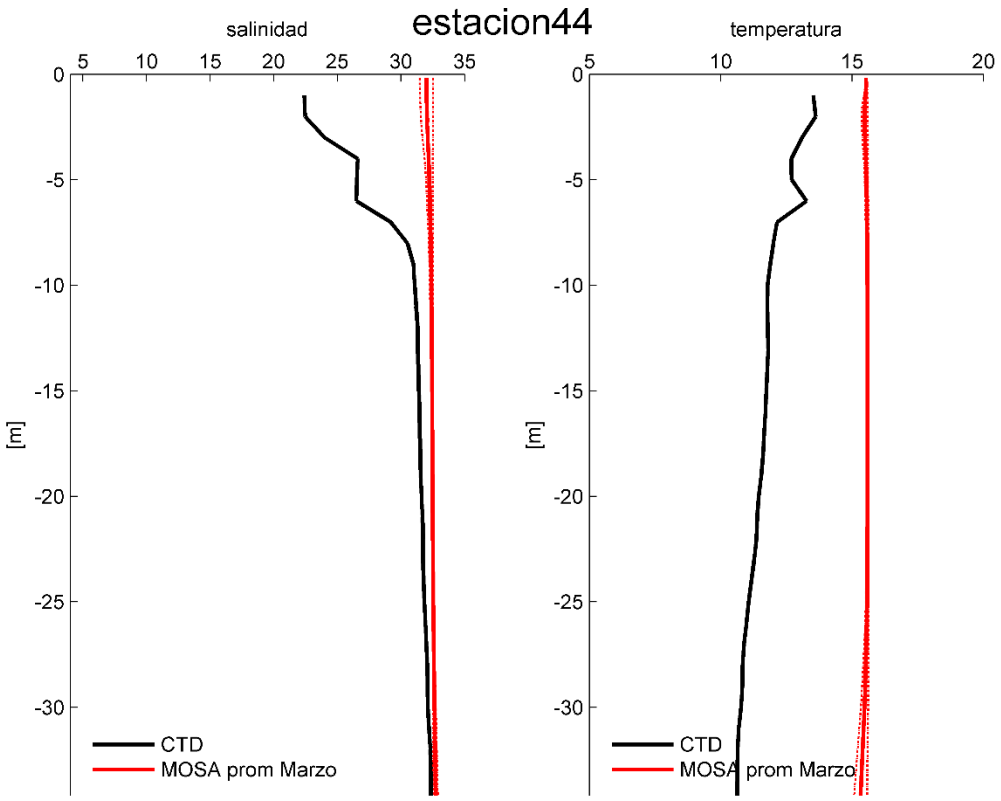


Figura 46. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 44. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

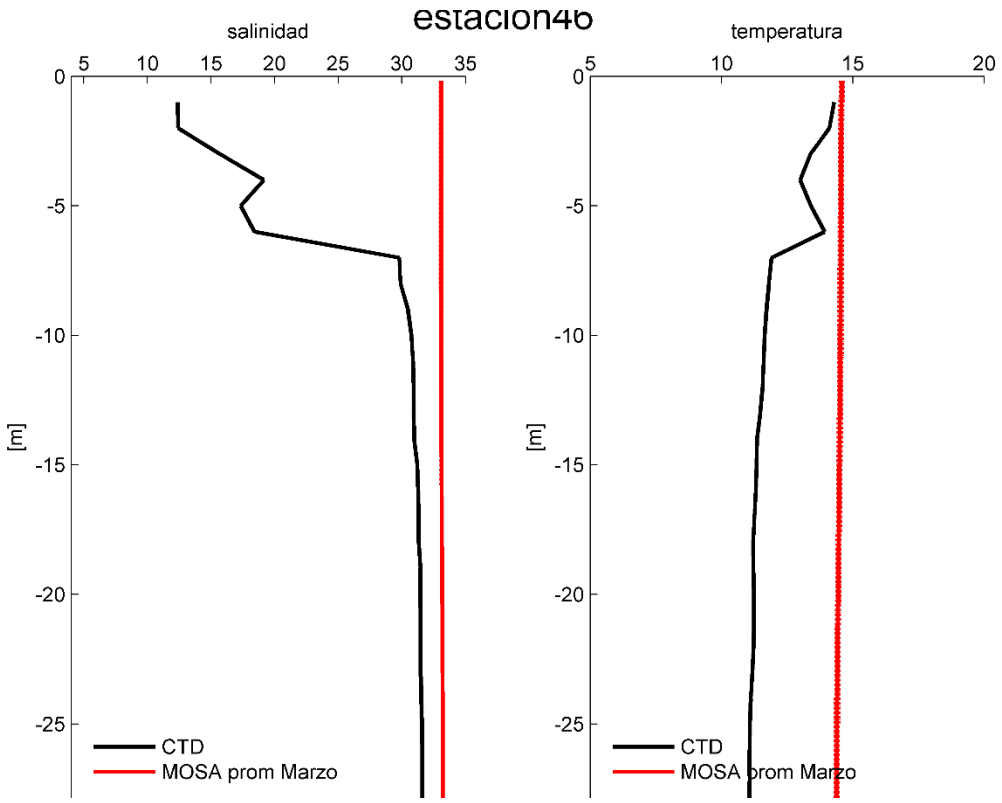


Figura 47. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 46. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

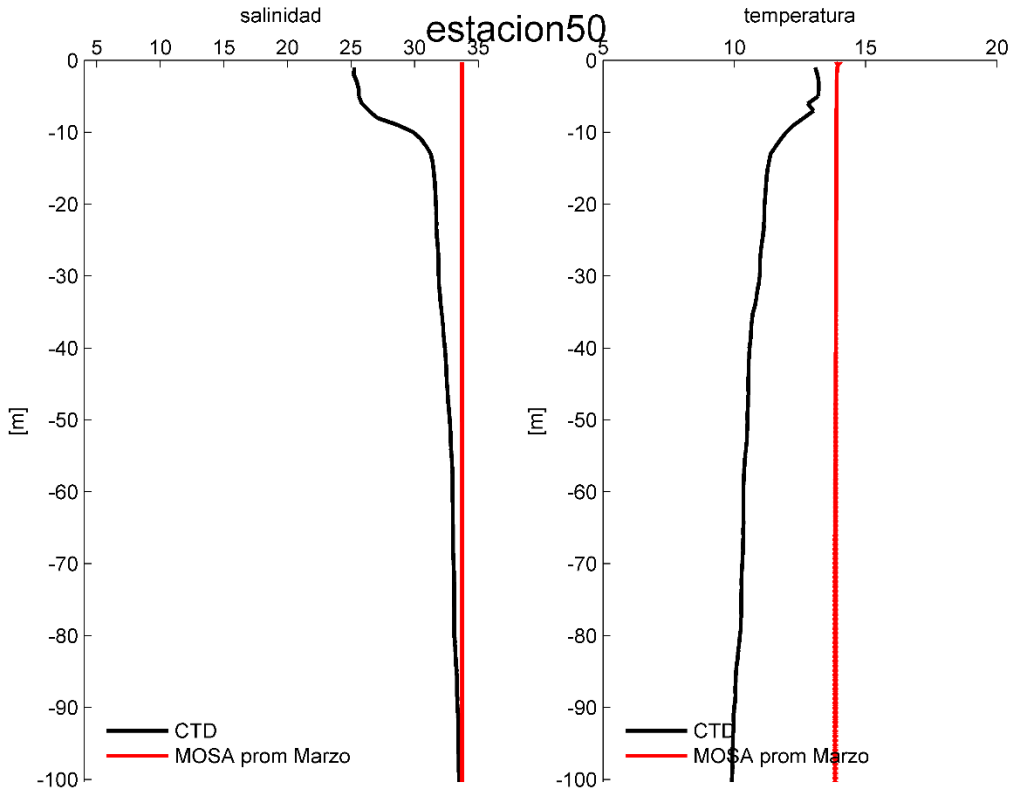


Figura 48. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 50. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

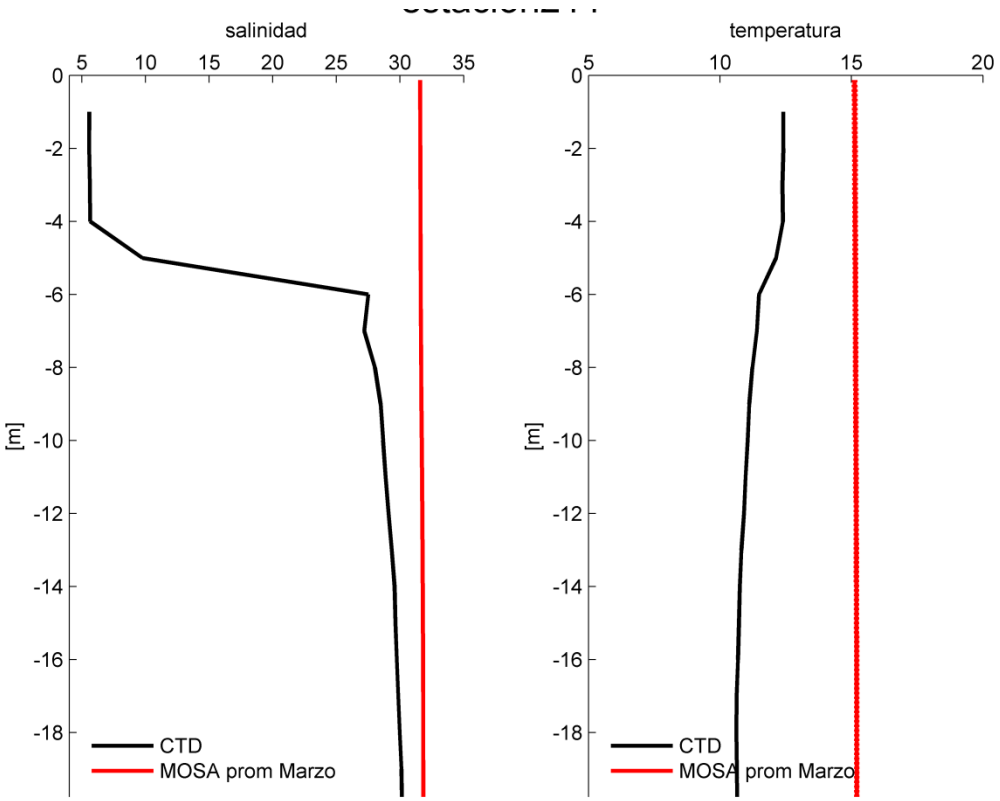


Figura 49. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 21. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

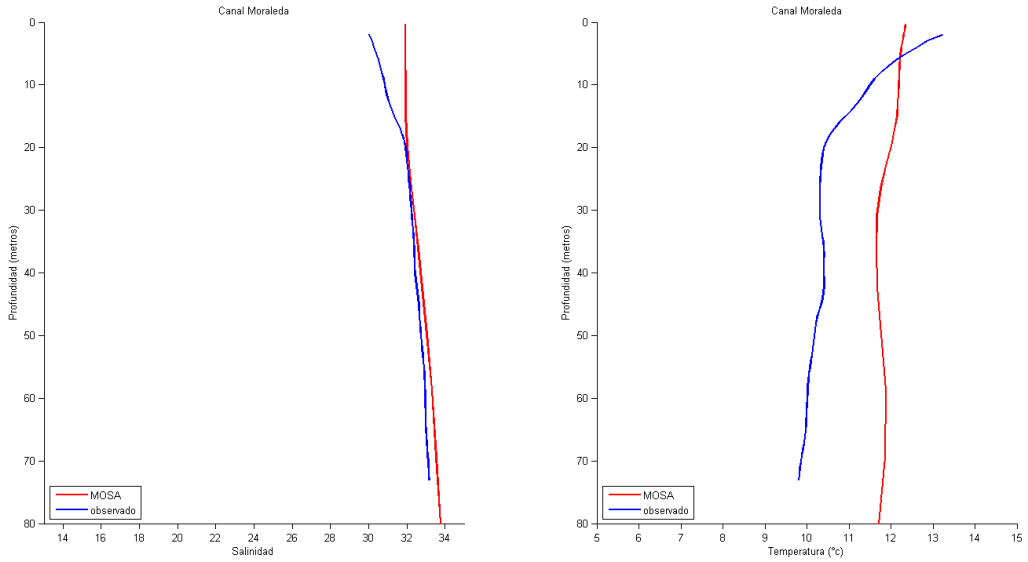


Figura 50. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Corcovado, Mar interior de Chiloé, Región de Los Lagos.

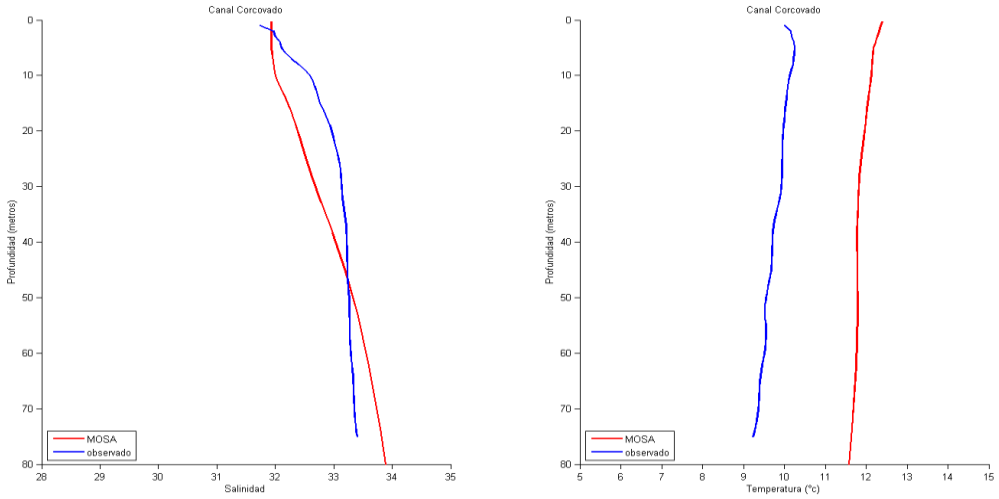


Figura 51. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Corcovado, Mar interior de Chiloé.

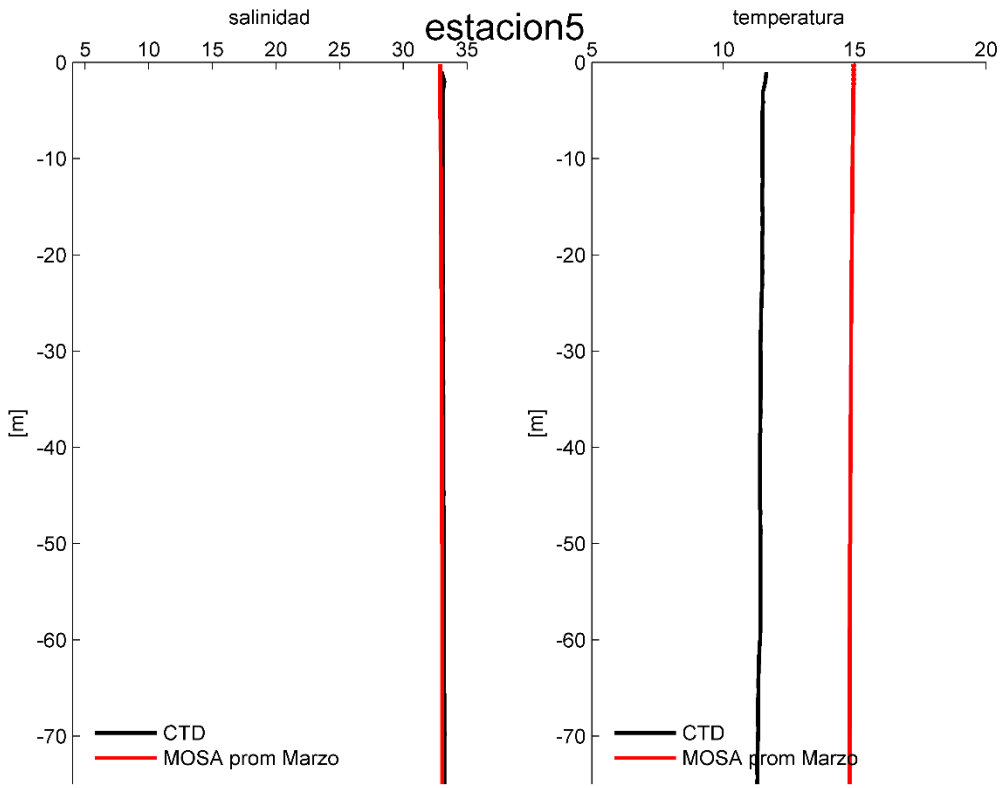


Figura 52. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 5. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

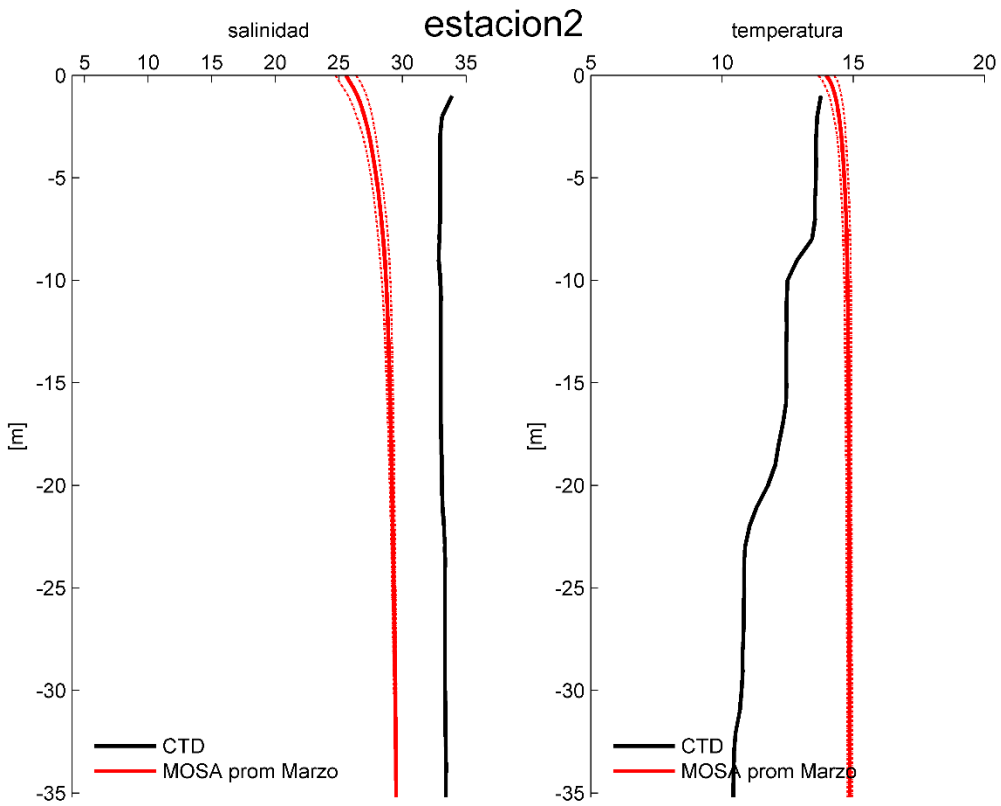


Figura 53. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 2. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

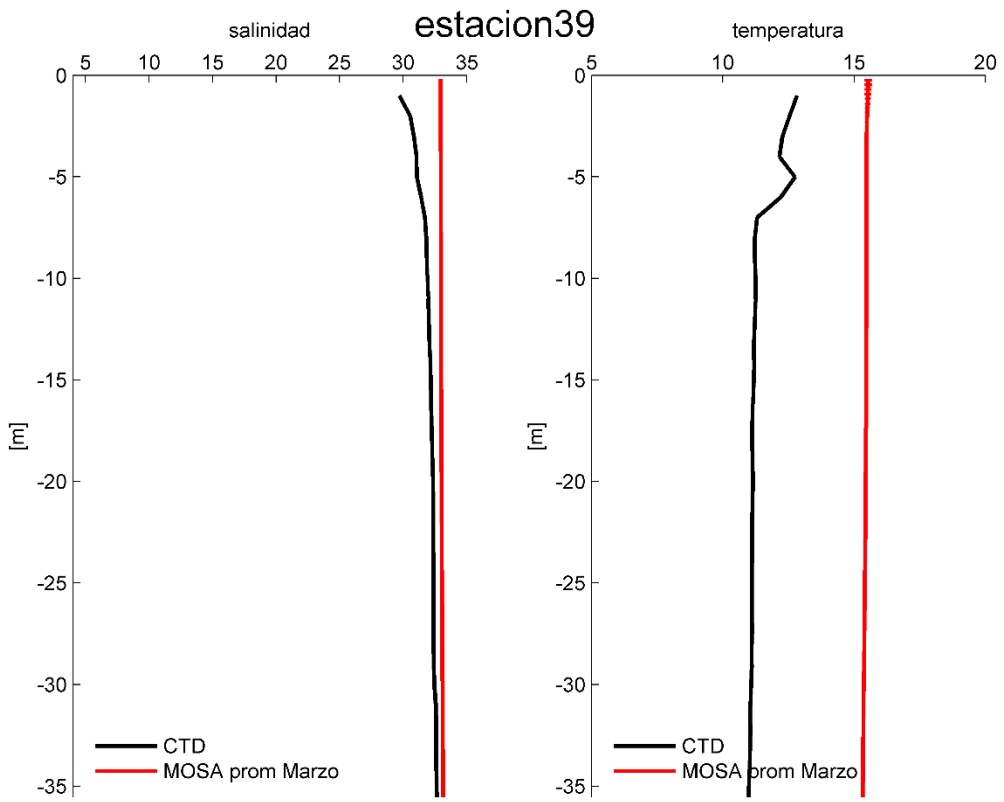


Figura 54. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 39. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

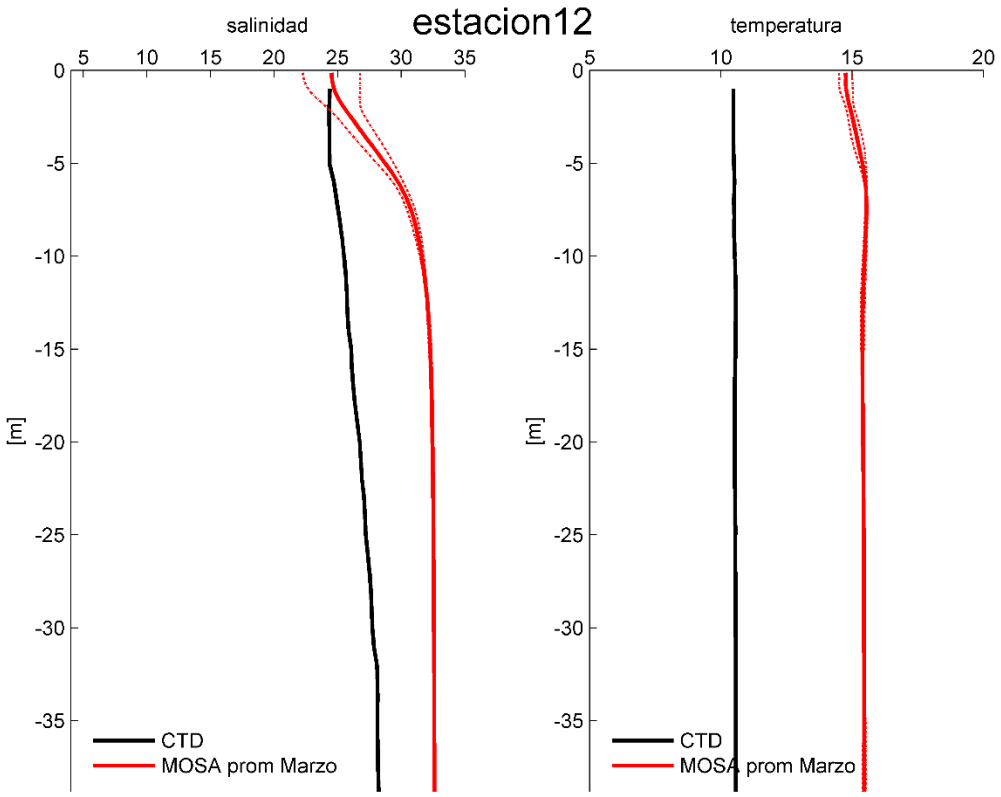


Figura 55. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 12. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

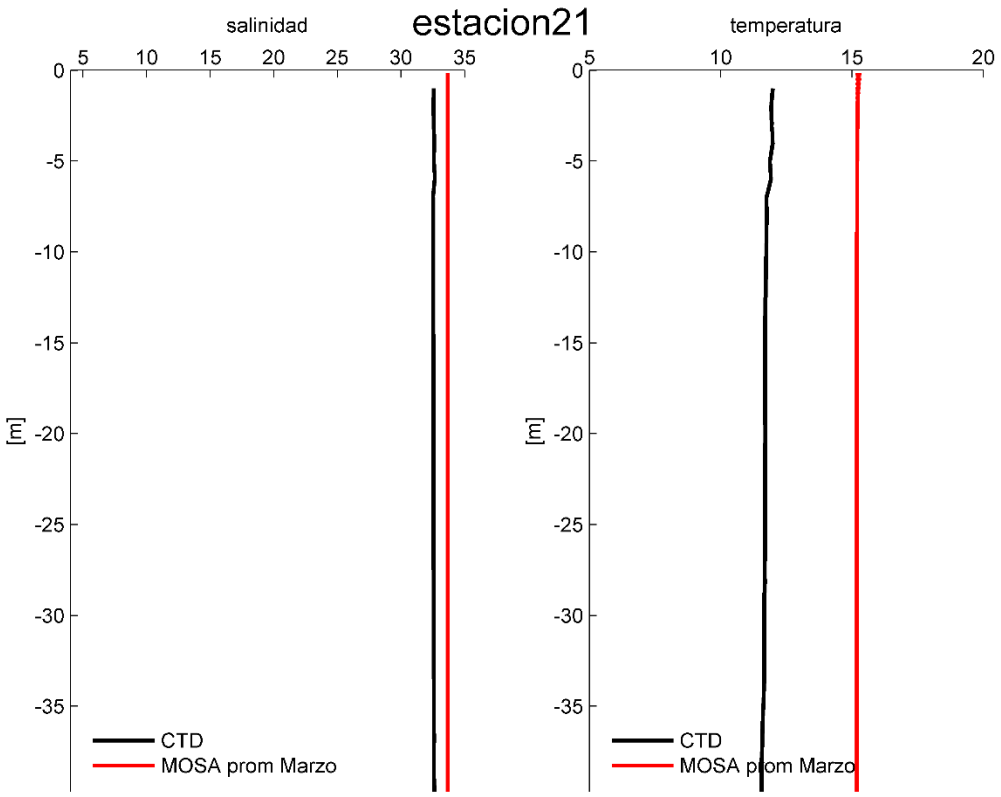


Figura 56. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 21. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

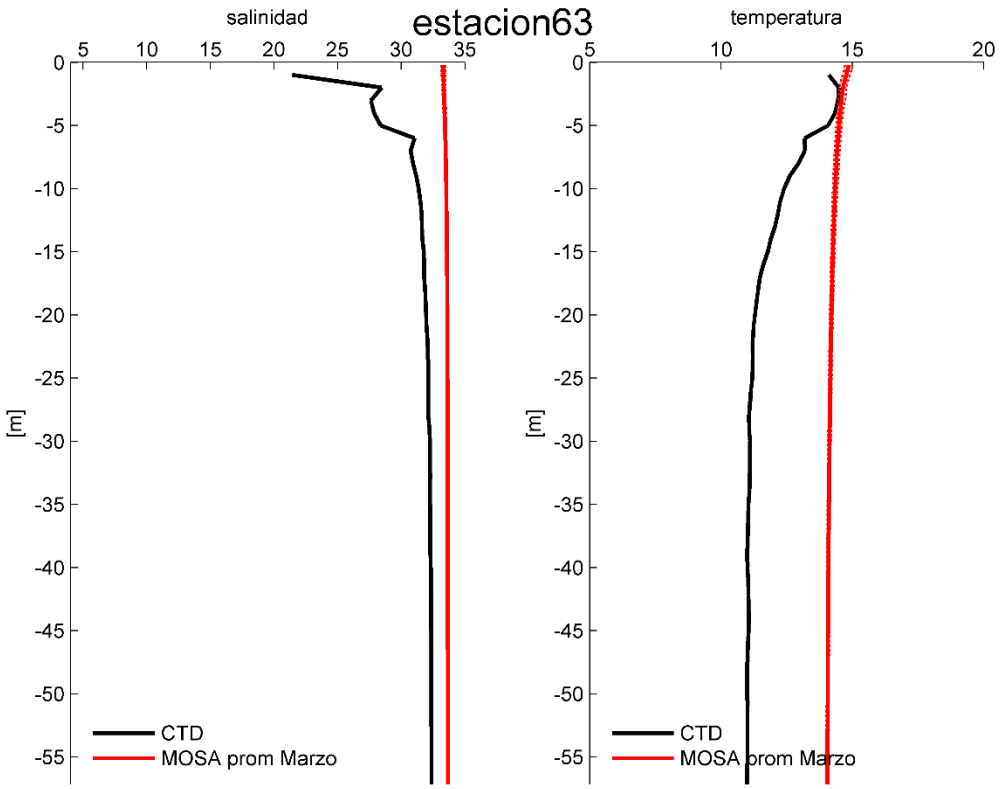


Figura 57. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha) en la estación 63. Los datos observados corresponden a perfiles obtenidos por CTD entre diciembre de 2015 y enero 2016, mientras que los valores de MOSA corresponden a promedios diarios entre febrero y marzo de 2016.

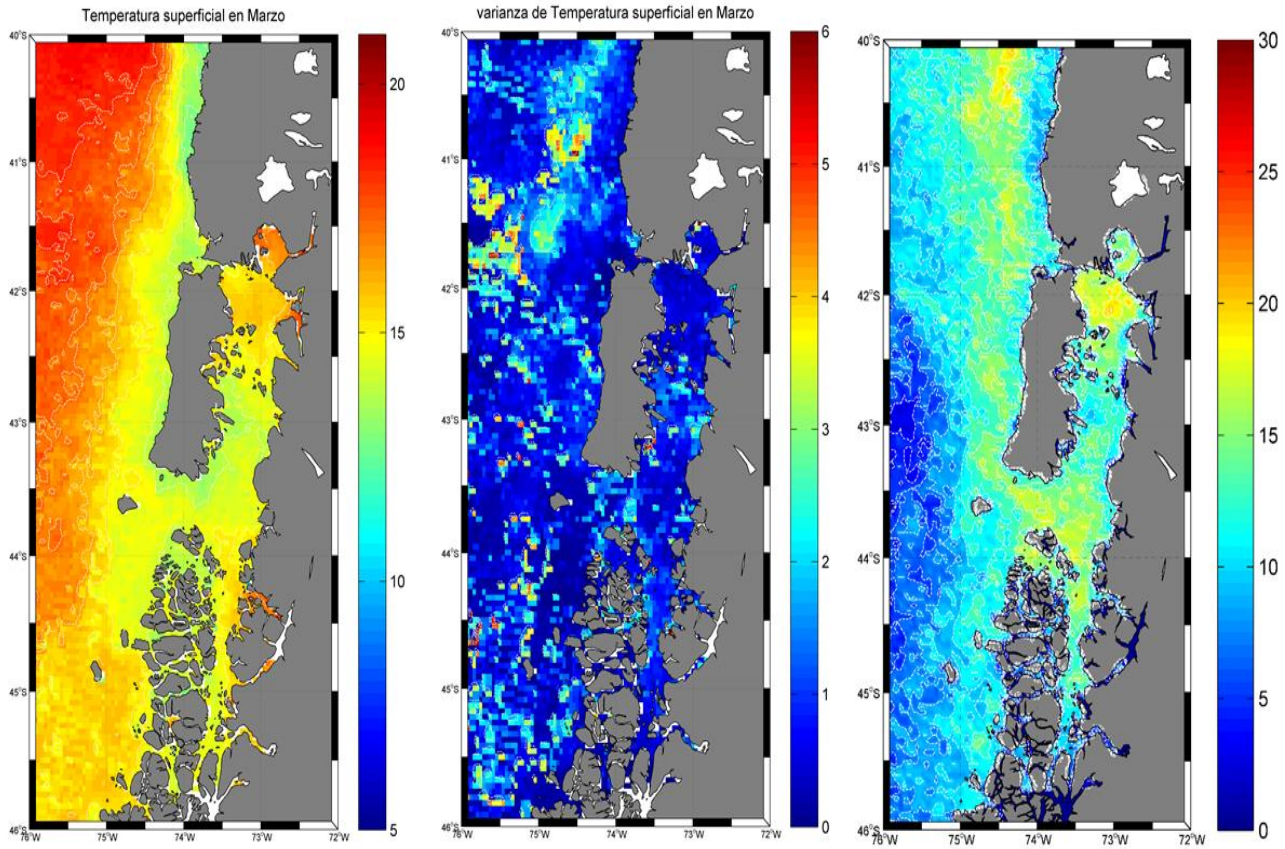


Figura 58. (Izquierda) Promedio mensual de marzo de la Temperatura superficial del mar (TSM) obtenida de datos satelitales MODIS, (centro) varianza del promedio de TSM, y (derecha) número de días con datos para construir el promedio.

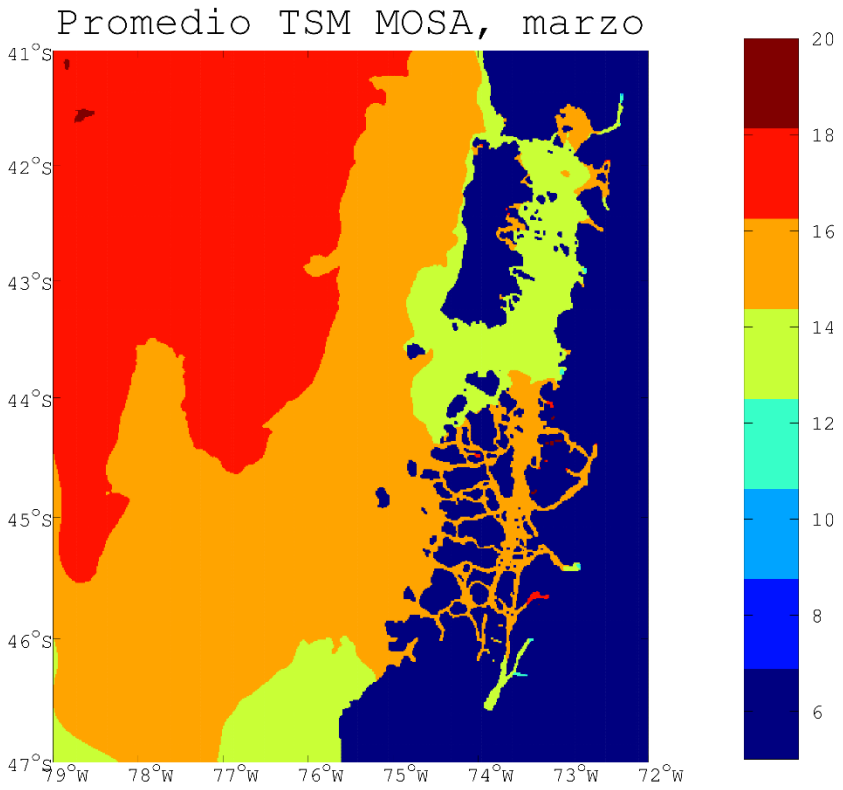


Figura 59. Promedio mensual de marzo de la temperatura superficial del mar pronosticada por MOSA par ale dominio de Chiloé –Aysén.

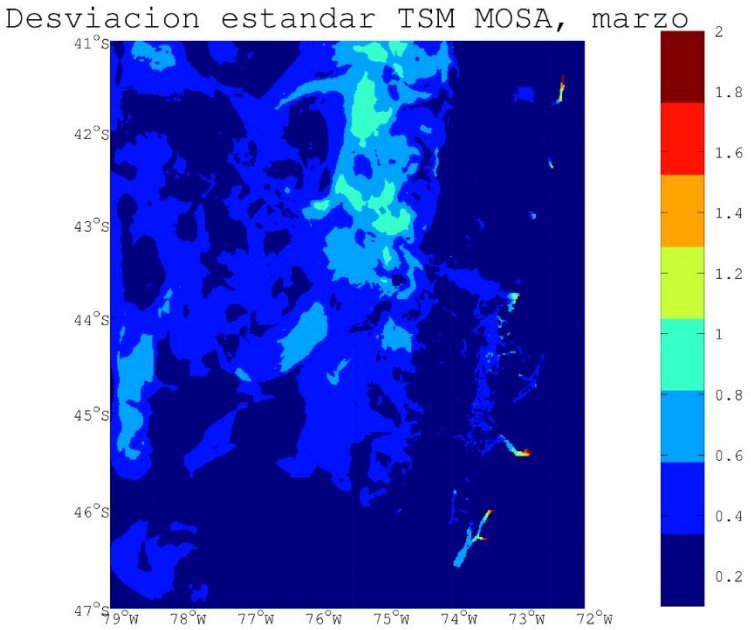


Figura 60. Desviación estándar del promedio mensual de marzo para TSM en el dominio Chiloé – Aysén de MOSA.

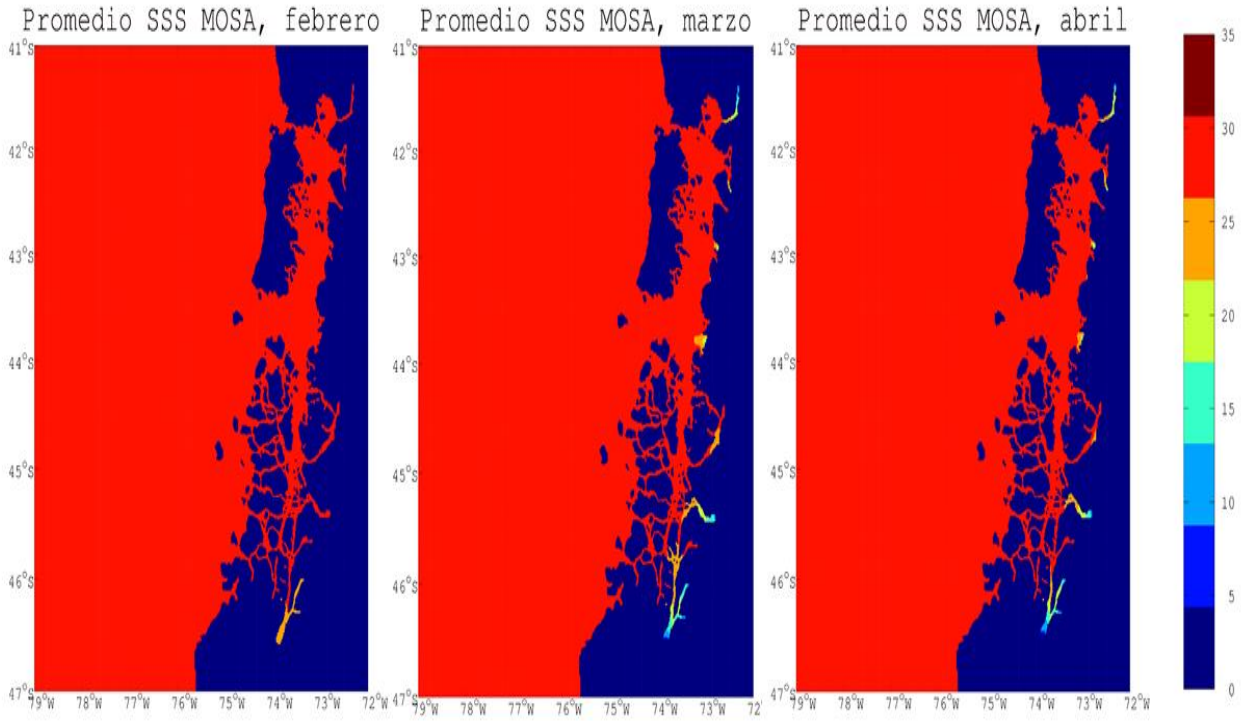


Figura 61. Promedios mensuales de salinidad superficial del mar (SSS) de MOSA para los meses de febrero, marzo y abril, 2016.

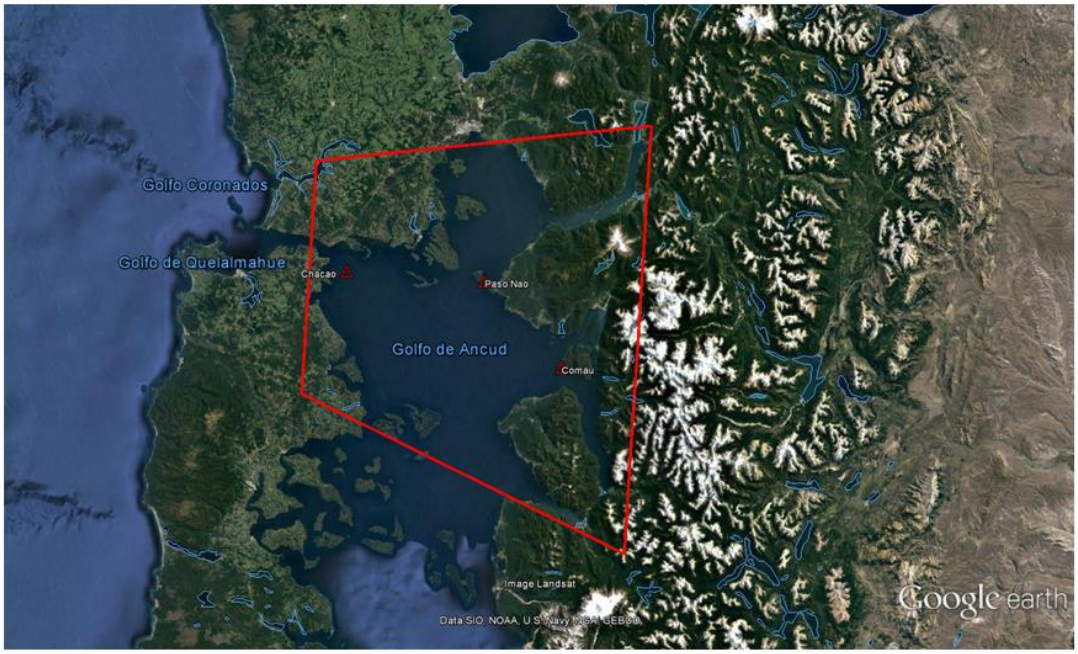


Figura 62. Zona de Reloncaví, Golfo de Ancud, Con posiciones de equipos en Paso Nao, Fiordo Comau y Canal Chacao.

Figura 63. Zona de Chiloé Central, Con posiciones de equipos en Lin lin, Llingua, Chaulinec e Isla Tranqui.

Figura 64. Zona de Corcovado Moraleda, Con posiciones de equipos usados.

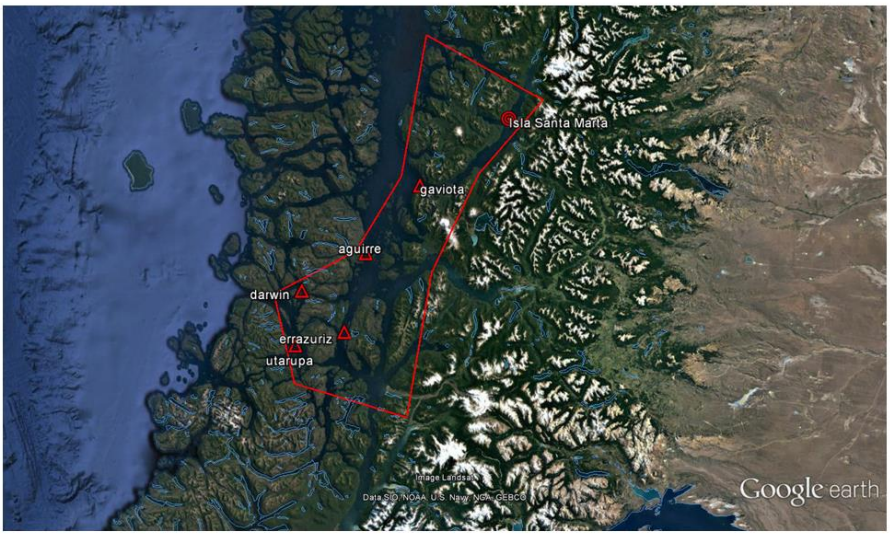


Figura 65. Zona de Aysén Continental, Con posiciones de equipos usados en Isla Marta, Puerto Gaviota, Canal Darwin, Canal Errazuriz y Canal Utarupa.

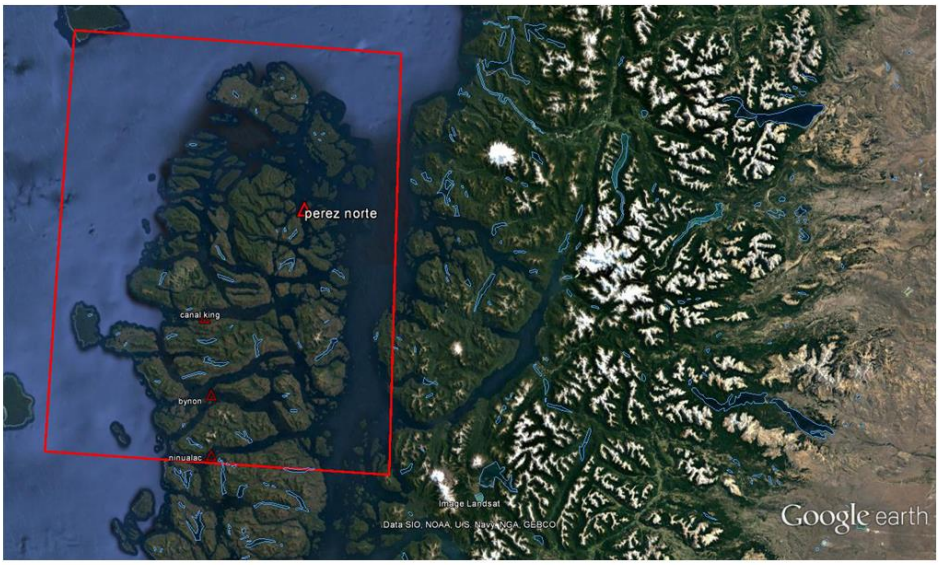


Figura 66. Zona de Aysén insular, Con posiciones de equipos usados en Canal Byron, Canal Perez norte, canal King y Canal Ninualac.

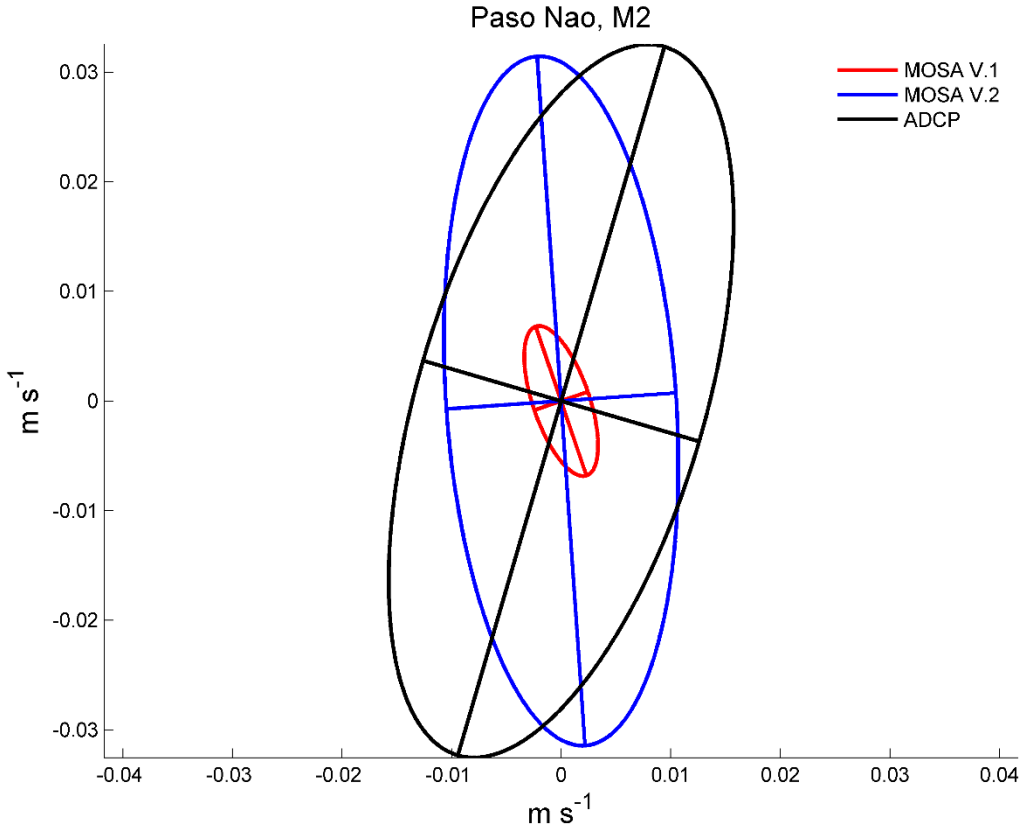


Figura 67. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Paso Nao de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

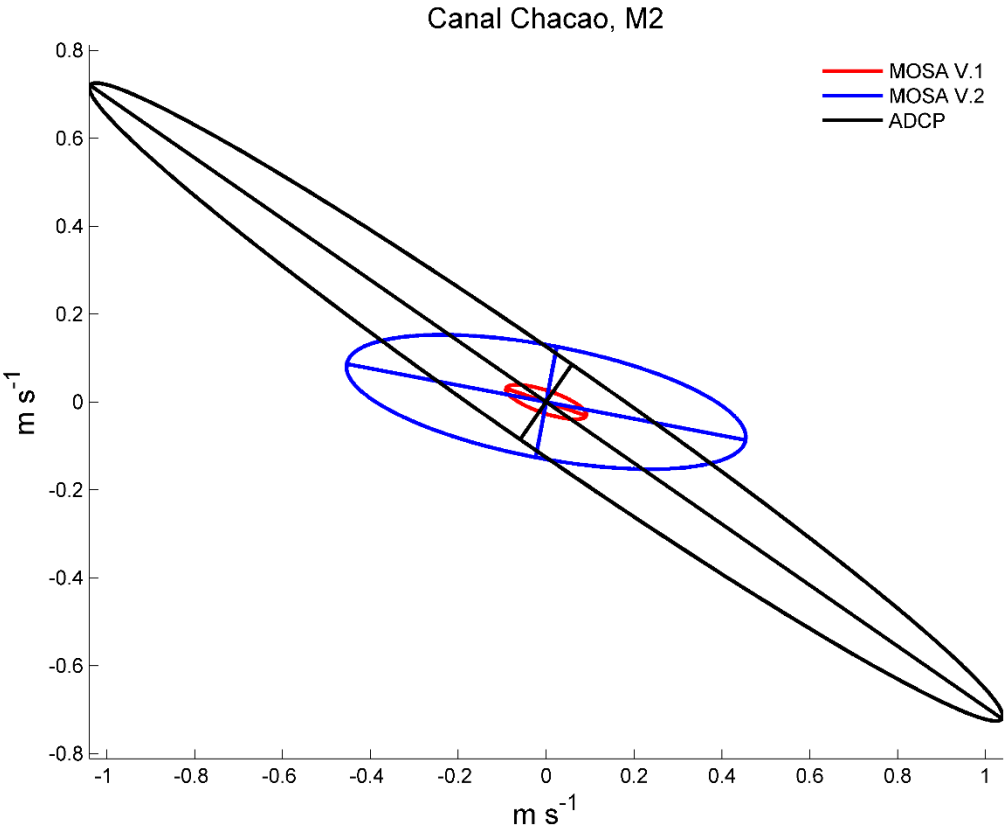


Figura 68. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Chacao de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual)

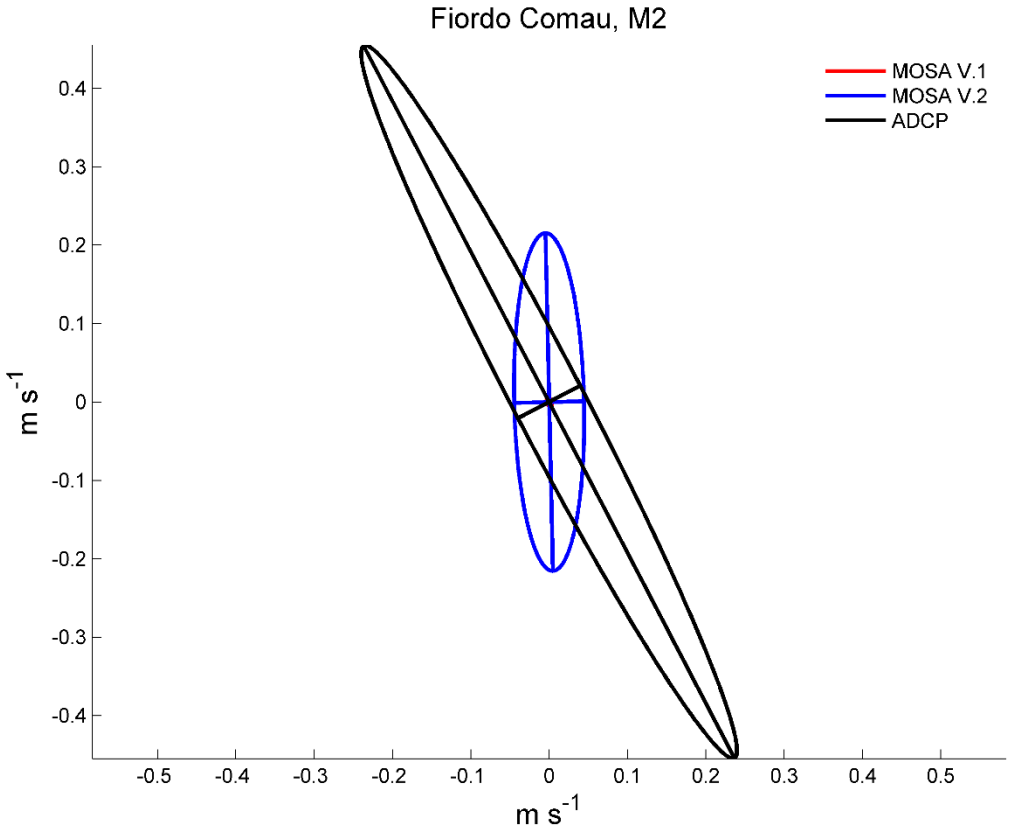


Figura 69. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Fiordo Comau de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

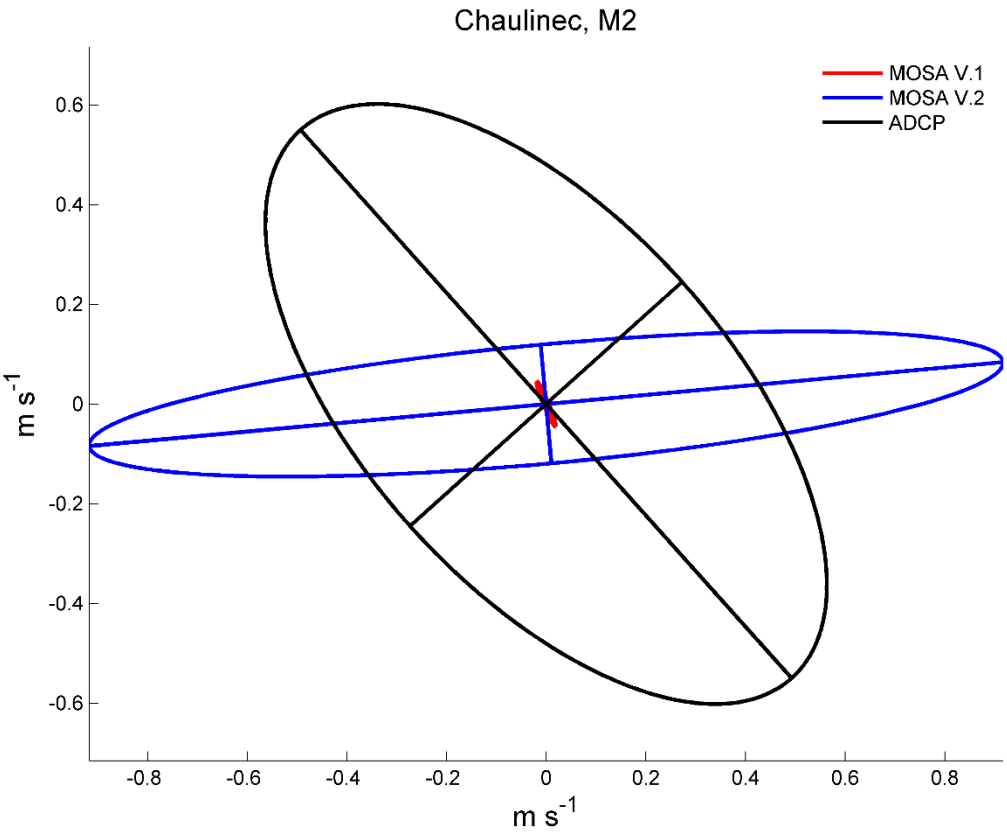


Figura 70. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Chaulinec de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

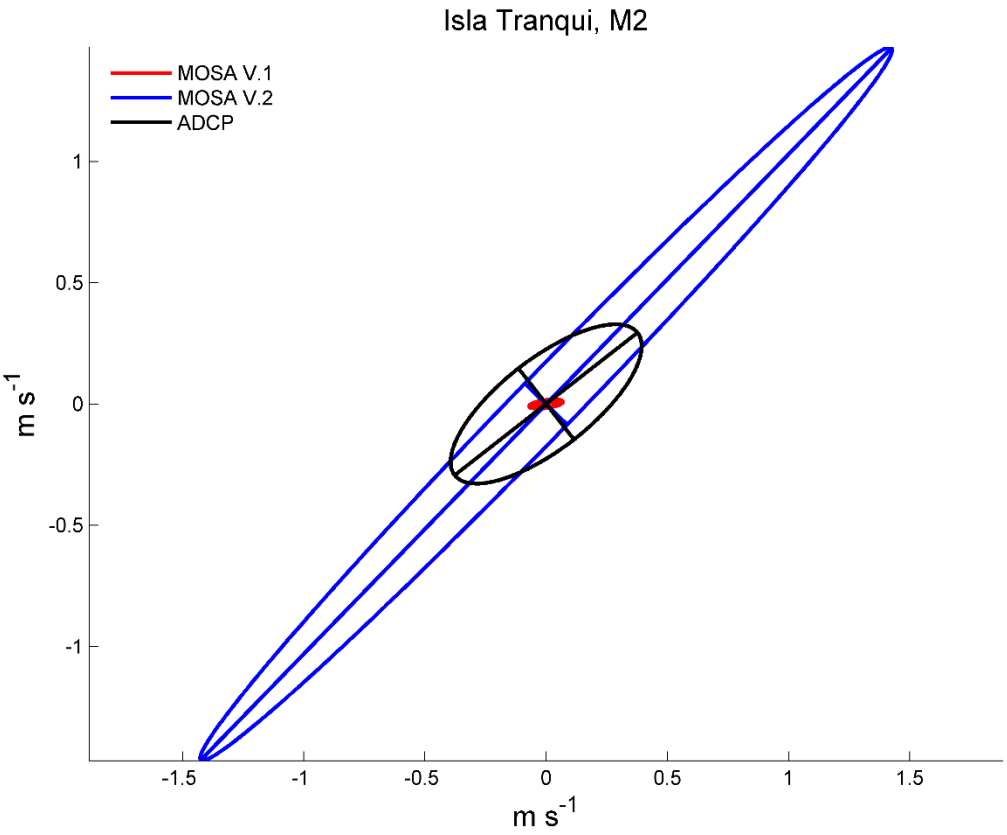


Figura 71. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Tranqui de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

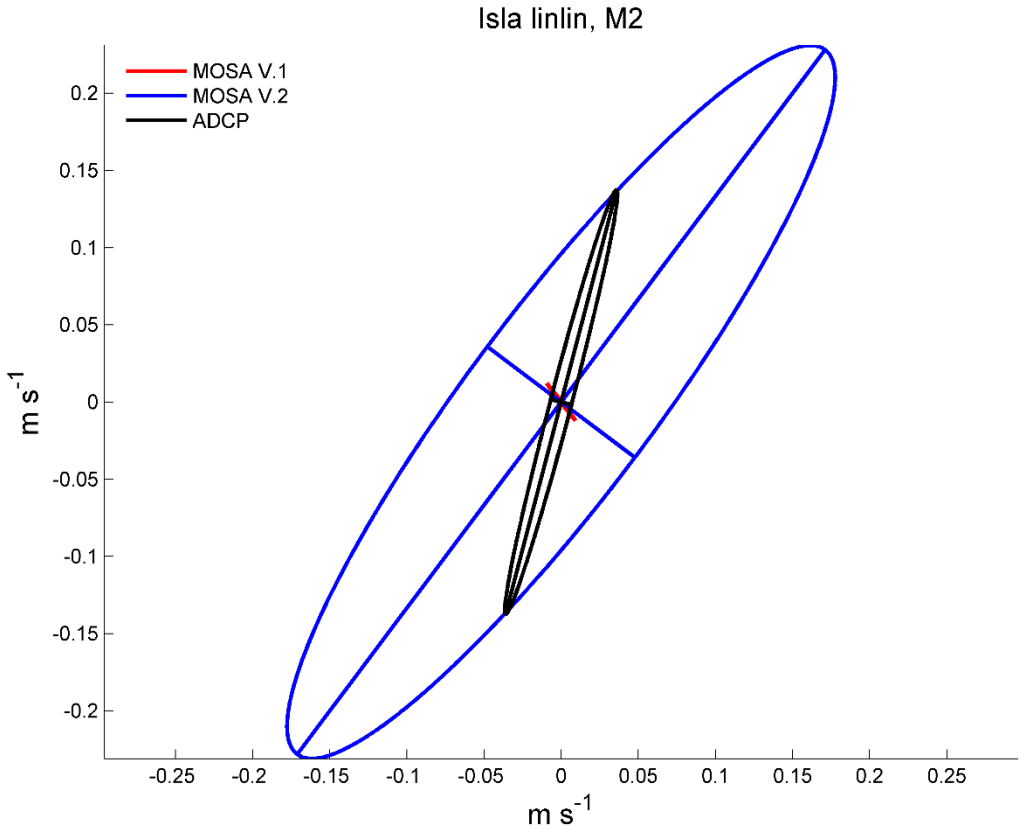


Figura 72. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Linlin de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

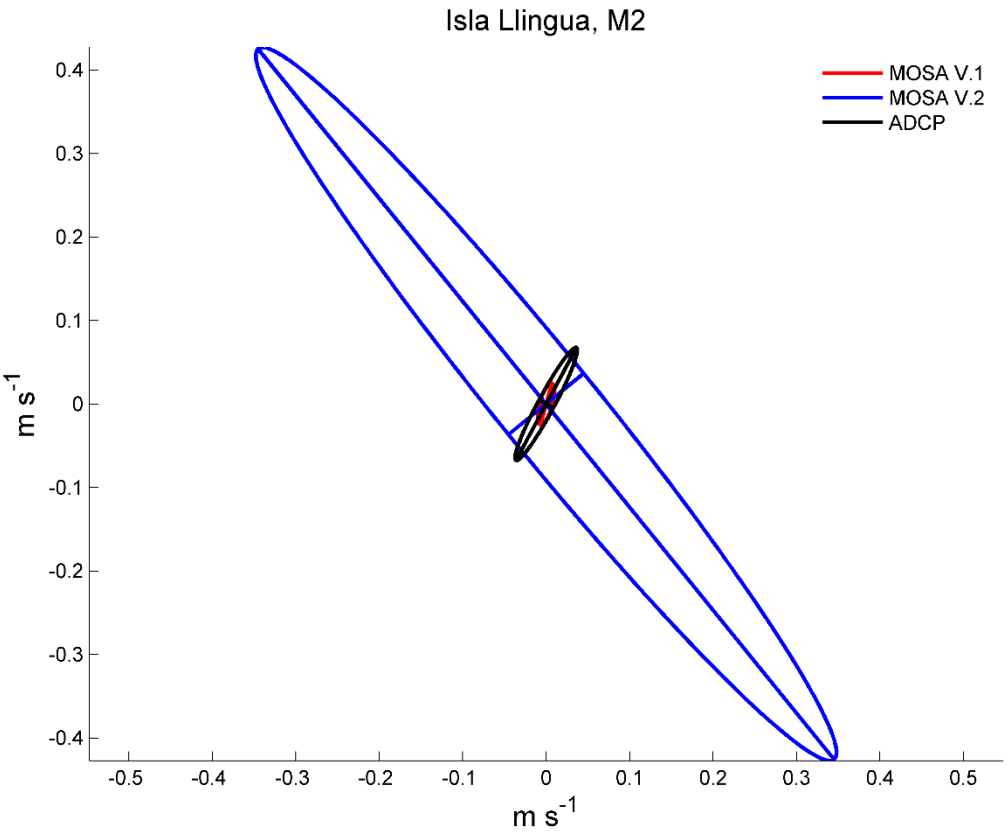


Figura 73. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Llingua de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

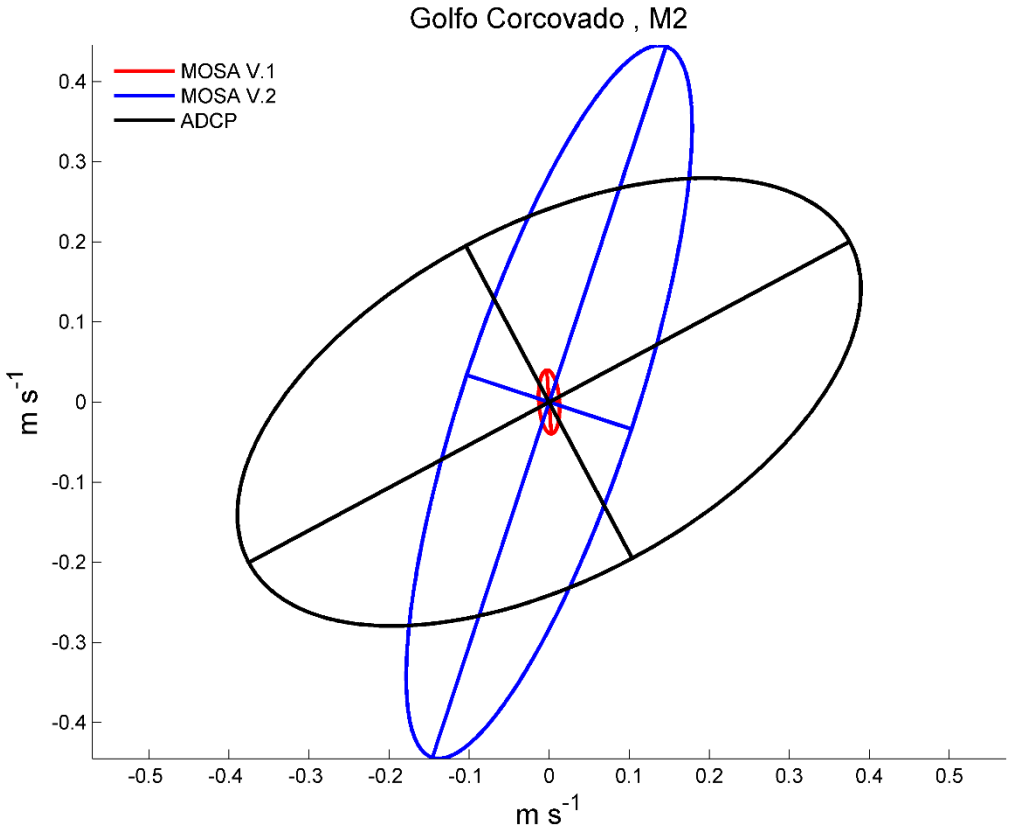


Figura 74. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Golfo Corcovado de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

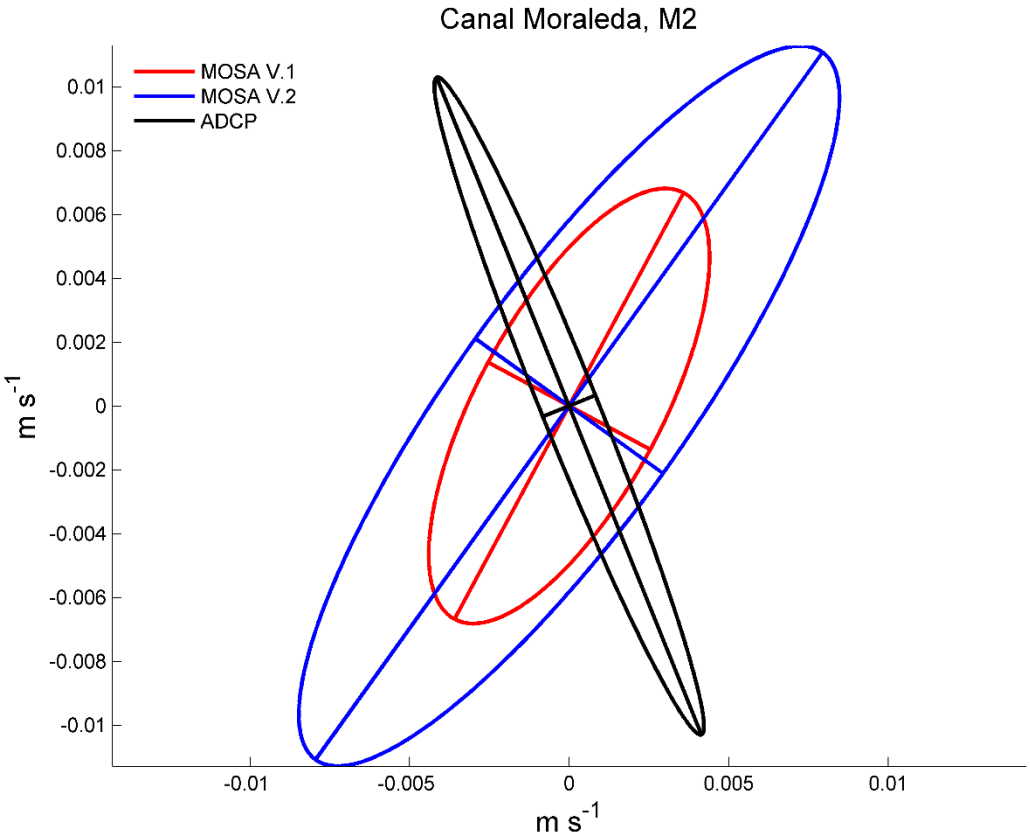


Figura 75. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Moraleda de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

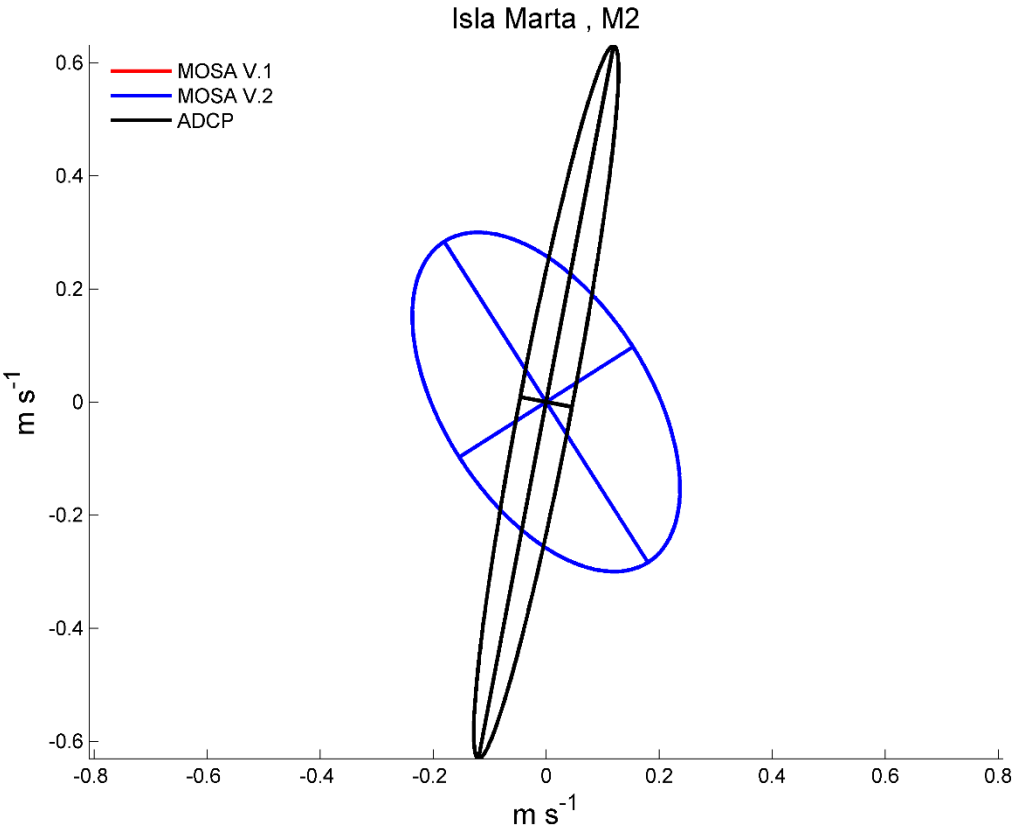


Figura 76. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Isla Santa Marta de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

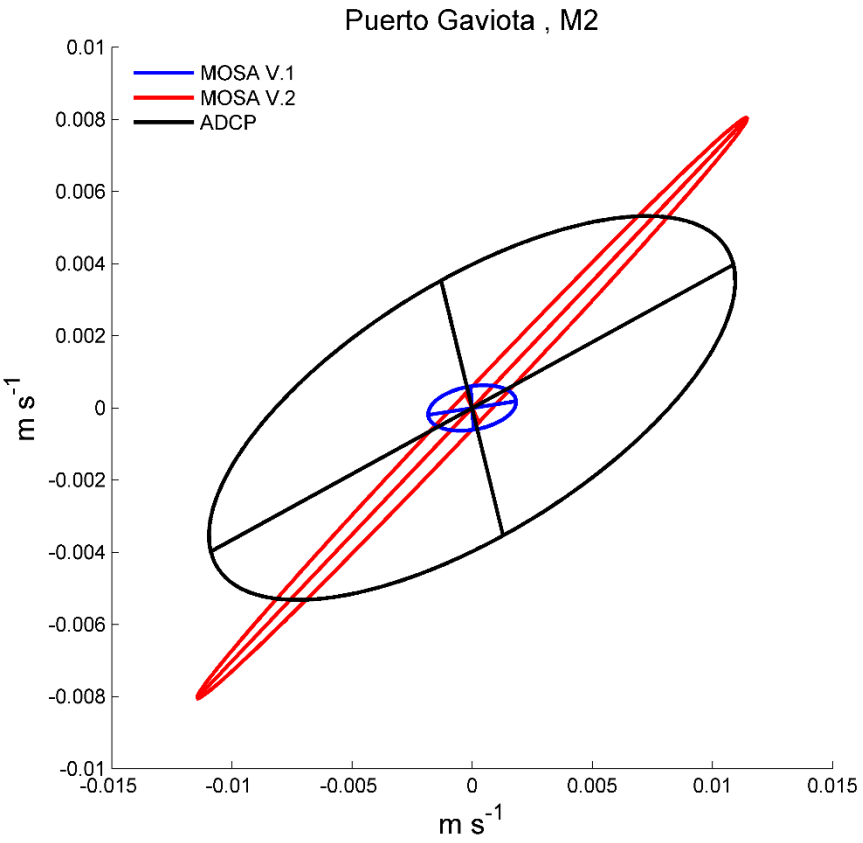


Figura 77. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Puerto Gaviota de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

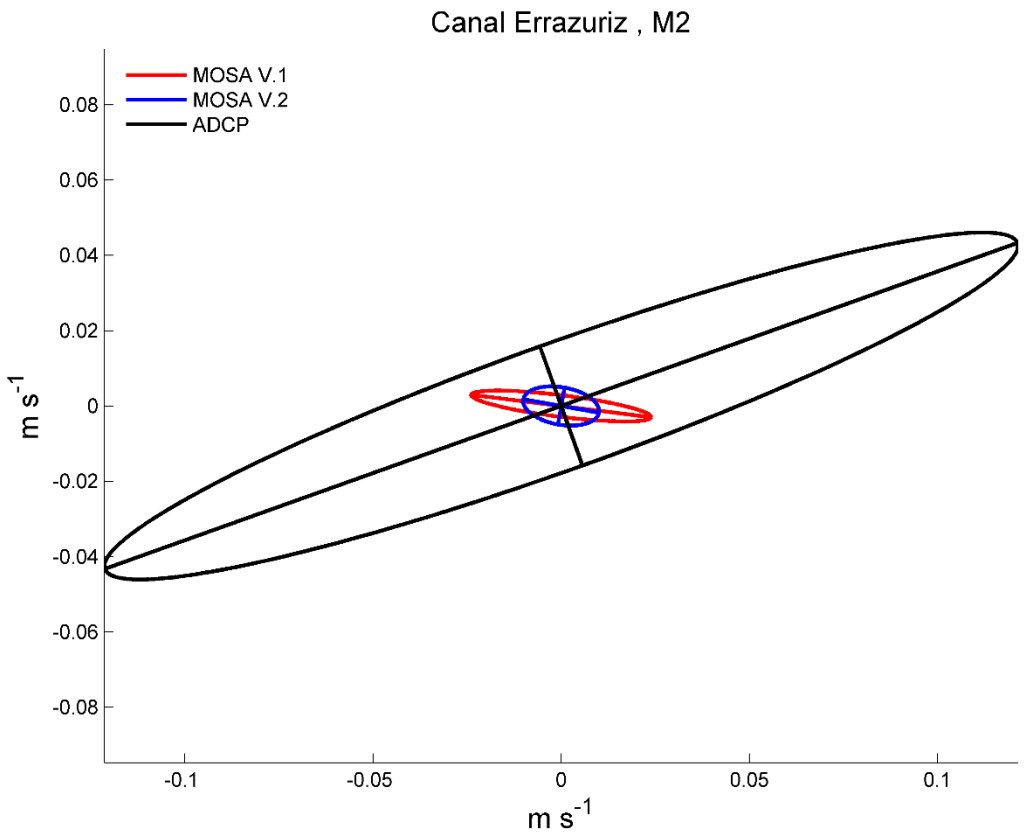


Figura 78. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Errazuriz de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

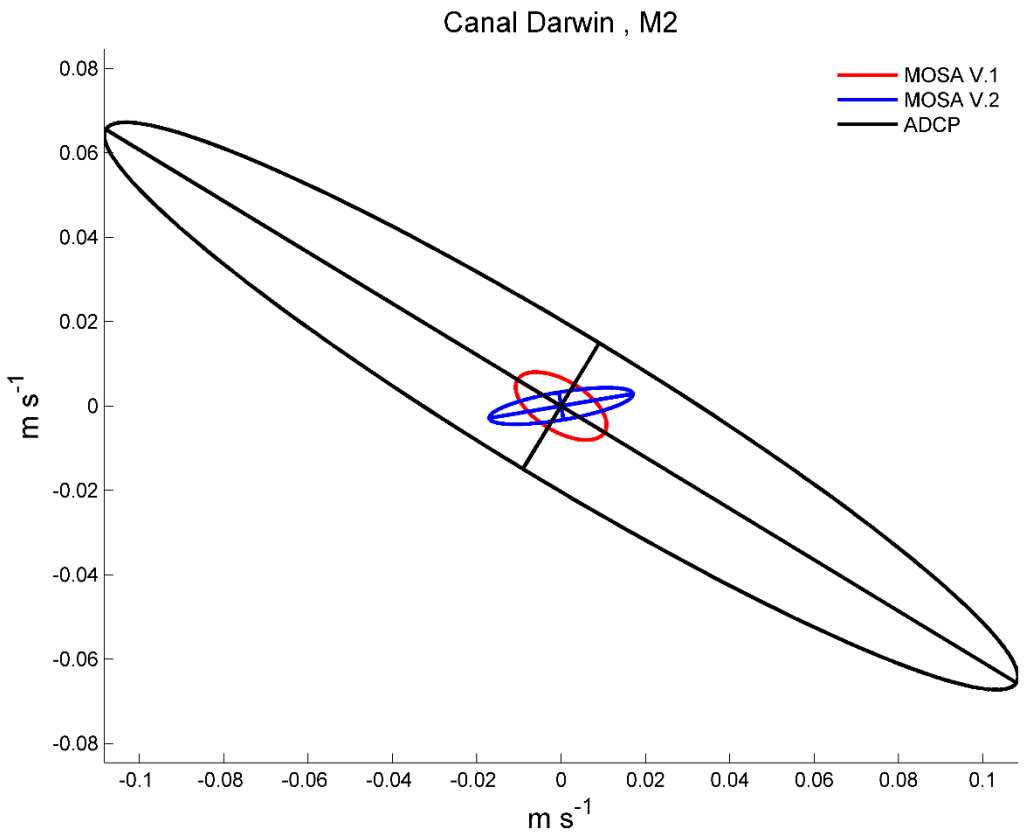


Figura 79. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Darwin de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

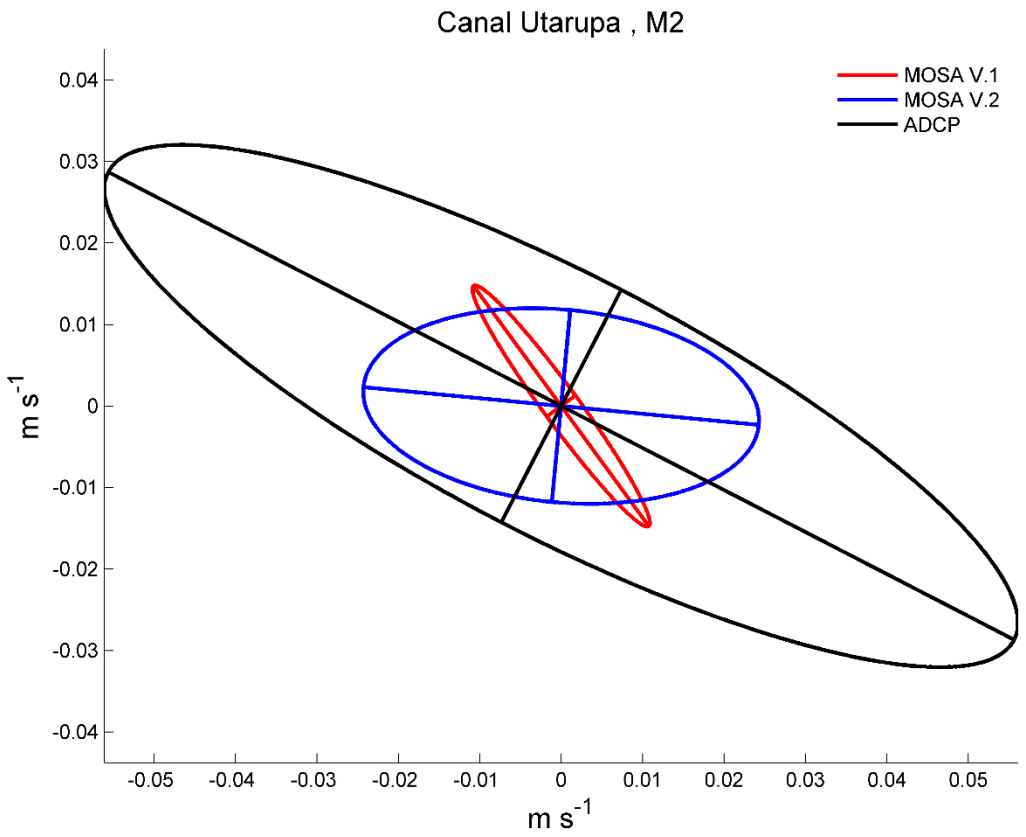


Figura 80. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Utarupa de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

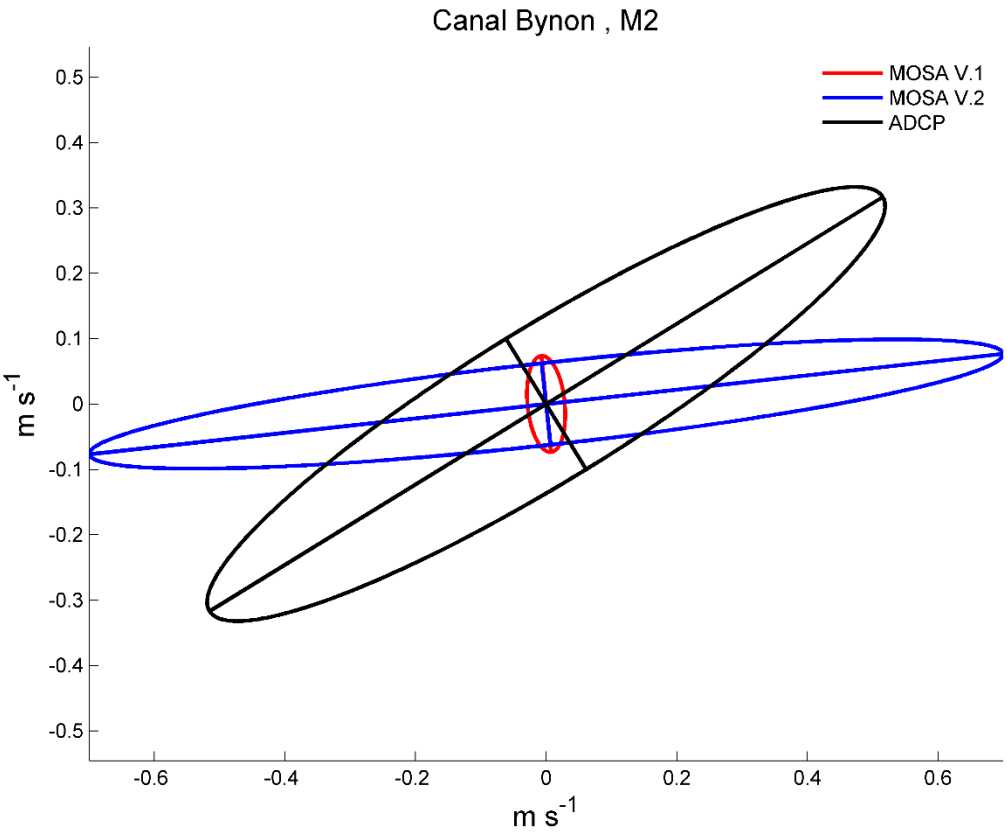


Figura 81. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Bynon de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

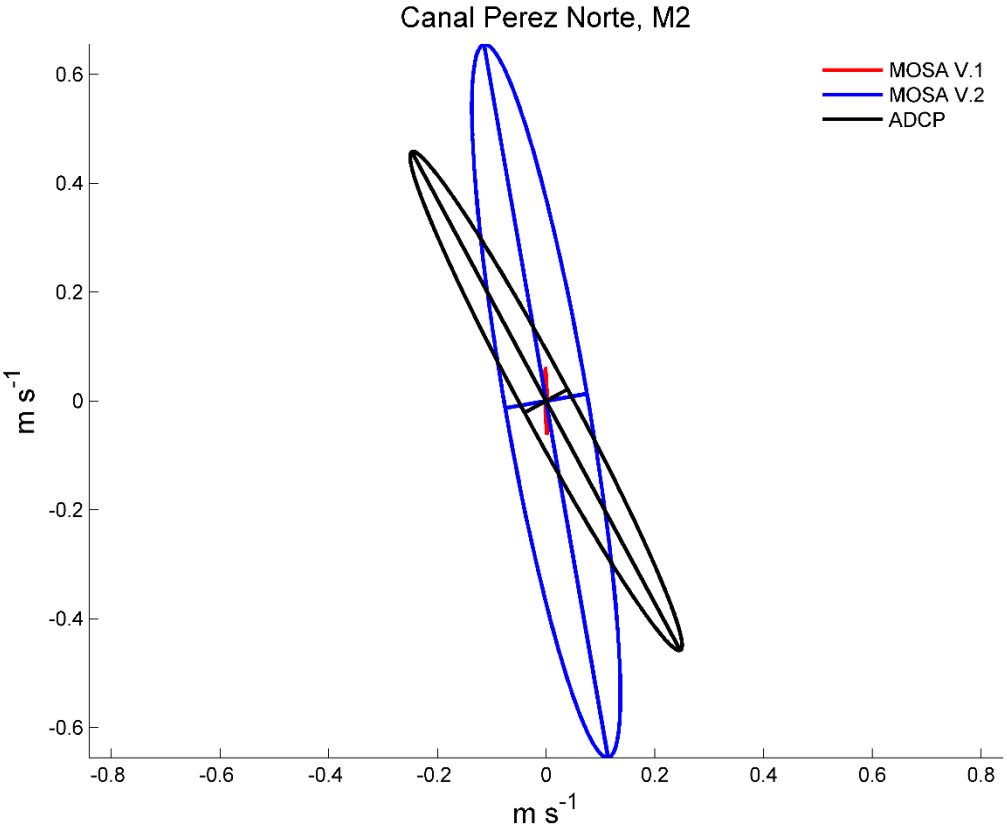


Figura 82. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal Perez Norte de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

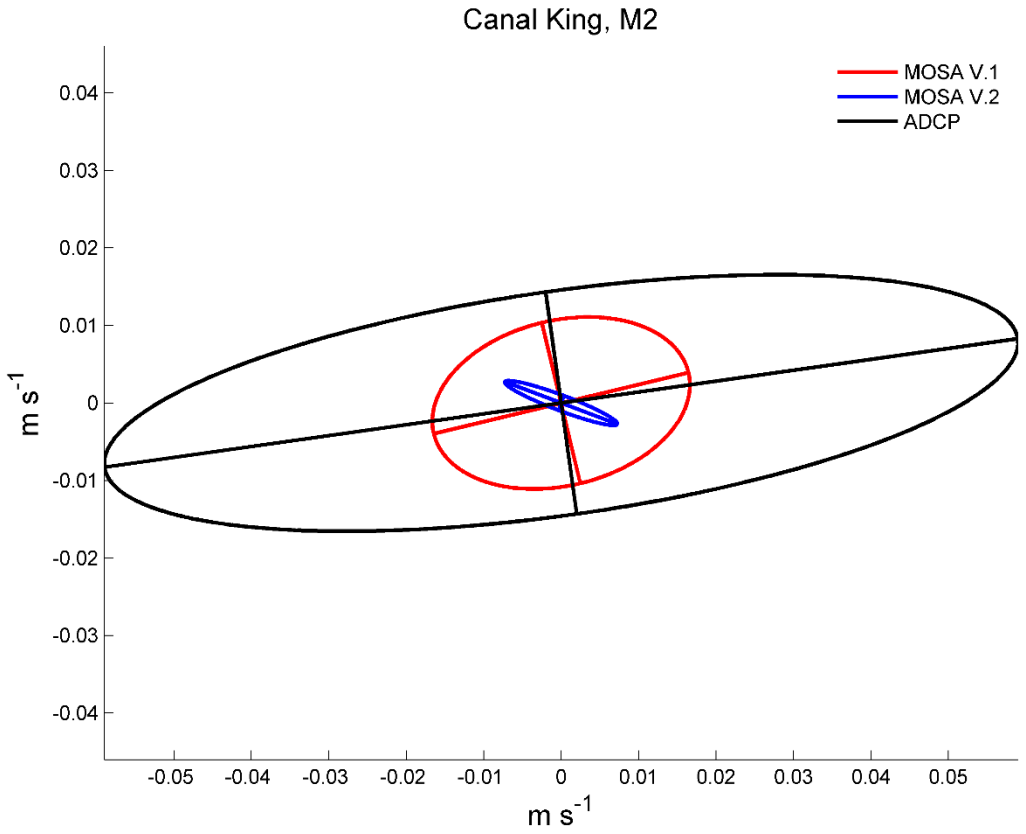


Figura 83. Elipses de corrientes de marea tipo M2 en Canal King de datos observados, MOSA v1 (versión inicial) y v2 (versión actual).

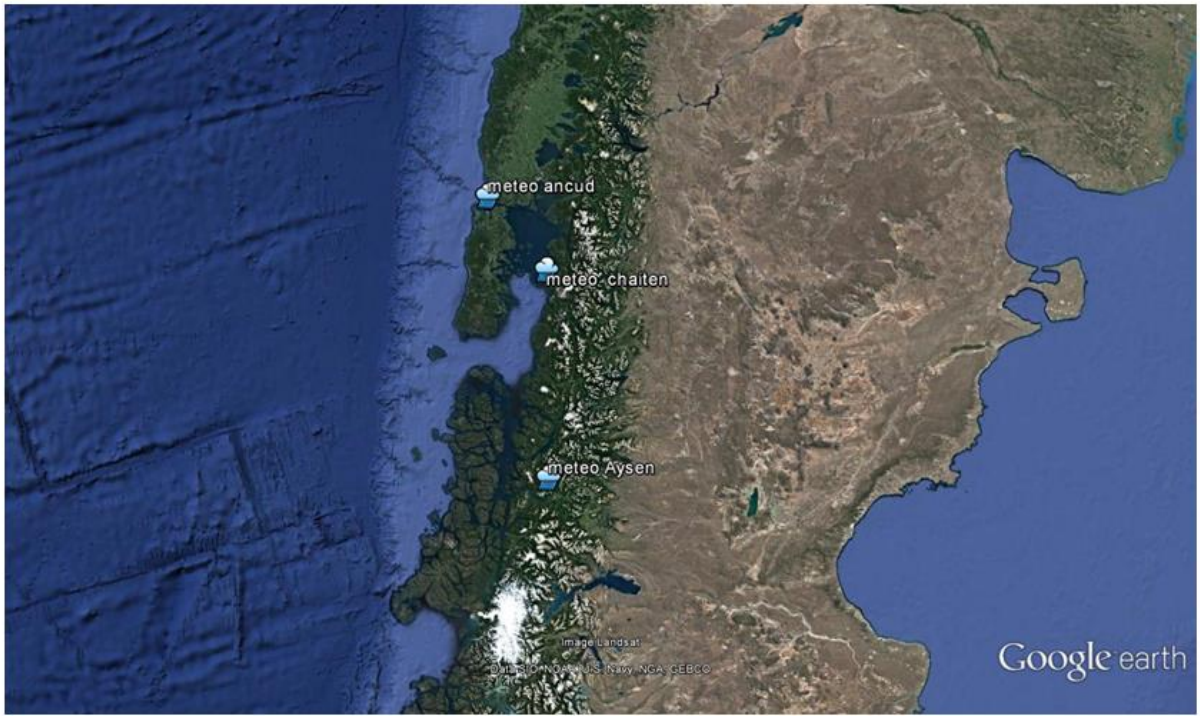


Figura 84. Estaciones meteorológicas usadas para comparar resultados entre GFS y WRF como forzantes de MOSA.

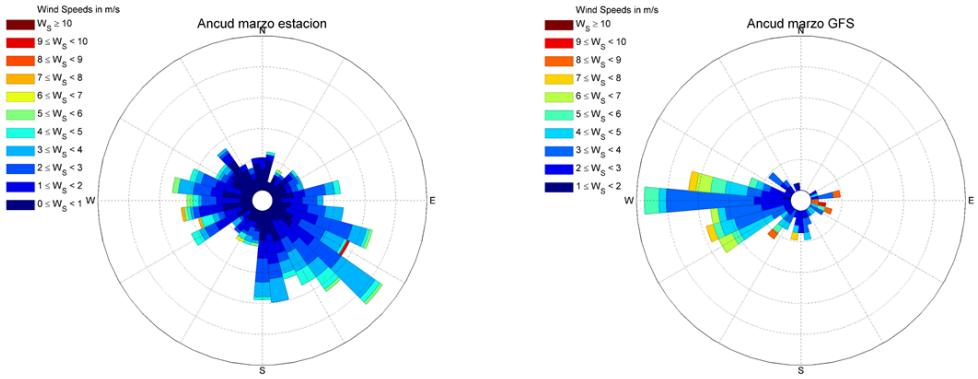


Figura 85. Rosas de viento para el mes de marzo en Ancud de datos observados (izquierda) y datos pronosticados GFS (derecha).

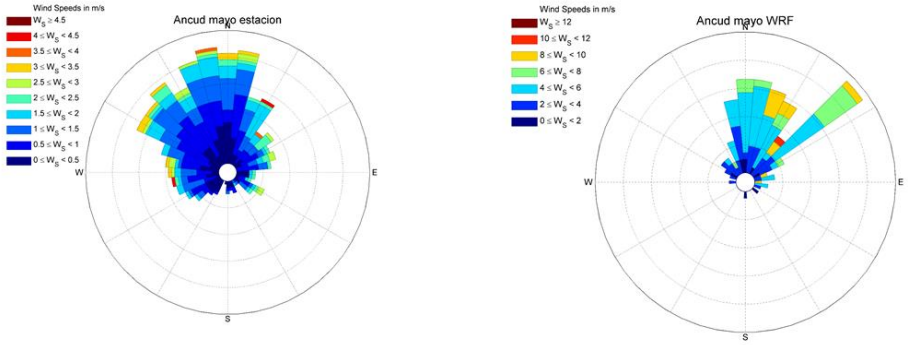


Figura 86. Rosas de viento para el mes de mayo en Ancud de datos observados (izquierda) y datos pronosticados WRF (derecha).

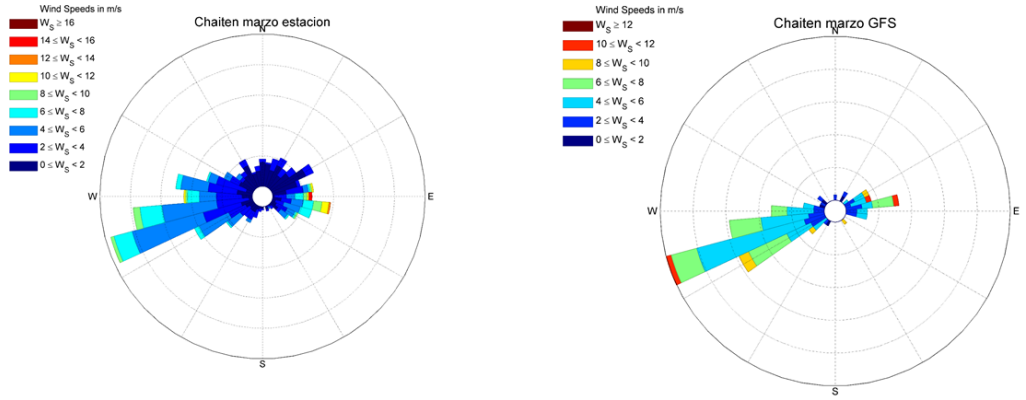


Figura 87. Rosas de viento para el mes de marzo en Chaitén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados GFS (derecha).

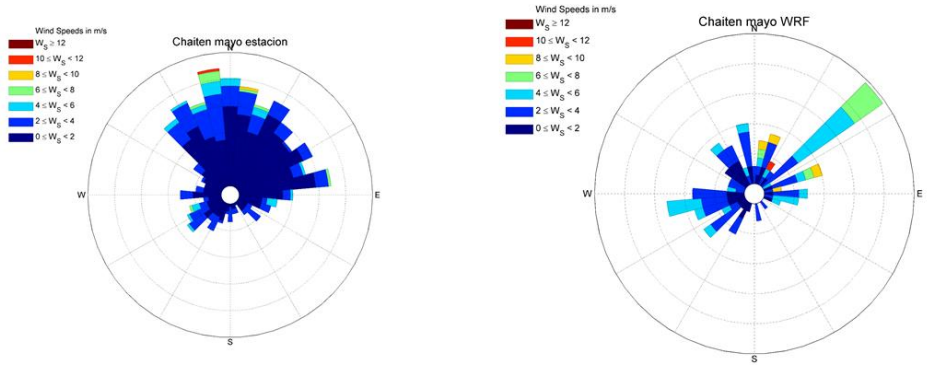


Figura 88. Rosas de viento para el mes de mayo en Chaitén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados WRF (derecha).

.

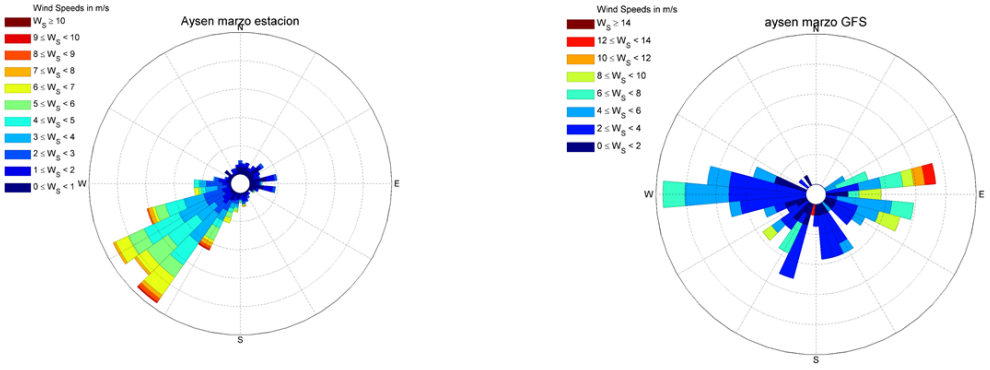


Figura 89. Rosas de viento para el mes de marzo en Puerto Aysén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados GFS (derecha).

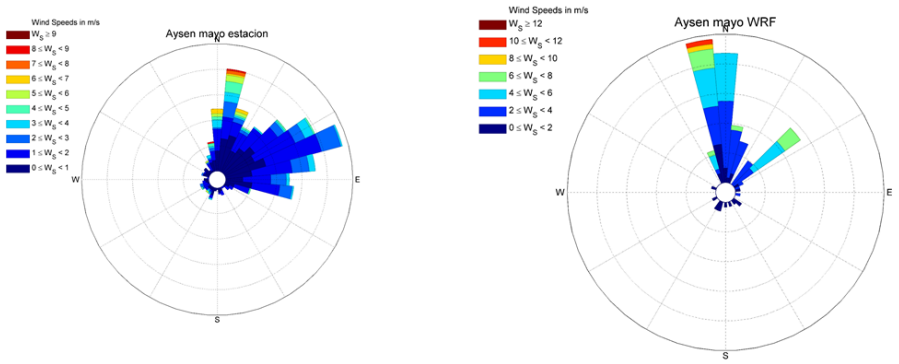


Figura 90. Rosas de viento para el mes de mayo en Puerto Aysén de datos observados (izquierda) y datos pronosticados WRF (derecha).

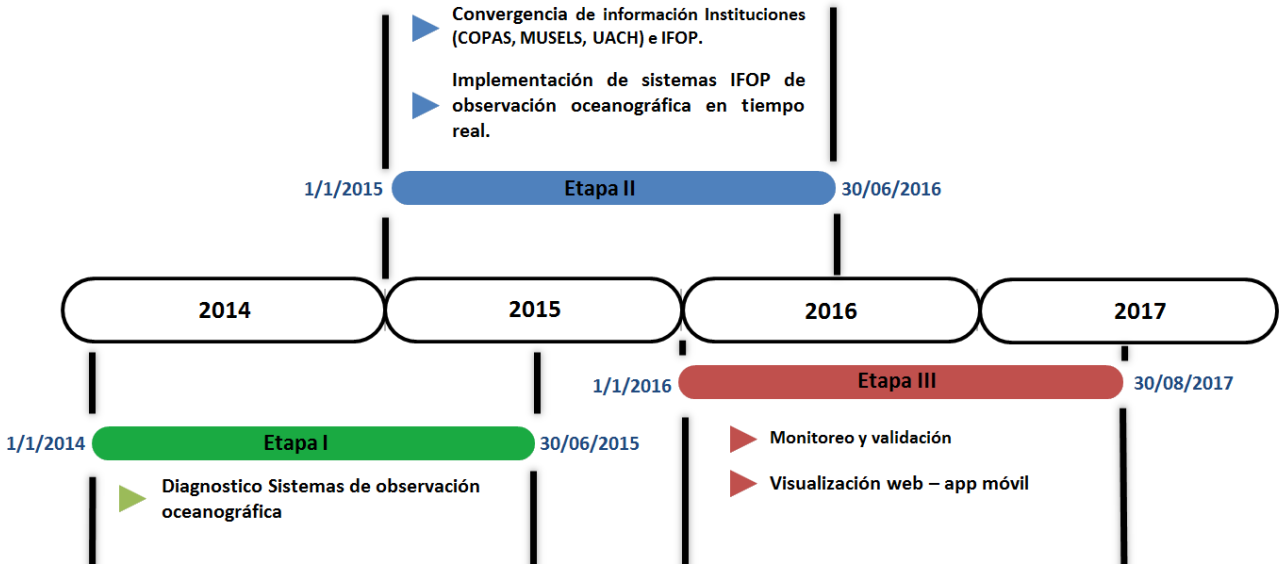


Figura 91. Cronología del desarrollo e implementación del componente observacional del sistema operacional.

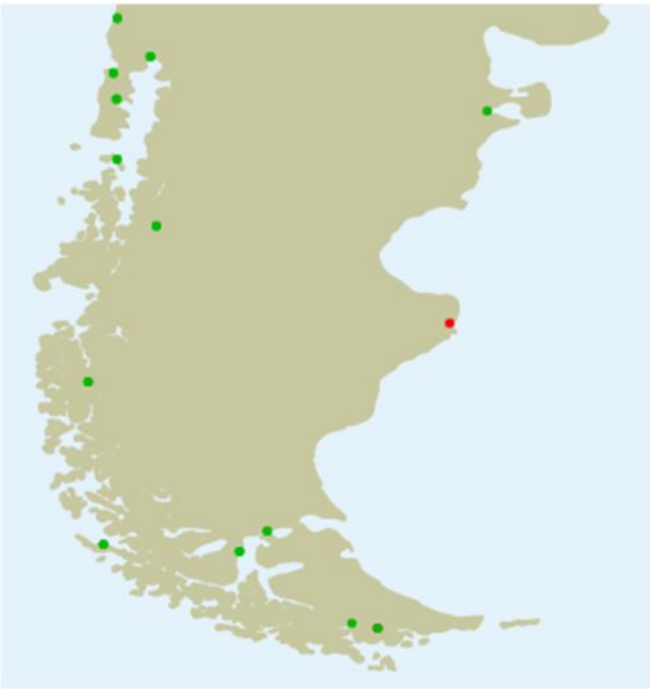


Figura 92. Red de mareógrafos que disponen información en línea a través del portal www.ioc.org presentes en el sur de Chile, los cuales son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

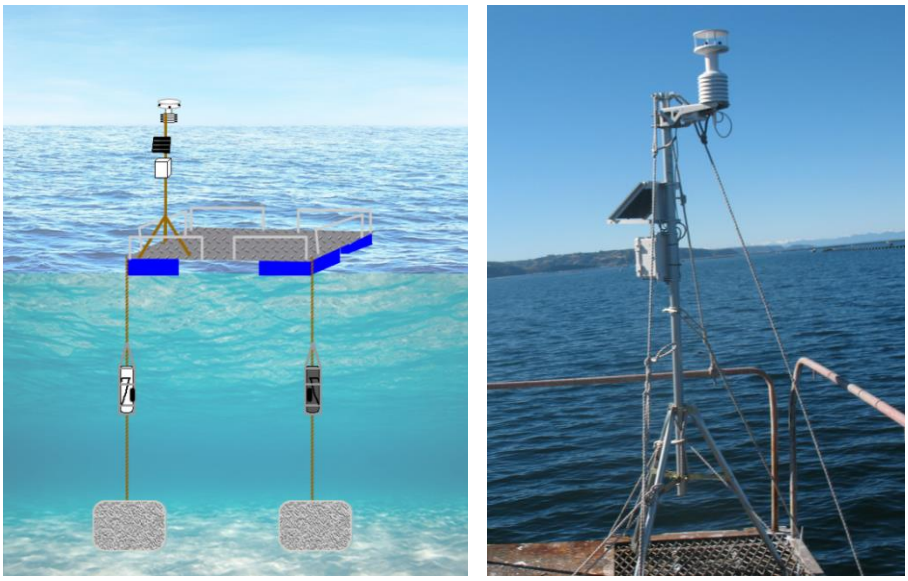


Figura 93. Esquema de plataforma de observación de Musels con equipos marinos (INW y WQM) a 4 m. de profundidad. A la derecha se observa la estación meteorológica instalada en estas plataformas.

Figura 94. Visualización en plataforma web Hobolink de equipos instalados durante las pruebas.

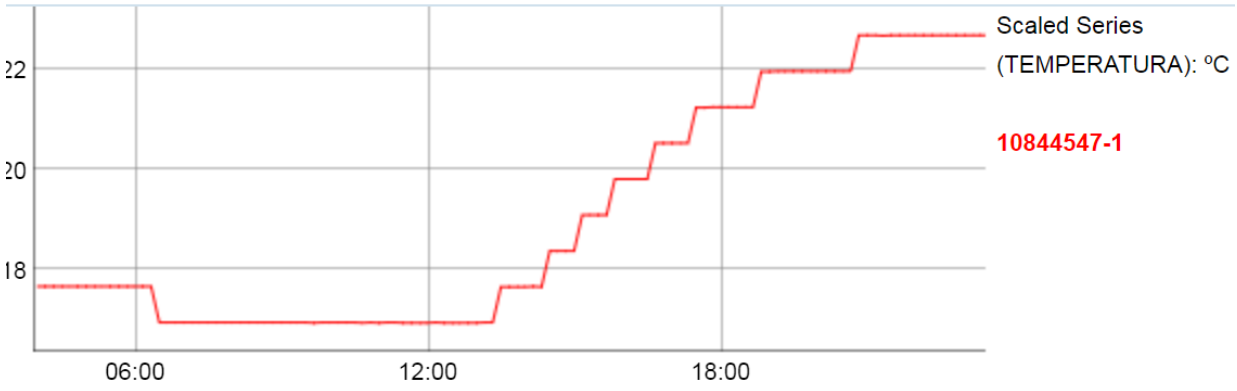


Figura 95. Error en la lectura de temperatura del aire con saltos escalonados.

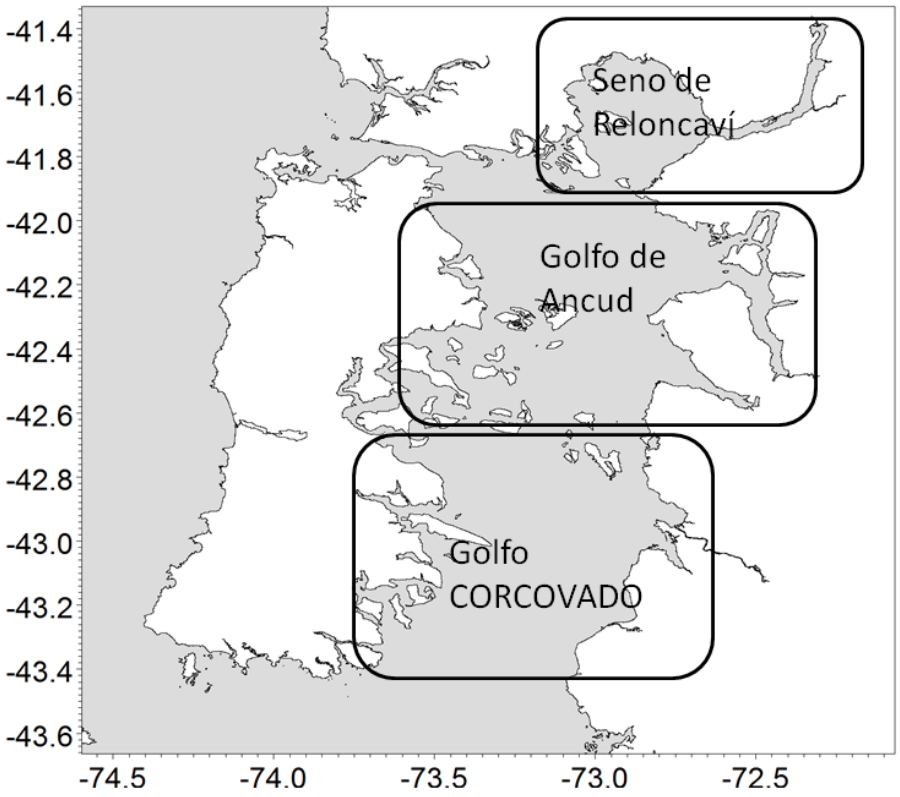


Figura 96. Zonas identificadas para ubicación de plataformas de observación.

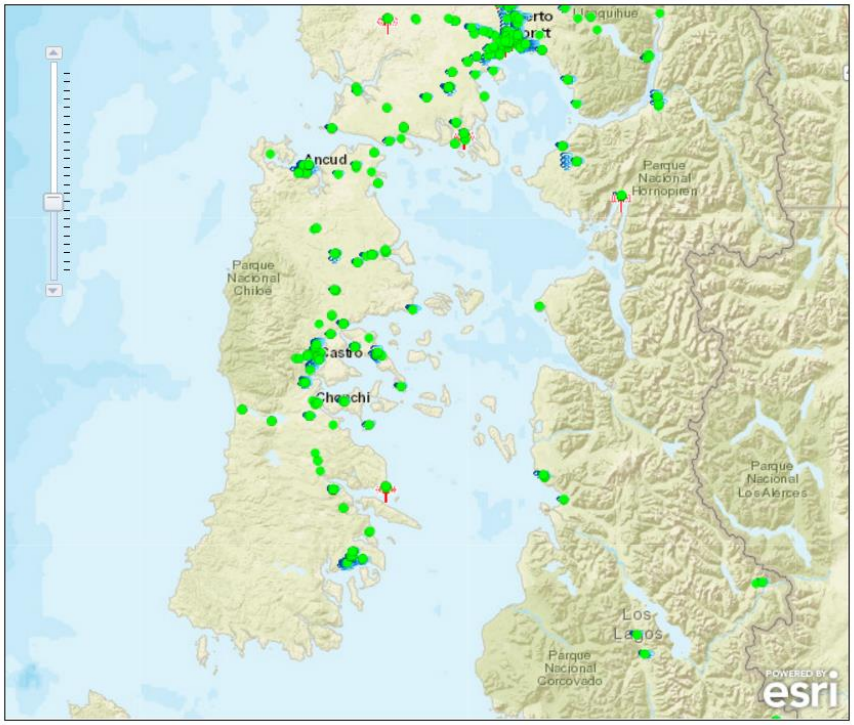


Figura 97. Torres de telefonía celular en el mar interior de Chiloé. Fuente: http://antenas.subtel.cl

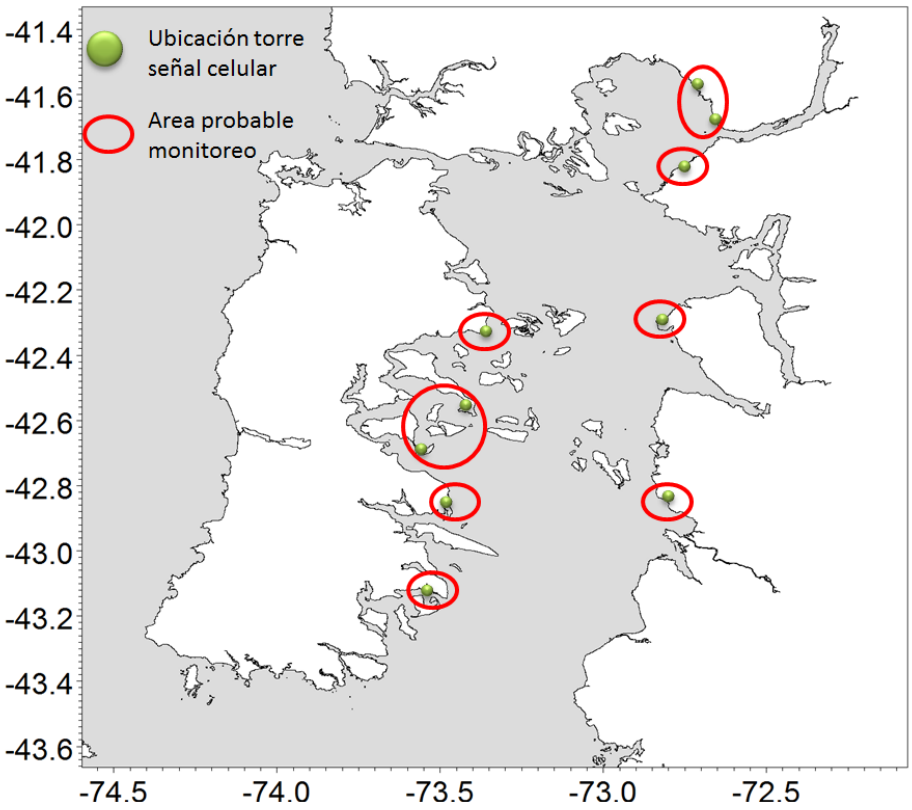


Figura 98. Ubicación de probables zonas para instalación de plataformas de monitoreo.

TABLAS

Tabla 1. Parámetros básicos del dominio de Chiloé-Aysén

Parámetros	valor	descripción
L	503	Número de puntos en dirección de longitud
M	601	Número de puntos en dirección de latitud
N	32	Numero de niveles sigma
hmax	500m	Máxima profundidad del dominio
hmin	10m	Mínima profundidad del dominio
θs	6	Factor de extensión de coordenada sigma
θb	0	Factor de extensión de fondo de coordenada sigma
Δt	720s	Paso de tiempo baroclínico
Δtf	60s	Paso de tiempo barotrópico
Γ	$3.0\ 10^{-4} m\ s^{-1}$	Coeficiente de arrastre de fondo

Tabla 2. Parámetros básicos del dominio de Magallanes

Parámetros	Valor	descripción
L	854	Número de puntos en dirección de longitud
M	1014	Número de puntos en dirección de latitud
N	32	Numero de niveles sigma
hmax	500m	Máxima profundidad del dominio
hmin	10m	Mínima profundidad del dominio
θs	6	Factor de extensión de coordenada sigma
θb	0	Factor de extensión de fondo de coordenada sigma
Δt	720s	Paso de tiempo baroclínico
Δtf	60s	Paso de tiempo barotrópico
Γ	$3.0\ 10^{-4} ms^{-1}$	Coeficiente de arrastre de fondo

Tabla 3. Tiempos de cálculo con distintas configuraciones de paralelización con el dominio de Chiloé-Aysén y Magallanes con el objeto de buscar la configuración más eficiente en cuanto a tiempo de cómputo.

Dominio	Fecha	nodos	núcleos	total	Inicio(CLT)	Fin(CLT)	Total
Chiloé	01-06-2015	4	12	48	19:22	1:37	6h
Chiloé	03-06-2015	2	12	24	19:17	5:37	9h20m
Chiloé	04-06-2015	1	12	12	22:35	16:26	17h51m
Chiloé	08-06-2015	2	12	24	17:52	6:15	12h23m
Chiloé	09-06-2015	2	12	24	13:54	19:15	5h21m
Chiloé	10-06-2015	2	12	24	21:34	1:28	3h54m
Chiloé	15-06-2015	2	12	24	20:36	1:24	4h48m
Chiloé	15-06-2015	2	12	24	13:34	16:58	3h24m
Chiloé	15-06-2015	2	12	24	12:49	16:12	3h243
Magallanes	08-06-2015	2	12	24	19:20	11:56	16h36m
Magallanes	10-08-2015	2	12	24	21:37	6:37	9h20m
Magallanes	11-06-2015	2	12	24	14:38	1:38	11h

Tabla 4. Posiciones de los mareógrafos utilizados en la evaluación del nivel del mar en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	Latitud	Longitud
Puerto Montt	-41.48	-72.96
Ancud	-41.87	-73.83
Castro	-42.48	-73.76
Melinka	-43.89	-73.74

Tabla 5. Porcentaje de energía potencial **(PE)** de los constituyentes semi-diurno M2 y S2 del nivel de mar observado y pronosticado en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	Observado		Simulado	
	M2	S2	M2	S2
Puerto Montt	72.57	20.18	82.18	13.88
Ancud	72.45	15.82	62.06	8.12
Castro	73.16	19.22	82.23	13.3
Melinka	72.9	15.59	80.56	10.18

Tabla 6. Valores de correlación (R %), error cuadrático medio (RMS), error medio absoluto (MAE) y desviación estándar (BIAS) entre el nivel del mar observado y pronosticado en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

.

Lugar	R (%)	RMS (m)	MAE (m)	BIAS (m)
Puerto Montt	0.8981	1.04	0.83	0.02
Ancud	0.7951	0.34	0.25	0.03
Castro	0.9185	0.74	0.59	0.01
Melinka	0.8887	0.31	0.23	-0.03

Tabla 7. Valores de correlación (R %), error cuadrático medio (RMS), error medio absoluto (MAE) y desviación estándar (BIAS) de la constituyente **M2** en la series observada y pronosticada en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	R (%)	RMS (m)	MAE (m)	BIAS (m)
Puerto Montt	0.99	0.72	0.64	0.02
Ancud	0.99	0.17	0.15	0.02
Castro	0.98	0.5	0.44	-0.02
Melinka	0.95	0.19	0.15	-0.04

Tabla 8. Posiciones de estaciones de CTD utilizadas en la evaluación del campo de masa en el dominio de Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	Latitud	Longitud
Ninualac	-45.02	-74.1
Bynon	-44.76	-74.04
King	-44.58	-74.07
Puyuhuapi	-44.66	-72.73
Jacaf	-44.42	-72.81
Moraleda	-44.15	-73.35
Corcovado	-43.44	-73.45

Tabla 9. Características de los sistemas de monitoreo oceanográfico disponible en el sur de Chile.

Ubicación	Variables oceanográficas / Frecuencia y profundidad	Variable atmosférica / Frecuencia	Almacenamiento/ Transmisión/ Publicación	Institución
Fiordo Puyuhuapi -44.5881° -72.7271°	Sonda multiparamétrica YSI 6600-V2 -Temperatura, salinidad, oxígeno y pH - Datos cada 1 hora - Prof. 1.5 m	HOBO U-30 -Temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, magnitud y dirección del viento -Datos cada 3 minutos	Almacenamiento auto contenido. Trasmisión fuera de operación. Publicación discontinuada en http://puyuhuapi.udec.cl/	Copas Sur Austral (UdeC)
Isla Chaulinec -42.6528° -73.3529°	Sensores INNOVEX -Salinidad, temperatura, oxigeno, corrientes (inclinómetro y acelerómetro) y nitrato. -Datos cada 15 minutos - Superficie	NO	Almacenamiento auto contenido y trasmisión vía GSM. Acceso privado desde http://desarrollo.innovex.cl/boya/meteo/	Instituto Tecnológico de la Mitilicultura (Intemit)
Canal Lemuy -42.6033° -73.7766° **Dalcahue** -42.3713° -73.5886°	(WQM) Wetlabs. Temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila, turbidez. - Datos cada 1 hora - Superficie	NO	Almacenamiento auto contenido.	Núcleo Milenio Musels
Punta arenas (Cabo Negro) -52.9307° -70.7943°	- Corrientes (ADCP Nortek) - Temperatura	NO	Almacenamiento auto contenido. Trasmisión de datos vía GSM. Acceso privado http://smtr.enap.cl	ENAP, Punta Arenas

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