

INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2019: Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la región de Los Lagos y región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / noviembre 2020

INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2019: Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la región de Los Lagos y región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / noviembre 2020

REQUIRENTE

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

> Subsecretaria de Economía y Empresas de Menor Tamaño Esteban Carrasco Zambrano

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Director Ejecutivo Luis Parot Donoso

Jefe División Investigación en Acuicultura Leonardo Guzmán Méndez

JEFE PROYECTO

Elías Pinilla Matamala

AUTOR

Elías Pinilla Matamala

COLABORADORES

Gabriel Soto Soto Camila Soto Riquelme Oliver Venegas Mella Patricio Salas Salas Javier Cortés Puebla Manuel Moya Vega Miguel Vergara Barría

RESUMEN EJECUTIVO

Las escalas temporales de transporte, tales como: la edad del agua o el tiempo de residencia, proporcionan una visión de los procesos de transporte advectivo y difusivo pudiendo ser usado para estimar la variabilidad en la distribución de importantes propiedades que son críticas para los ecosistemas marinos, tales como: temperatura, salinidad, clorofila, nutrientes u oxígeno disuelto, transformando a este tipo de métricas, en instrumentos de gran utilidad para la gestión marina.

Este estudio busca determinar los tiempos de recambio de agua para la región interior de Los Lagos y Aysén a través de modelación numérica. Los objetivos específicos involucran: 1) la implementación de modelos hidrodinámicos de escala interanual, 2) modelo de trazadores para determinar la edad de las aguas, 3) el desarrollo de un modelo simple y semiempírico de oxígeno disuelto y 4) el despliegue de toda la información generada en la plataforma CHONOS de IFOP.

Se describe la implementación y resultados de calibración de los dominios de alta resolución centrados en el mar interior de la región de Los Lagos (R1-Chiloé) y Aysén (R2-Aysén), actividades pertenecientes al primer objetivo de este proyecto. Para esto se utilizó el modelo hidrodinámico MIKE 3D FM. Los dominios de ambos se basan en la compilación de información batimétrica de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), la descarga de los ríos proviene del modelo hidrológico VIC-IFOP, con información de caudales diarios, mientras que el forzamiento atmosférico proviene de la implementación del modelo WRF-IFOP de 3 Km de resolución espacial. El modelo R1-Chiloé cubre el periodo de 2016-2018, mientras que R2-Aysén lo hace entre 2017-2018.

Las calibraciones de los modelos hidrodinámicos R1-Chiloé y R2-Aysén utilizados para este estudio, entregaron un buen ajuste respecto de diversos parámetros físicos medidos, capturando la variabilidad espacial y temporal de estos sistemas estuarinos. El modelo atmosférico WRF, presentó buen acuerdo con respecto a las observaciones otorgando un adecuado ajuste al patrón local de viento otorgado por la compleja topografía de los canales y fiordos de la Patagonia norte.

El patrón de circulación superficial (hasta 50 m) en el mar de Chiloé (2016-2018) muestra una corriente hacia el sur, bien definida e intensa (10-20 cm s⁻¹) que se prolonga por el costado continental, desde el seno de Reloncaví hasta la parte sur del golfo Corcovado, esta se divide en dos ramas a la altura de las islas Desertores intensificándose en los pasos de Apiao y Desertores, continuando su recorrido por la zona costera continental del golfo Corcovado, parte de la estructura de esta intensa corriente fue observada, tanto en el ADCP, como el modelo cercano al paso Desertores. Por otra parte, en la parte sur de la isla Chiloé, se observa una corriente hacia el norte que comunica desde isla San Pedro hasta isla Tranqui.

La circulación media en la región de Aysén (2017-2018) entre 0-50 m presentó, en general, corrientes medias menos energéticas que en Chiloé. El sector sur de la región, desde el estero Elefantes y pasando por el canal Costa, es comunicado a través de una corriente hacia el norte de alrededor de 10 cm s⁻¹ y que se intensifica en la constricción de Meninea conectando con el límite norte del archipiélago de Chonos (Melinka) a través del sector oeste del canal Moraleda. El canal Moraleda por su parte, presenta por el lado este, un flujo hacia el sur con un remolino ciclónico hacia la mitad del canal.

La edad del agua en el mar interior de Chiloé, modelada para el periodo 2016-2018, muestra espacialmente a las islas Desertores como el límite más importante entre condiciones de edad de aguas relativamente menores, al sur de Desertores y aguas de edad mayores, al norte de estas. Las aguas más densas que penetran por el paso Desertores permiten renovar los grandes golfos y fiordos a norte de islas Desertores, las entradas de ríos tienen un impacto menor en la renovación de estas regiones.

La influencia de las condiciones hidrográficas y atmosféricas en los tiempos de intercambio de agua parecen relevantes. El año 2016, se presentó en la zona sur de Chile, un año muy seco, originado por un fuerte evento de El Niño y la fase positiva del Modo Anular del Sur. La descarga de ríos se redujo casi a la mitad de su condición promedio anual, la menor disponibilidad de agua dulce inhibió la estratificación y a la vez, el flujo estuarino superficial se debilitó, esto también redujo el flujo de aguas más densas oceánicas que penetran por el paso Desertores, lo que limitó la renovación de las cuencas al norte de esta.

La edad del agua en la región de Aysén muestra a la constricción de Meninea como un límite similar al descrito en islas Desertores. Las aguas de origen oceánico que penetran por el canal Moraleda registran edades menores al resto de la región, los valores promedio mayores se encontraron en la cuenca sur de la región de Aysén, especialmente en la Laguna San Rafael y el fiordo Cupquelán.

Se implementó un modelo simple de oxígeno disuelto en R2-Aysén. Los resultados muestran consistencia entre los patrones espaciales de OD modelados y las observaciones obtenidas por Cimar-7, o sea, mayores valores se encuentran en la capa superficial y en las cercanías de los grandes ríos. En las capas profundas, valores hipóxicos son revelados en el fiordo Puyuhuapi y fiordo Quitralco, mientras que, contenidos relativamente altos de OD son encontrados en las cercanías de Campo de Hielo Norte, esto es, Laguna San Rafael, fiordo Cupquelán y estero Elefantes. El modelo muestra al fiordo Quitralco como el segundo fiordo con menos niveles de OD de la región, sin embargo, observaciones de OD en el fiordo Quitralco del programa CIMAR-FIORDOS nunca detectaron aguas hipóxicas, esto contrasta con nuevos datos registrados por IFOP en fiordo Quitralco, específicamente en su cabeza, donde valores inferiores a 1 mL L-1 fueron obtenidos bajo los 200 m.

El modelo de OD tiene parámetros muy simples, entre sus limitaciones, no simula la dinámica de fitoplancton ni los nutrientes, aun así, logra resultados aceptables, lo que indicaría que el componente físico (transporte y mezcla) es muy importante en la dinámica del OD en la Patagonia norte. El control físico sobre el oxígeno disuelto ha sido descrito en estuarios en otros lugares del mundo como un importante mecanismo en la variabilidad del oxígeno disuelto.

INDICE GENERAL

| RESU ÍNDIO | JMEN EJECUTIVOi CE GENERALiii |
|---------------|---|
| 1. | ANTECEDENTES1 |
| 2. | OBJETIVOS72.1Objetivo general72.2Objetivos específicos7 |
| 3. | METODOLOGÍA8 |
| 3.1 | Objetivo específico 2.2.1 |
| 3.2 | Objetivo específico 2.2.2 15 |
| 3.3 | Objetivo específico 2.2.3 16 |
| 3.3 | Objetivo específico 2.2.4 |
| 4. | RESULTADOS19 |
| | 4.1Objetivo específico 2.2.1 |
| 5. | DISCUSIÓN49 |
| 6. | CONCLUSIONES |
| 7. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS |

1. ANTECEDENTES

1.1 Escalas de transporte temporal

Los océanos exhiben ecosistemas altamente diversos y variables que son gobernados por complicados conjuntos de interacciones físico-biogeoquímicas entre la atmósfera, la superficie del océano y su interior, en una variedad de escalas espaciales y temporales (Gregoire, 2003). Las escalas temporales de transporte, en general, proporcionan una visión de los procesos de transporte advectivo y difusivo pudiendo ser usado para estimar la variabilidad en la distribución de importantes propiedades que son críticas para los ecosistemas marinos y el clima tales como temperatura, salinidad, clorofila, macro y micronutrientes, O2 y CO2 disueltos (Sandery, 2007). Por ejemplo, la producción biológica marina es modificada mediante procesos físicos como la mezcla y arrastre de nutrientes desde abajo, penetración de luz, confinamiento de fitoplancton en la zona eufótica por estratificación y aporte de nutrientes por descargas de ríos (Gregoire, 2003). De hecho, se ha sugerido que el tiempo de retención es un parámetro clave en el control del balance de nutrientes en los ecosistemas marinos (Boynton et al., 1995).

Las características de los procesos de transporte de una sustancia disuelta dependen principalmente del flujo residual de baja frecuencia que depende de las interacciones entre el campo de densidad, el flujo del río, el viento y la rectificación no lineal de las mareas periódicas en un estuario dado (Shen, 2007). Por lo tanto, es difícil separar y cuantificar las influencias de diferentes mecanismos en el transporte a largo plazo. Para entender la dinámica subyacente que contribuye en las propiedades de transporte de un estuario, se han utilizado escalas de tiempo de transporte, tales como "flushing time", tiempo de residencia o la edad del agua para cuantificar las condiciones dinámicas generales de un sistema marino. Existen muchos estudios en que se han utilizado estas escalas temporales de transporte para trazar la masa de agua y estimar ventilación en el océano (England, 1995; Karstensen y Tomczak, 1998; Hirst, 1999; Deleersnijder et al., 2002) o para investigar la circulación en sistemas marinos semi-cerrados, estuarios o fiordos (Oliviera y Baptista, 1997, Walker, 1999, Delhez y Deleersnijder, 2002, Monsen et al., 2002; Sandery, 2007; Gustafsson, 2007; Zhang et al 2010, Kawase y Bang 2013; Hong y Shen 2013; Bendtsen et al. 2014; Viero y Defina 2016).

En estricto rigor, sólo dos escalas de tiempo son suficientes para trazar el movimiento del agua, estos son, la edad del agua y el tiempo de residencia. Zimmerman (1976) introdujo el concepto de "tiempo de residencia" como el tiempo que tarda una parcela de agua en abandonar el dominio de interés, mientras que la edad del agua es un complemento del tiempo de residencia y es definido como el tiempo transcurrido desde que la parcela de agua en consideración salió de la región en la que su edad se define como cero, o bien, el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua. (Bolin and Rodhe, 1973; Delhez

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

et al., 1999; Monsen et al., 2002). La colocación de los límites para definir una región de interés es una elección arbitraria, e influirá en los valores absolutos de las escalas de tiempo. Hasta cierto punto, las distribuciones de escala temporal en el sistema son relativas por naturaleza, por consecuencia los patrones similares serán vistos sin importar la localización del límite (Sandery, 2007).

En la mayoría de los casos, no es posible estimar estas escalas de tiempo de manera exhaustiva mediante promedios de datos de campo. La ausencia de mediciones intensivas de temperatura y salinidad hacen dificultoso el cálculo de la mezcla vertical vía estos parámetros. Por otra parte, la evaluación del tiempo de descarga o "flushing time" como la razón entre el volumen del dominio de interés y un flujo saliente es una aproximación gruesa que es válida sólo para un flujo en estado estacionario en un dominio infinitamente bien mezclado (Deleersnijder, 2007). Así el enfoque de un sistema en estado estacionario no toma en cuenta las variaciones espaciales y temporales en un gran estuario, por tanto, es deseable conocer el patrón de distribución espacial del tiempo de residencia y su variación temporal (Shen, 2007). Por otra parte, las técnicas que implican modelos numéricos, tienen la ventaja de proporcionar una visión cuantitativa directa de la dinámica y funcionamiento del sistema marino (Delhez et al., 2004). Esto resulta muy valioso en un medio ambiente interdisciplinario o en una perspectiva de gestión (Deleersnijder, 2007).

Los métodos mediante los cuales es posible calcular las escalas de tiempo en un modelo numérico pueden estar centrados desde una óptica lagrangiana o bien euleriana. Los modelos de transporte eulerianos son usualmente preferidos a sus homólogos lagrangianos (Deleersnijder, 2001). La necesidad de un gran número de partículas lagrangianas para producir mapas sinópticos y su consecuente alta demanda de tiempo de cómputo, como también, los problemas asociados con la modelación de la turbulencia en condiciones no homogéneas (Hunter et. al., 1993; Visser, 1997; Deleersnijder, 2001). En cambio, un enfoque euleriano permite que las masas de agua que interactúan sean modificadas por procesos advectivos y difusivos, (Delhez, 1999). Esto a su vez permite que la estimación del tiempo de transporte se presente como una variable espacial y revele información detallada del tiempo de tránsito en un estuario complejo (Shen, 2007).

1.2 Oceanografía en la Patagonia de Chile

Debido a que no existía un gran desarrollo de la información sobre estudios ambientales en los canales y fiordos australes, el comité oceanográfico nacional CONA, elaboró el año 1994 un programa denominado crucero CIMAR, para efectuar una seria de cruceros oceanográficos, con la finalidad de cubrir esta extensa área, siendo los 3 primeros de carácter exploratorio. Posteriormente sobre la base de estos cruceros, se realizó un número significativo de cruceros, con la finalidad de determinar y documentar procesos oceanográficos relevantes, considerando que en muchas de estas áreas existe un fuerte desarrollo productivo acuícola (Silva & Palma 2006). Esto permitió generar una base de datos

²

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

y un conjunto de publicaciones científicas, además de generar líneas base de investigación para estas zonas. Dentro de los resultados destacables, se logró establecer patrones y procesos oceanográficos, identificándose y caracterizando las principales masas de agua presentes, no solo en la zona oceánica, sino que también los cuerpos de agua que se forman dentro de la zona de canales y fiordos, diseñando algunos esquemas de circulación. Las propiedades físicas (e.g), de los cuerpos de agua localizados dentro de estos sistemas está en gran medida determinada por las tipologías de las masas de agua adyacentes (aguas oceánicas) y la mezcla que experimenta esta masa de agua con el agua dulce (aporte fluvial, nival, glacial y pluvial), siendo esta mezcla proporcional a la distancia de la fuente de agua dulce (Carrasco & Silva 2010).

Las condiciones oceanográficas, producto de la interacción de agua oceánica y agua dulce, revela la presencia de una columna de agua estratificada, constituida en 2 capas: una superficial de profundidad variada, determinada por menor salinidad, menor densidad y mayor concentración de oxígeno disuelto, siendo esta capa superficial la que presenta mayor variabilidad espacial y temporal. Mientras que la segunda capa, es de mayor salinidad y densidad, menos concentración de oxígeno. Entre ambas capas se observa un intenso gradiente conformando una marcada haloclina, picnoclina, oxiclina y nutriclina, esta estructura ha sido utilizada como trazador para realizar modelos esquemáticos de circulación horizontal, donde el agua dulce sale de los fiordos y canales (capa superficial), mezclándose en diferentes grados con el agua oceánica que ingresa en dirección opuesta (capa profunda), Silva *et al.*, (1997 1998); Sievers *et al.*, 2002; Valdenegro & Silva, 2003). De esta forma, desde la hidrodinámica, este transporte de agua dulce genera la llamada circulación gravitacional, o comúnmente denominada circulación estuarina y sus principales rasgos estarán definidos por la combinación entre la circulación y el gradiente salino, definiéndose básicamente con un flujo medio por diferencias de densidad.

En estas condiciones geográficas y oceanográficas se ha desarrollado la acuicultura en la zona sur Austral de Chile, centrada básicamente en Salmónidos, llevando a Chile a ser uno de los principales productores a nivel mundial, por lo que esta actividad ha sido considerada de gran importancia en la dinámica económica del país (Buschman *et al.*, 2009). No obstante, el desarrollo de la acuicultura no ha estado exento de problemas, a partir del 2007, la industria salmonicultora experimentó una fuerte crisis producto de problemas sanitarios relacionados con el virus ISA, lo que también trajo como consecuencia grandes pérdidas económicas, bajo estos antecedentes, la gestión de la acuicultura y su regulación por parte del estado de Chile se proyectaron como una actividad de alta complejidad (Bustos, 2012), ya que por una parte se debe promover el máximo nivel posible de crecimiento económico en el tiempo, pero en un marco de sustentabilidad ambiental. Si bien a partir del año 1991 se elaboran cambios en la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA) enfocados en acuicultura, solo en 2003 se comienza a incluir los conceptos de sustentabilidad ambiental, mediante la Política Nacional de la Acuicultura (PNA) estableciendo un marco regulatorio para esta actividad. Sin embargo, debido a la insuficiencia de este marco regulatorio, evidenciado tras la crisis del salmón producto del

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Virus ISA, es que actualmente, LA LGPA establece un marco de obtención de información científica en los cuales se debe sostener las decisiones de carácter público y sobre la base de esta información deberán ser desarrolladas los instrumentos de ordenamiento territorial, donde no solo estaría contenida la salmonicultura, sino todo los usuarios que ejerzan alguna actividad dentro del borde costero.

1.3 Consideración de la hidrodinámica y las tasas de intercambio de agua en la acuicultura costera

FAO en 2010, elaboró un extenso documento donde indicó casos de estudios y una serie de directrices, que deben ser considerados para el desarrollo de la acuicultura en términos sostenibles. Valle-Levinson (2010) describió los forzantes principales en los sistemas sujetos a circulación gravitacional y como estos deben ser identificados, medidos y considerados, dentro de la actividad acuícola, ya que estos forzantes y los procesos que los gobiernan, deben ser considerados para un ordenamiento en la gestión territorial y para el ordenamiento de la acuicultura, considerando que esta actividad debe ser desarrollada como una actividad económica y ambientalmente sostenible.

Si bien, la estructura básica del esquema de circulación gravitacional, es un rasgo distintivo dentro del sistema de fiordo y canales, como es el caso de la Patagonia Chilena, la dinámica de estos flujos no está solo determinada por los gradientes de densidad, producto del intercambio de aguadulce y agua salada. Sino que también, está determinada y modificada por otros forzantes, que pueden actuar de manera unitaria o en conjunto, generando complejos patrones de circulación. A continuación, se señalan los principales alcances detallados por el autor anteriormente señalado:

Influencia de la marea, este forzante puede modificar la circulación de acuerdo con las diferentes fases del ciclo mareal, generando por ejemplo flujos de mayor intensidad, debido a los cambios en el grado de mezcla vertical (diferencias entre sicigia y cuadratura), modificando de esta manera los campos de masa (temperatura, salinidad, densidad).

Efecto de batimetría, la geomorfología sub-marina del lugar puede tener un marcado efecto en los diferentes flujos, que se producen por la circulación gravitacional, así una conformación tipo V, generará diferentes tipos de cizalles laterales generando flujos laterales, mientras que conformaciones más explanadas a lo largo del canal en forma de U facilitan la circulación gravitacional, ya que los flujos tienden a darse de manera horizontal.

Patrones de viento, la dirección e intensidad del viento, puede tener un rol significativo en la circulación, ya que por ejemplo un viento en contra de la circulación superficial (flujo de agua

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO

dulce/salobre), disminuirá la velocidad de éste (aumentando el tiempo de residencia del agua), ejerciendo una mezcla más intensa y cambiando la profundidad de la estratificación.

Balance de agua, el forzante principal en la circulación gravitacional es el agua dulce, dado que los aportes de agua dulce mantienen el balance de masas en sistemas estuarinos y de fiordos, como es la zona austral de Chile, tienen una marcada influencia en la estabilidad de la columna de agua por gradientes de densidad.

Debido a las brechas de conocimiento que aún existen en estos sistemas, la identificación de los diferentes forzantes y sus grados de influencia sobre los patrones de circulación, se ha vuelto un proceso clave, para desarrollar y focalizar estudios que permitan formular una línea base suficientemente robusta sobre la cual establecer los marcos regulatorios ambientales (e.g) zonificar, ordenar la instalación y/o selección de sitios aptos para la acuicultura.

El estudio de la conectividad de un sistema a partir de la variabilidad climatológica ambiental. entendiendo por tal la variabilidad estacional intra-anual de dicho sistema, permite establecer cuál es la zonificación y compartimentación más adecuada en función de la hidrodinámica local, para en última instancia determinar cuál sería el emplazamiento de los centros de cultivo salmonícola que minimizara las probabilidades de arribo y dispersión de partículas entre dichos centros. La conectividad es determinada a partir de los campos de corrientes que transportan masas de aqua y las partículas contenidas en ella en suspensión, dilución o flotación. Dado que la conectividad implica el desplazamiento de masas de aqua entre dos puntos (o parcelas de aqua), cuanto más reducida sea el área sobre el cual se calculará la conectividad más pérdida de información tendremos, pues el intercambio de masas y partículas está confinado a los límites de dicha área. Por ello si bien se puede estimar la conectividad en áreas pequeñas a partir de mediciones de los campos de corrientes, para la estimación de la conectividad en grandes superficies (miles de km²) la medición en terreno de tales campos de corrientes es una tarea que demandaría de enormes recursos económicos y humanos que harían que esta tarea fuera prácticamente irrealizable. La modelación numérica, partiendo del principio de que proporciona una línea base bien definida contra la cual comparar las observaciones empíricas. y así los modelos apropiados pueden proporcionar hipótesis comprobables y dar una idea de los aspectos específicos de los procesos biológicos o hidrodinámicas en el mundo real (Adams et al., 2012), son la solución a la limitación antes planteada. Además, a través de la modelación numérica podemos modular ad hoc las condiciones ambientales a fin de dar representación a la variabilidad climatológica ambiental, lo cual no puede ser garantizado cuando se realizan mediciones en terreno.

El mar interior de Chiloé es ampliamente utilizado en actividades acuícolas, principalmente en el cultivo de salmones y de bivalvos. Tanto los efectos ambientales como el rendimiento productivo de estas industrias pueden ser sostenibles si la renovación de agua es suficiente, ya que el seston y el oxígeno deben suministrarse continuamente a los bivalvos y el exceso de materia orgánica debe eliminarse de

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

los sitios de cultivo (Boghen 1995). La renovación del agua depende de factores hidrodinámicos y, más específicamente, de la mezcla asociada a las mareas, el forzamiento meteorológico, la circulación gravitacional y el forzamiento remoto. Es importante comprender el funcionamiento hidrodinámico y el potencial de renovación de un sistema costero antes de seleccionar un sitio para el desarrollo de una industria acuícola (Koutitonsky, 2004).

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar las escalas de tiempo del intercambio de agua en los fiordos y canales de la Patagonia norte.

2.2. Objetivos específicos

- **2.2.1** Modelar hidrodinámicamente la variabilidad interanual del sistema de fiordos y canales de la región de Los Lagos y Aysén.
- **2.2.2** Calcular las escalas de intercambio de agua mediante un modelo de trazadores acoplados al modelo hidrodinámico.
- **2.2.3** Implementar un modelo simple y semi-empírico de la dinámica de oxígeno disuelto y establecer relaciones con el intercambio de agua.
- **2.2.4** Generar mapas de tiempos de intercambio de agua montados en una plataforma de información geográfica.

3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo específico 2.2.1 Modelar hidrodinámicamente la variabilidad interanual del sistema de fiordos y canales de la región de Los Lagos y Aysén.

3.1.1 Campañas de medición parámetros oceanográficos

Con el fin de calibrar el modelo atmosférico e hidrodinámico, se han realizado muestreos en distintos puntos de los mares interiores de la región de Lagos y Aysén. A continuación, en la **Tabla 1**, se describen los lugares y tipo de medición realizada.

| Variable | Instrumento | Periodo | Posición |
|--------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|
| Series de | ADCP RDI 300 kHz | 09/09/2017 13/04/2018 | -73.266°, -42.902° |
| comentes | | | Isla Tranqui |
| | ADCP RDI 300 kHz | 07/07/2017 10/11/2017 | 72.875°, -42.722° |
| | | | Paso Desertores - |
| | ADCP RDI 300 kHz | 08/08/2018 10/03/2019 | Canal Moraleda |
| | | | -73.497°, -44.611° |
| | ADCP ROWE 300 kHz | 23/08/2018 15/03/2019 | Canal Costa |
| | | | -73.530°, -45.523° |
| | ADCP ROWE 300 kHz | 25/08/2018 17/3/2019 | fiordo Quitralco |
| | | | -73.463° , -45.754° |
| Serie tiempo | MiniDot Logger 150 m | 07/07/2017 23/03/2018 | Paso Desertores |
| Temperatura | | | -72.875°, -42.722° |
| | MiniDot Logger 150 m | 08/07/2017 22/03/2018 | Ayacara |
| | | | -72.898°, -42.325° |
| | MiniDot Logger 20 y 120 m | 08/08/2018 10/03/2019 | Canal Moraleda |
| | | | -73.497°, -44.611° |
| | MiniDot Logger 20 y 120 m | 23/08/2018 15/03/2019 | Canal Costa |
| | | | -73.530°, -45.523° |

Tabla 1: Descripción del instrumental utilizado en campaña oceanográfica

8

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

| | MiniDot Logger 15 y 110 m | 25/08/2018 17/3/2019 | fiordo Quitralco -73.463° , -45.754° |
|---|---|--|--|
| Perfiles de temperatura y salinidad | CTD SBE 19plus | Chiloé: noviembre 2017 Aysén: noviembre de 2018 | Ídem posición a anclajes de ADCP |
| Estaciones meteorológicas | EMA Hobo RX300 con anemómetro Young | Registro continuo desde junio de 2017 | Isla Apiao -73.219°, -42.594° Llaguepe -72.575°, -41.737° Melinka -73.756°, -43.886° |
| Nivel del mar | Mareógrafo SHOA | Registro continuo | Castro -73.758°, -42.479° |
| | Sensor de presión HOBO U-20, compensado con sensor de presión atmosférica. | Junio 2018 – marzo 2019 | f. Puyuhuapi -73.299°, -44.907° Canal Errázuriz -73.737°, -45.409° |

3.1.2 Sistema de modelación de IFOP

Para determinar el transporte y la circulación marina en los canales y fiordos de la Patagonia norte se requirió de un sistema de modelación acoplado que permitió el suministro del forzamiento atmosférico y la entrada de agua dulce a un modelo hidrodinámico (Fig. 1). A continuación, se describe cada componente:



Figura 1. Sistema de modelación que incluye los módulos hidrodinámico, atmosférico e hidrológico.

a) Modelo hidrodinámico

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Se utilizó el modelo hidrodinámico MIKE 3D FM (DHI, 2019), el cual fue implementado en dos dominios para los mares interiores de la región de Los Lagos y Aysén. MIKE 3 FM, es un sistema de modelamiento en 3 dimensiones que considera la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Navier-Stokes utilizando el enfoque de Reynolds, los supuestos de Boussinesq y de presión hidrostática, por lo que el modelo consiste en las ecuaciones de conservación de masa y de momentum, trasporte de calor y de sal considerando un esquema turbulento de cierre. Como algoritmo de solución discreta de las ecuaciones indicadas, el modelo utiliza el método de volúmenes finitos centrados en cada celda. La estructura de discretización en una malla irregular permite un buen ajuste al borde costero, por lo que se considera que este tipo de solución es la adecuada para zonas de topografía compleja. En la vertical utiliza coordenadas un número fijo de elementos (coordenadas sigma) que se adaptan a permiten seguir la topografía submarina. Para la integración temporal, se utiliza un enfoque semi-implícito donde los términos horizontales son tratados explícitamente y los verticales de manera implícita (DHI 2019).

Los dominios de los modelos de la región de los Lagos (R1-Chiloé) y Aysén (R2-Aysén) se extienden desde la zona oceánica en similar longitud de isla Guafo por el oeste, cubriendo canales y fiordos interiores en ambas regiones (Fig. 2). La información batimétrica fue obtenida de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), reprocesadas e interpoladas linealmente mediante el método del vecino natural (Sibson, 1981). Se utilizaron distintos tamaños en los elementos triangulares, de acuerdo a la geometría de la cuenca, de forma que aquellos lugares someros y estrechos tuvieran una mayor resolución. El sector de menor resolución es el más cercano al borde abierto oceánico con un tamaño aproximado de 1000 m, en algunas zonas (algunos lugares como pasos restringidos o zonas someras) la resolución puede alcanzar a los 200 m. En la dimensión vertical el modelo está dividido en 55 capas combinadas sigma-cuadrangular para la región R2-Aysén, y 40 para la región R1-Chiloé, en ambos casos, con mayor resolución en las capas superficiales. Ambos dominios ya fueron utilizados en etapas anteriores de este proyecto (Pinilla et al., 2018; Pinilla et al., 2019), lo cuales resultaron estables, pero con tiempos de simulaciones relativamente extensos, especialmente R2-Aysén, el cual requiere de 22 días de cómputo para simular 1 año, alrededor del doble de tiempo necesario que el dominio R1-Chiloé (Tabla 2).

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

| Parámetros MIKE 3 FM | R1-Chiloé | R2-Aysén |
|--|---|---|
| Resolución espacial | Variable ~200 a 1300 m | Variable ~200 a 1000 m |
| Resolución vertical | 55 capas sigma-Z superficie ~1 m, fondo ~20 m | 40 capas sigma-Z superficie ~1 m, fondo ~25 m |
| Resolución temporal | 600 s (almacena datos horarios) | 300 s (almacena datos horarios) |
| Periodo de simulación | 01-10-2015: 31-12-2018 (3 años) | 01-01-2017: 31-12-2018 (2 años) |
| Condiciones de borde | Climatología CTD -Cimar | Climatología CTD -Cimar |
| Forzante atmosférico | WRF-IFOP 3 Km | WRF-IFOP 3 Km |
| Ríos | VIC-IFOP | VIC-IFOP |
| Modelo de turbulencia | Esquema k-epsilon | Esquema k-epsilon |
| Tiempo de cómputo para simular 1 año (servidor Intel-32 núcleos) | ~12 días | ~22 días |
| Periodo de estabilización (spin up) | 3 años | 4 años |

Tabla 2: Características de implementación de modelos hidrodinámicos

Las condiciones de borde de nivel del mar, en ambos dominios fueron obtenidas mediante el análisis armónico de mareas de mediciones realizadas desde el año 2011 producto de campañas oceanográficas realizadas por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). De esta forma, se obtuvo un pronóstico para las fechas requeridas. En cuanto a los bordes de temperatura y salinidad fueron utilizadas observaciones provenientes de perfiles de CTD realizados por el programa CIMAR-Fiordos (CF-4, CF-7, CF-8, CF-9, CF-10, CF-11 y CF-12) (Guzmán y Silva 2002; Guerra y Silva 2004; Valdenegro y Silva 2008; Carrasco y Silva 2010), de esta forma se pretendió cubrir la máxima cantidad de meses a lo largo del año, de manera que fuera representativo del ciclo anual de temperatura y salinidad, los meses que no contaban con datos fueron interpolados entre valores anteriores y

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

posteriores esta condición de borde varia en el espacio y en el tiempo. Para las condiciones iniciales de temperatura y salinidad fueron utilizadas mediciones de CTD de campaña realizadas por IFOP previamente, para lo cual, se procedió a generar una interpolación horizontal y vertical para cubrir todo el dominio, luego el modelo es corrido con todos los forzantes para estabilizar las condiciones de temperatura y salinidad, este periodo de estabilización (spin up) alcanzó 3 años para el dominio R1-Chiloé y 4 años para R2-Aysén.



Figura 2: Malla desestructurada de los modelos hidrodinámicos de la región de los a) Lagos y b) Aysén. Se detallan las posiciones en donde se realizan las evaluaciones y análisis de los modelos.

b) Modelo atmosférico WRF

La circulación marina en fiordos con entornos montañosos está fuertemente influenciada por el patrón de viento local, esto requiere de modelos atmosféricos con resolución suficientemente alta para resolver los impactos de la topografía en la circulación atmosférica (Myksvoll et al., 2012). Se modelaron las condiciones atmosféricas locales utilizando el modelo no hidrostático (WRF v. 3.5.1) (Skamarock et al., 2008), anidado dentro del sistema operacional NCEP con resolución espacial de 25 km (National Centers for Environmental Prediction, 2000). Para este caso se establecieron dos

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

dominios (Fig. 3), siguiendo una relación de 1:3. El primero corresponde al padre y comprendió un área entre \sim 39 - 48°S y \sim 69 - 85°W, con resolución espacial de 9km. Y el segundo corresponde al dominio hijo, alcanzando una resolución horizontal de 3 km y abarcando un área entre \sim 41 - 47°S y \sim 71 – 76°W. Este último dominio contuvo la región de mares interiores de Chiloé y Aysén.



Figura 3. Dominios establecidos para la simulación de WRF, con resolución espacial de 9km y 3km para el dominio 1, 2 respectivamente.

b) Modelo hidrológico VIC

Los caudales de ríos que desembocan en el sistema marino han sido simulados con el modelo hidrológico VIC que es alimentado con series de precipitaciones y temperatura del producto grillado CR2MET (<u>http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/</u>) de una resolución espacial de 5 x 5 km. Con esa información, VIC simula la escorrentía en intervalos horarios mediante la cual se calculan series diarias de caudales en una red hidrográfica sintética (obtenida a partir de información satelital) para el dominio de análisis. Luego de un proceso de calibración realizada con observaciones fluviométrica de la DGA, en la cual algunos parámetros del modelo VIC se ajustan para optimizar el desempeño del

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

modelo determinado, el modelo es ejecutado para obtener estimaciones del caudal diario para el periodo 1980 a 2018, en todas las cuencas costeras del dominio espacial de la simulación. Toda la información de descargas en las cuencas marinas es desplegada en la plataforma Chonos de IFOP en <u>http://chonos.ifop.cl/aguadulce/visor</u>. El modelo VIC fue desarrollado para IFOP por la empresa consultora MeteoData Limitada. El sistema de modelación de agua dulce tiene varios componentes que se muestran en la Fig. 4 y la Tabla 3.



Figura 4. Esquema general del proceso de modelación y construcción de los productos del proyecto.

¹⁴

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

| | - |
|------------------------------|---|
| Parámetros | Variable Infiltration Capacity (VIC) |
| Resolución espacial | 0.05º (aproximadamente 5 Km) |
| Área de la simulación | Territorio Chileno entre 41ºS y 56ºS |
| Resolución temporal | Diario |
| Periodo de simulación | 1980 – 2018 |
| Datos de entrada | Base de datos CR2MET |
| Modelo terreno digital | SRTM (90 metros de resolución) |
| Modelo para red hidrográfica | TauDEM |
| Calibración y evaluación | Datos fluviométricos de la DGA (~50 estaciones) |

Tabla 3: Características sistema de modelación hidrológico

3.2 Objetivo específico 2.2.2 Calcular el intercambio de agua mediante un modelo de trazadores acoplados al modelo hidrodinámico.

3.2.1 Edad del agua

El método de la edad del agua utilizado en este estudio, forma parte de una completa teoría que ha sido desarrollada en los últimos 20 años a través de teoría de la edad y tiempo de residencia orientada a los constituyentes, CART (Delhez et al., 1999, Deleersnijder et al., 2001). Entonces, para calcular la distribución de la edad del agua, se utilizó un trazador pasivo, así las ecuaciones de transporte para calcular el trazador y la concentración de la edad se escriben de acuerdo a la ecuación 1 y 2 (Delhez et al., 1999). Aquí la edad del agua es definida como el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua, aquí el límite se refiere al borde abierto del modelo hidrodinámico, pero también a las entradas de agua dulce, entonces las cuencas interiores son renovadas por aguas oceánicas y de ríos.

$$\frac{\partial c(t,\vec{x})}{\partial t} + \nabla \left(uc(t,\vec{x}) - K \nabla c(t,\vec{x}) \right) = 0 \tag{1}$$

15

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

$$\frac{\partial \alpha(t,\vec{x})}{\partial t} + \nabla \left(u\alpha(t,\vec{x}) - K\nabla \alpha(t,\vec{x}) \right) = c(t,\vec{x})$$
(2)

Donde, c es la concentración del trazador, α es la concentración de la edad, u es el campo de velocidad, K es el tensor de difusividad, t es el tiempo y x la posición. La edad media "a" entonces puede calculada como:

$$a(t,\vec{x}) = \frac{\alpha(t,\vec{x})}{c(t,\vec{x})}$$
(3)

Sin embargo, si no hay mezcla con agua no originaria de la fuente, el único constituyente es el agua de la propia fuente y entonces la concentración de edad es casi igual a la edad media (α ~a). Luego, puede ser directamente evaluada como:

$$\frac{\partial a(t,\vec{x})}{\partial t} + \nabla \left(ua(t,\vec{x}) - K \nabla a(t,\vec{x}) \right) = 1$$
(4)

En este estudio, la edad del agua está implementada en el módulo Ecolab de MIKE 3 FM. Para los trazadores provenientes de las fuentes de agua dulce, en donde, la dilución con agua no originaria de los ríos es significativa, se utilizan las ecuaciones (1) y (3), con esto es posible calcular la concentración del trazador y la edad, aquí el trazador pasivo que ingresa por los ríos tiene una concentración de 1 y una edad de 0. Las condiciones iniciales para c y se igualan a cero.

3.3 Objetivo específico 2.2.3 Implementar un modelo simple y semi-empírico de la dinámica de oxígeno disuelto y establecer relaciones con el intercambio de agua.

Se implementó un modelo simple de oxígeno disuelto (OD) basado en el trabajo realizado por Hong y Shen (2013) en la bahía de Chesapeake, Estados Unidos. Este modelo fue acoplado al modelo hidrodinámico MIKE 3 FM en el dominio R2-Aysén y su dinámica está controlada mediante el transporte neto de OD (advección-difusión), el consumo de oxígeno biogeoquímico tanto en la columna de agua como en sedimentos y la re-aireación, que es ingreso de OD por la superficie marina en función de la intensidad del viento. Los procesos acotados involucrados en la dinámica del OD en este modelo se pueden describir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial O}{\partial t} + u \frac{\partial O}{\partial x} + v \frac{\partial O}{\partial y} + w \frac{\partial O}{\partial w} = \frac{\partial}{\partial z} A_v \frac{\partial O}{\partial z} - B_c$$
(5)
16

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Donde O es la concentración de OD en la columna de agua; u, v, w son los componentes horizontales y vertical de la corriente respectivamente; A_v es la difusividad turbulenta, todas estas expresiones calculada por el modelo hidrodinámico; y B_c es la tasa de consumo de oxígeno del carbono orgánico y otros procesos en la columna de agua. Esta tasa será utilizada para tener en cuenta el oxígeno neto perdido en la columna de agua. Cabe señalar, que no se simula la dinámica del fitoplancton, importante en la generación de OD en la columna de agua.

En la superficie del agua (z = 0), $A_v \frac{\partial O}{\partial z} = \theta_s$, donde θ_s es el flujo de oxígeno en la superficie (reaireación). En la interfaz agua-sedimento (z = H), $A_v \frac{\partial O}{\partial z} = SOD$, donde SOD es la demanda de oxígeno del sedimento. Tanto B_c como SOD, fueron parámetros que fueron calibrados a partir de lo valores obtenidos por Hong (2013) en la bahía de Chesapeake.

Las condiciones de borde se basaron en una climatología construida a partir de datos obtenidos del programa CIMAR-Fiordos (CF-4, CF-7, CF-8, CF-9, CF-10, CF-11 y CF-12) (Guzmán y Silva 2002; Guerra y Silva 2004; Silva y Valedengro 2008; Carrasco y Silva 2010), mientras que la concentración de OD que proviene de los ríos se le asignó un valor constante de 10 mL L⁻¹, basada en información recopilada por IFOP. Para la generación de condiciones iniciales, se realizaron simulaciones por un periodo de 4 años con el fin que el sistema alcanzara a un equilibrio otorgado por las condiciones de bordes y descarga de ríos, así es paso de tiempo final es utilizado como condición inicial generar la modelación.

El uso de este modelo de OD simplificado no tiene el propósito de predecir el OD en función de la entrada de nutrientes y la dinámica del fitoplancton, sino de capturar las variaciones de OD en función de procesos biológicos acotados y de parámetros observados, lo que permitirá realizar un diagnóstico de la influencia de los procesos físicos en la dinámica de OD en los fiordos de la Patagonia norte.

3.4 Objetivo específico 2.2.4 Generar mapas de tiempos de intercambio de agua montados en una plataforma de información geográfica.

Para montar la información generada por este estudio a una plataforma de información geográfica, se utilizó el sistema de información oceanográfica CHONOS (www.ifop.cl/chonos), creada como parte de un sistema de distribución de información derivada de estudios oceanográficos llevados a cabo por el grupo de Oceanografía y Clima de la División de Investigación en Acuicultura de IFOP con asiento en Castro, Chiloé. Este sistema, de acceso libre, integra diferentes productos, especialmente aquellos derivados de modelos numéricos. La plataforma está dividida en distintas herramientas con resultados directos de modelos de pronósticos oceanográficos (MOSA-ROMS), visualizador interactivo de

¹⁷

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

dispersión de partículas (Parti-MOSA) y una herramienta para calcular conectividad hidrodinámica entre diferentes regiones en base escenarios de riesgo (CLIC).

Para el caso de los resultados de este proyecto, se diseñó la herramienta ATLAS específicamente para distribuir la información de este tipo.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



4. **RESULTADOS**

4.1 Objetivo 2.2.1 Modelar hidrodinámicamente la variabilidad interanual del sistema de fiordos y canales de la región de Los Lagos y Aysén

Los modelos, tanto de la región de los Lagos como de Aysén, fueron evaluados respecto de información recopilada por monitoreos que lleva a cabo IFOP descritos en la tabla 1.

4.1.1 Evaluación Modelo atmosférico WRF

Se compararon observaciones de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro de ambos dominios del modelo WRF. Para esto fueron utilizadas las componentes del viento más energéticas de cada lugar. Los resultados muestran que el modelo WRF tiene buena capacidad de predicción en zonas más expuestas, como Melinka (Fig. 5) con coeficientes de correlación y Willmott sobre 0.9. Para las zonas interiores, el modelo paulatinamente pierde calidad, aunque sus índices siguen siendo altos como el caso de isla Apio (r= 0.85 d=0.78). El desempeño de menor calidad se observa en Llaguepe, fiordo Reloncaví (r =0.72 d=0.68), dada la configuración de una topografía más compleja y que requiere una mayor resolución para resolverla con mayor calidad, aun así, el modelo logra representar un ciclo diario del viento que no es visualizado con claridad en el resto de las estaciones evaluadas.



Figura 5: Series de tiempo observadas (negro) y modeladas (rojo) por componentes del viento en Melinka (a), Apiao (b) y Llaguepe (c).

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

4.1.2 Evaluación modelo Hidrodinámico

a) Nivel del mar: Un primer punto de control del modelo hidrodinámico es la capacidad que tiene para reproducir las fluctuaciones del nivel del mar, para la evaluación del R1-Chiloe se utilizó el mareógrafo del SHOA ubicado en la ciudad de Castro. Los resultados muestran un buen acuerdo entre el modelo y la observación, alcanzando valores de r de 0.98 e índices de Willmott de 0.99 (Fig. 6). En la región de Aysén, las 2 mediciones con mareógrafos, uno ubicado en el canal Errazuriz y otro a la entrada del fiordo Puyuhuapi (Fig. 7). Los resultados muestran un buen acuerdo entre el modelo y la observación, alcanzando valores de r=0.93 y d=0.96 (Fig. 4a), mientras que para el fiordo Puyuhuapi valores de r =0.96 y d=0.97 (Fig. 4b).



Figura 6: Series de tiempo de nivel del mar observado (negro) y modelado (rojo) para un punto ubicado en la ciudad de Castro.

20

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 7: Series de tiempo horaria de nivel del mar observado (negro) y modelado (azul) para a) canal Errázuriz y b) fiordo Puyuhuapi.

b) Hidrografía

<u>Mar interior de Chiloé</u>: El modelo reproduce de forma correcta cada perfil, obteniéndose estructuras verticales más mezclados al norte de las islas Desertores (Corcovado y Detif), y paulatinamente más estratificadas mientras se avanza hacia el norte, especialmente en el fiordo Comau, lugar en donde la estratificación es más intensa. Cabe señalar que los perfiles de salinidad observados fueron realizados en un periodo de cuadratura, momento en que la energía otorgada por la propagación de la onda de marea es menor, aun así, las estaciones ubicadas hacia el sur del dominio se encuentran fuertemente mezcladas (Fig. 8).



CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 8: Perfiles de salinidad (arriba) observados (negro) y modelados (rojo) en distintos puntos del mar interior de Chiloé. Serie del nivel de la mar modelada para Castro (abajo), las líneas indican el momento en que se realizaron los perfiles en cada lugar.

<u>Mar interior de Aysén</u>: La temperatura y salinidad modeladas fueron evaluadas mediante la comparación con perfiles de CTD realizados durante las campañas oceanográficas realizadas en periodo invernal (agosto 2018) y primavera (noviembre 2018) (Fig. 9), en distintos puntos del mar interior de Aysén. La temperatura hasta los ~20 m presenta cambios estacionales evidentes. Durante agosto, se apreció una inversión térmica en todos los sitios (Fig. 9a, 9e y 9i) siendo más acentuada en fiordo Quitralco, lo cual es correctamente reproducido por el modelo, en este último sitio se observó bajo los 80 m, un aumento ostensible en la temperatura respecto de los otros sitios, lo cual no logró ser reproducido por el modelo (Fig. 9i). Para el periodo de primavera, la temperatura en los primeros 20 m de la columna de agua, aumentó sus valores rompiendo la inversión térmica observada en agosto (Fig. 9b, 9f y 9j), lo cual, es reproducido en general por el modelo, obteniendo una mejor aproximación en canal Costa (Fig. 9f). Al igual que en invierno, en el fiordo Quitralco el perfil de temperatura observado presentó un aumento paulatino de sus valores desde los 40 m hasta profundidades mayores, lo cual, no logró ser reproducido por el modelo.

La Salinidad durante agosto presentó una fuerte mezcla en canal Moraleda (Fig. 9c) y mayor estratificación en el fiordo Quitralco (Fig. 9k), mientras que el canal Costa presentó una condición

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

intermedia entre los sitios anteriormente señalados (Fig. 9c, 9g y 9k), el modelo reproduce, en primer lugar, el orden de magnitud de la salinidad en cada uno de los sitios, >33 en canal Moraleda, ~31 en canal Costa y ~30 en Quitralco, en este último sitio parece más evidente la subestimación por parte del modelo del volumen de agua dulce en los primeros 30 m (Fig. 9k). Hacia noviembre se apreció un aumento de la estratificación en los primeros 20 m de la columna de agua en todos los sitios, especialmente en canal Costa (Fig. 9h).



Figura 9: Perfiles de temperatura y salinidad en canal Moraleda (a, b, c y d), canal Costa (e, f, g y h) y fiordo Quitralco (i, j, k y l) observados (negro) y modelados (rojo) para invierno (agosto 2018) y primavera (noviembre 2018).

23

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

c) Variabilidad temporal de la temperatura de agua profunda:

La temperatura a los 150 m (Fig. 10), tanto el Desertores como en Ayacara, muestra que los menores valores son alcanzados entre septiembre y octubre (~10.4°C), el modelo muestra coincidencia en el periodo en que se produce esta menor temperatura, sobrestimándolo levemente (~0.2°C). A partir de octubre, la temperatura comienza a elevarse para alcanzar máximos entre febrero y marzo, esta tendencia es replicada correctamente, sin embargo, en el caso de desertores las temperaturas observadas muestran fluctuaciones importantes que son completamente capturadas por el modelo, en Ayacara estas fluctuaciones son más leves y el modelo alcanza un mejor ajuste. En general, el patrón temporal de temperatura de agua profunda es capturado por el modelo, siendo el caso de Ayacara que alcanza un mejor desempeño (r=0.93 y d=0.92), mientras que en Desertores los índices de calidad son levemente inferiores (r=0.78 y d=0.87).



CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 10: Series de tiempo de temperatura a 150 m en Desertores (a) y Ayacara (b) observados (negro) y modelado (rojo).

Figura 11: Series de tiempo de temperatura en canal Moraleda: a 20 m (a) y 120 m (b), canal Costa a 20 m (c) y 120 m (d) y en fiordo Quitralco a 15 m (e) y 110 m (f) para valores observados (negro) y modelados (rojo).

La temperatura en los primeros 20 metros en todos los sitios, mostró una alta fluctuación estacional con los valores más bajos hacia finales de agosto y los máximos en febrero, esto fue replicado por el

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

modelo, lo cual se corroboró con las altas correlaciones encontradas (r > 0.9) (Fig. 11a, 11c y 11e). En aguas más profundas (~120 m), el canal Moraleda presentó una menor variación respecto de los otros sitios, lo que el modelo reprodujo de manera correcta, sin embargo, la serie observada presentó pulsos que el modelo no logró estimar, lo cual incidió en menores valores de correlación (Fig. 11b). Para el caso de canal Costa y fiordo Quitralco, mostraron una estacionalidad más evidente, lo que fue apreciado tanto en las series observadas, como en las modeladas y sus altas correlaciones (> 0.96) (Fig. 11d y 11f).

4.1.3 Circulación residual

La circulación residual en las cercanías de isla Tranqui muestra que la componente este-oeste de la corriente durante periodo de sicigias aumenta la intensidad de flujo hacia el interior de la isla de Chiloé, mientras que, en cuadratura el flujo se debilita e incluso en la parte superficial es posible observar un transporte neto hacia afuera de la isla (Fig.12). El modelo logra capturar esta estructura temporal reflejando la importancia que esta zona puede tener las mareas quincenales en el transporte de agua.

La circulación a lo largo del paso Desertores observado muestra un intenso flujo hacia el sur que ocupa la casi totalidad del perfil (hasta 80 m), el agua que es transportada hacia el norte en este punto, se concentra bajo los 60 m y tiene una estructura temporal irregular. El modelo muestra el flujo hacia el sur ocupando la mayor parte de la columna de agua, mientras que, en la parte inferior, pulsos de corrientes hacia el norte, con apariciones irregulares, interactúan con un flujo que el predominante hacia el sur. (Fig. 13).

La circulación residual observada (ADCP) en el canal Moraleda, en la región de Aysén, mostró pulsos intensos de corrientes que se relacionaron fuertemente con el viento, así durante episodios prolongados e intensos de viento hacia el sur (Fig. 14c), como se muestra en la segunda mitad de septiembre (entre líneas grises), la corriente se direccionó en el mismo sentido (Fig. 14d), mientras que, con un viento soplando hacia el norte, la corriente se dirigió hacia esta dirección, esto fue posible evidenciarlo más claramente durante principios del mes de diciembre (entre líneas grises), en donde la corriente presentó un flujo intenso hacia norte acoplado al viento y posiblemente intensificado por el aumento del caudal del rio Cisnes ocurrido hacia fines de noviembre (Fig. 14b). Todo esto consistente en cuanto a su estructura con lo reproducido por el modelo (Fig. 14e).

En canal Costa la circulación residual respondió a una estructura de 3 capas hasta los 80 m (Fig. 15d), siendo la más superficial (hasta ~5 m) y angosta respuesta del viento (Fig. 15c), dominada por flujos hacia el norte, luego una capa hasta los ~60 m hacia el sur y bajo esta una capa hacia el norte, el modelo resolvió de manera apropiada esta estructura, aunque subestimando la magnitud de la corriente. El fiordo Quitralco (Fig. 16) presentó una compleja estructura de la corriente residual, la cual

²⁶

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS

JA EN FIORDOS Y CANALE IRAÑEZ DEL CAMPO

no fue completamente replicada por el modelo, aunque presentaron similitudes importantes, la capa superficial (hasta 10 m) se encontró influenciada por el viento.



Figura 12: Series temporales del nivel del mar (a), caudal del rio Yelcho, viento N-S en cercanias de isla Tranqui y perfil temporal de la corriente observada (d) y modelada (e) con filtro de 40 h en el sitio denominado Tranqui.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 13: Componente norte-sur del viento modelado y filtrado con 40 h de corte (b), nivel del mar (c) y perfil temporal de la corriente observada (d) y modelada (e) con filtro de 40 h en el sitio denominado Desertores.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 14: a) Nivel del mar, b) caudal rio Cisnes, c) viento N-S del modelo WRF, d) perfil de corriente N-S residual observada y d) perfil de corriente N-S residual modelada en el canal Moraleda.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 15: a) Nivel del mar, b) caudal rio Aysén, c) viento N-S del modelo WRF, d) perfil de corriente N-S residual observada y d) perfil de corriente N-S residual modelada en el canal Costa.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 16: a) Nivel del mar, b) caudal rio Aysén, c) viento N-S del modelo WRF, d) perfil de corriente N-S residual observada y d) perfil de corriente N-S residual modelada en el fiordo Quitralco.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 17: Esquema de circulación promedio para a) el mar interior de Chiloé, periodo 2016-2018, entre 0 – 50m y b) mar de interior de Aysén, periodo 2017-2018, entre 0 - 50m.

4.1.4 Circulación general del mar interior de Chiloé y de Aysén.

La circulación promedio en el mar de Chiloé, entre la superficie y los 50 m. durante el periodo 2016-2018 (Fig. 17a), muestra una alta variabilidad espacial en la magnitud de la corriente, de acuerdo al campo de corrientes, desde el seno de Reloncaví hasta la parte sur del golfo Corcovado se aprecia por el costado continental una corriente bien definida hacia el sur, que se divide en dos ramas a la altura de las islas Desertores intensificándose en los pasos de Apiao y Desertores, continuando su recorrido por la zona costera continental del golfo Corcovado, parte de la estructura de esta corriente fue observada, tanto en el ADCP como el modelo, cercano al paso Desertores (Fig. 13a y 13b). Por 32

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

otra parte, en la parte sur de la isla Chiloé se observa una corriente hacia el norte que comunica desde isla San Pedro hasta isla Tranqui.

La circulación media en la región de Aysén (2017- 2018) entre 0-50 m (Fig.17b) presentó, en general, corrientes medias menos energéticas que en Chiloé, siendo estas más intensas en algunos lugares puntuales. El sector sur de la región, desde el estero Elefantes, y pasando por el canal Costa, es comunicado a través de corriente hacia el norte de alrededor de 10 cm s⁻¹, que se intensifica en la constricción de Meninea y se conecta con el límite norte del archipiélago de Chonos (Melinka) a través del sector oeste del canal Moraleda. El canal Moraleda por su parte, presenta por el lado este, un flujo hacia el sur con un remolino ciclónico hacia la mitad del canal con una intensidad sobre 10 cm s⁻¹. Este flujo hacia el sur, se origina en el borde costero del golfo Corcovado, cercano a la desembocadura del rio Palena. Tanto el golfo Corcovado como el canal Moraleda, ambas áreas de conexión con las zonas interiores de ambas regiones, presentan un patrón de corrientes con variabilidad a lo ancho de estos canales, con flujos de entrada y salida, lo que supone una dinámica circulación estuarina más compleja que el clásico esquema de circulación de dos capas.

4.2 Objetivo específico 2.2.2 Calcular el intercambio de agua mediante un modelo de trazadores acoplados al modelo hidrodinámico.

a) Edad del agua en el mar interior de Chiloé:

Los resultados para la edad del agua promediados verticalmente, muestran que espacialmente los mayores valores se encuentran en el sector norte del cinturón de islas Desertores, (Fig. 18), es justamente en este último sector en donde se produce el gradiente más intenso de esta variable, pasando de 200 a 300 días, esto es apreciable tanto en los campos promedio, como en las secciones verticales en todos los años, sin embargo, cada uno de estos años presenta diferencias, especialmente en el sector norte. Tanto el año 2016 como el 2017, presentaron valores mayores de edad (350-400 días) que el año 2018, específicamente en el seno de Reloncaví, golfo de Ancud y fiordo Comau, mientras que para el 2018 los valores no superan los 350 días. Además, es posible visualizar que la isolínea de 300 días, cercano a islas Desertores, se extiende más hacia el norte durante el 2018.

El periodo 2016-2018 presenta variaciones importantes en su característica hidrográficas, por ejemplo, el año 2016 registró una disminución importante en los caudales de ríos, manteniéndose bajo el promedio histórico durante casi todo el 2016, en cambio, los años 2017 y 2018 presentan un aumento paulatino en los caudales de todos los ríos de la región (Fig. 19a). Esto se puede ver en mayor detalle

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

en la Fig. 20, que muestra que el 2016 estuvo muy debajo del promedio histórico y que a la vez el 2018, estuvo muy por sobre el promedio.

Por otra parte, la componente N-S del viento para el año 2016 en las cercanias del paso Desertores (Fig.19b) estuvo notablemente menos energética que los años posteriores, especialmente para vientos desde el norte asociado al paso de sistemas frontales durante los inviernos. Así mismo, la salinidad también presentó aumento en sus valores, dada la menor disponibilidad de agua dulce (Fig. 19c). Si bien, la circulación residual es este lugar es marcadamente estuarina de 2 capas (Fig. 19d), durante los inviernos esta tiende a debilitarse, sin embargo, durante el 2016, el debilitamiento fue más intenso, y la capa superficial de salida (hacia el sur) quedó confinada a los primeros 20 m de la columna de agua y entonces el flujo hacia el norte se ralentizó e inhibió la entrada de aguas con edad relativamente más bajas, esto se puede apreciar en los valores de edad, que durante el invierno de 2016 tuvo sus valores más altos en el golfo Corcovado (Fig.19e).

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 18: Panel izquierda, promedio vertical de la edad del agua para los años a) 2016, c) 2017 y e) 2018. Panel derecha, secciones verticales desde el golfo Corcovado hasta el seno de Reloncaví (línea blanca) para los años b) 2016, d) 2017 y f) 2018.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.





CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 20: Caudales promedios anuales 2013-2018 como suma de todos los ríos que descargan en el mar de Chiloé, línea amarilla indica el promedio histórico (1980-2018).

b) Mar interior de Aysén:

La edad promedio del agua, promediada verticalmente, para los años 2017 y 2018 (Fig. 21a y 21b) muestra que los mayores valores se encontraron hacia el sur del mar interior de Aysén, principalmente desde la constricción de Meninea, con valores de ~500 días en la Laguna San Rafael, fiordo Cupquelán y cabeza del fiordo Quitralco. Tanto el fiordo Aysén, como el Puyuhuapi, alcanzaron valores similares (350 - 400 días), mientras que canal Jacaf presentó valores menores (200 – 300 días). El canal Moraleda presentó mayores valores en el estrato superficial (~250-300 días) que en el profundo (<200 días) (Fig. 21c y 21d). Los mayores valores en los canales del Archipiélago de los Chonos se encontraron en su parte central, alrededor del canal King (~350 días), lo que difiere del sector sur (canal Darwin), que presentó menores valores (~200 días).

Las variaciones temporales de la edad del agua el canal Moraleda (Fig. 22), muestran que los mayores valores se encuentran en superficie (Fig. 22e), relacionadas a aguas que han permanecido más tiempo al interior del mar de Aysén, mientras que aguas más profundas y de edad relativa menor, asociada al ingreso de aguas de origen oceánico, penetran hacia el sur (Fig. 22d), esto es interrumpido durante los inviernos, cuando aumenta la mezcla, posiblemente asociada a la energía del viento (Fig. 22b) y aguas superficiales y menos salinas son llevadas a estratos más profundos (Fig. 22c), lo que también se refleja en una disminución de la circulación más profunda hacia el interior (Fig. 22d).

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 21: Edad del agua integrada para a) 0-50 m y b) 50-200 m de profundidad. Porcentaje del trazador de agua dulce integrado para a) 0-50 m y d) 50-200 m en el mar interior de Aysén

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 22: Series temporales de a) caudales totales descargados en el mar interior de Aysén, b) componente N-S del viento del modelo WRF y perfiles temporales de c) salinidad, d) corriente N-S filtrada (filtro coseno lanczos 15-d) y edad del agua en canal Moraleda para el periodo 2017-2018.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

4.3 Objetivo específico 2.2.3 Implementar un modelo simple y semi-empírico de la dinámica de oxígeno disuelto y establecer relaciones con el intercambio de agua.

Para verificar el comportamiento espacial de OD otorgado por el modelo, se compararon resultados con datos del crucero CIMAR Fiordos 7 (CF7) realizado en noviembre de 2001, ya que este contenía mediciones en todos los fiordos de la región de Aysén en una sola campaña. Las mediciones de OD están basadas en análisis de muestras de agua mediante el método Winkler. Se eligieron 3 profundidades para la realizar la comparación: superficial, 50 m y 150 m. La información del modelo corresponde a promedio de OD del mes de noviembre de 2018.

La capa superficial, tanto en CF7 como en el modelo (Fig. 23a y 23b), muestran una concentración alta de OD especialmente en los fiordos, con valores entre 7 - 8 mL L⁻¹ con la excepción de fiordo Quitralco que en ambos casos muestra valores entre 6-7 mL L⁻¹. El diagrama de dispersión muestra un buen ajuste con un r² de 0.98. La capa de 50 m, muestra en ambas fuentes, una disminución de OD con valores mayoritariamente entre 5 y 6 mL L⁻¹. CF7 muestra al sur de Meninea valores más altos que el modelo, por otra parte, el fiordo Puyuhuapi resalta como el sector con menores concentraciones de OD, lo cual es capturado por el modelo (Fig. 23d, 23e y 23f). Finalmente, a los 150 m se observan, tanto en CF7 como en el modelo, concentraciones de OD bajo el nivel hipóxico (<2 mL L⁻¹) en el fiordo Puyuhuapi y bajo 3 mL L⁻¹ hacia la cabeza del fiordo Aysén, sin embargo, hacia el sur de la constricción de Meninea CF7 muestra mayor contenido de OD que le modelo (Fig. 23g, 23h y 23i).

Los valores promedio otorgados por el modelo para todo el periodo 2017-2018 (Fig. 24a y 24b), muestran para una capa integrada entre 0-50 m, una concentración entre 4 y 5 mL L⁻¹ para el sector norte de la región, más al sur, y cercano al Campo de Hielo Norte, se encuentran las más altas concentraciones (5-6 mL L⁻¹), mientras que hacia la cabeza de los fiordos se observan valores levemente bajo los 4 mL L⁻¹. Para aguas más profundas, bajo los 50 m, la variabilidad es más alta, al norte del límite de Meninea y canal Moraleda se observan valores de ~3 mL L⁻¹, al sur de esta zona se registran valores más altos, lo que comprende canal Costa, y Elefantes. Se observan valores hipóxicos hacia el interior de fiordo Puyuhuapi y la cabeza del fiordo Quitralco, mientras que lo valores más altos siguen registrándose cercanos al Campo de Hielo Sur.

La variabilidad temporal del OD en el canal Moraleda se encuentra relacionado inversamente a los valores de edad del agua en ese sector, esto es, durante el ingreso de agua oceánicas más salinas y relativamente más "jóvenes", estás transportan concentraciones de OD menor, esto hasta que durante los inviernos y al final de este y mientras se produce mezcla y descenso de aguas de estratos superiores, estas permiten oxigenar las aguas más profundas (Fig. 25).

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 23: Estaciones de OD del crucero CIMAR Fiordos 7 para capa a) superficial d) 50 m y g) 150 m comparados con OD modelado para b) superficial e) 50 m y h) 150 m, y diagramas de dispersión para c) superficial f) 50 m e i) 150 m.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.



Figura 24. a) Oxígeno disuelto promedio 0-50 m, b) oxígeno disuelto a promedio 50-fondo para la región de Aysén.



Figura 25. Perfiles temporales de a) salinidad, b) corriente N-S filtrada (filtro coseno lanczos 15-d), c) edad del agua y d) OD en canal Moraleda para el periodo 2017-2018.

La concentración de OD encontrada en la cabeza del fiordo Puyuhuapi presenta los valores más bajos de toda la región de Aysén, con una hipoxia recurrente, a excepción de periodos de ventilación que ocurren durante los meses de verano (Fig. 26a), mientras que en canal Costa se observan valores fluctuando en los 4 mL L⁻¹, siendo mayores durante el verano (Fig. 26b). En la cabeza del fiordo Aysén (Fig. 26c), el OD disminuye levemente bajo los 3 mL L⁻¹ principalmente durante el verano y parte del otoño, mientras que durante el invierno aumenta a valores cercano a 4 mL L⁻¹. En la cabeza del fiordo Quitralco (Fig. 26d), los valores se encuentran entre 2 a 3 mL L⁻¹ con periodos de hipoxia bajo los 150

43

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

m, principalmente durante el otoño de 2018, ya en invierno, se oxigenan las aguas más profundas alcanzando valores cercanos a 3 mL L⁻¹. Con el fin de ahondar en antecedentes sobre el bajo contenido de oxígeno simulado en fiordo Quitralco, durante junio, agosto, diciembre 2019 y febrero de 2020 se realizaron estaciones de CTDO en la cabeza de fiordo Quitralco encontrando valores inferiores a 1 mL L⁻¹ bajo los 200 m en todos los perfiles realizados, siendo esta hipoxia más severa que la simulada por el modelo (Fig. 27).

Finalmente, en la boca del fiordo Cupquelán (Fig. 26e), se observa un contenido mayor de OD comparado con otros fiordos, los valores más bajos descienden levemente bajo los 4 mL L⁻¹, aumentando en las zonas más profundas durante los inviernos.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Figura 26: Perfiles temporales de OD en a) cabeza fiordo Puyuhuapi, b) canal Costa c) cabeza fiordo Aysén, d) Cabeza fiordo Quitralco y boca fiordo Cupquelán para el periodo 2017-2018.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Figura 27: Perfil temporal de OD basado en mediciones de CTDO en la cabeza del fiordo Quitralco durante el año 2019 y 2020.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

4.4 Objetivo específico 2.2.4 Generar mapas de tiempos de intercambio de agua montados en una plataforma de información geográfica.

Se montó una plataforma en donde es posible visualizar interactivamente los resultados derivados de este estudio, no tan solo a través de la generación de mapas de intercambio de agua, sino también, de todas las variables que derivan del modelo hidrodinámico, esto es, corrientes, temperatura, salinidad. El acceso es público, y puede ser visualizado entrando a la portada de sistema de Información Chonos (chonos.ifop.cl) o bien directamente a la aplicación ATLAS en http://chonos.ifop.cl/atlas/.

Figura 28: Interfaz de la plataforma de información geográfica ATLAS, perteneciente al sistema de información oceanográfica CHONOS.

Este sistema cuenta con una serie de herramientas para facilitar la apropiación de la información por parte de los usuarios, tales como: generación de mapas para distintas profundidades, perfiles verticales, series de tiempo y secciones verticales espaciales y temporales. Además, cuenta con un botón que permite navegar en el tiempo, se esta forma el usuario puede apreciar las variaciones temporales de todas variables antes detalladas. Finalmente, cada una de estas herramientas cuenta con un botón de descarga de datos en formato .CSV o XLS, así como también de figuras en distintos formatos (.jpg, .png, etc.). La plataforma cuenta con un tutorial para facilitar el uso de cada una de las herramientas por parte de los usuarios.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

5. DISCUSIÓN

5.1 Circulación en la Patagonia norte

El uso de modelos hidrodinámicos de la alta resolución en zonas estuarinas a lo largo del mundo y en particular el método de edad del agua, como métrica de escala temporal de transporte, se ha incrementado en los últimos años como una forma de dilucidar los mecanismos presentes en su dinámica (Gustafsson 2007, Shen 2007, Zhang 2010, Liu et al. 2012, De Brye et al. 2012, Bendtsen et al. 2014, Karna y Baptista 2016, Viero y Defina 2016). A lo largo de este estudio, en la Patagonia norte de Chile, se han presentado resultados sobre la edad del agua, mediante el uso de modelación hidrodinámica y utilizando una aproximación euleriana basada en la teoría de la edad y tiempo de residencia orientada a los constituyentes, CART (http://www.climate.be/repomodx/cart/) (Delhez et al., 1999, Deleersnijder et al., 2001) y junto con esto, se ha acoplado un modelo simple de oxígeno disuelto (Hong, 2013) para la región de Aysén.

Se han implementado dos modelos hidrodinámicos de alta resolución en los mares interiores de la región de los Lagos (R1-Chiloé) y de Aysén (R2-Aysén), ambos utilizando el software MIKE 3 FM (DHI, 2019), cuyas características distintivas, es el uso de volúmenes finitos de elementos triangulares que permiten una mejor adaptación a una geometría costera más compleja y, por otra parte, es su discretización vertical, dado que mezcla coordenadas sigma y rectangulares, lo que evita cambios abruptos en la configuración de estas capas verticales, mejorando la generación de una estructura estratificada en la columna de agua . Ambos modelos hidrodinámicos utilizan el forzamiento atmosférico basado en el modelo WRF, que mejora la resolución espacial de la información con respecto a modelos globales lo que conlleva una mejor representación de las condiciones meteorológicas locales que caracterizan a estas regiones.

La modelación hidrodinámica en regiones estuarinas requiere de información sobre la entrada de agua dulce al sistema marino, por lo cual, proporcionar esta información es crítico en el buen desempeño de un modelo hidrodinámico. Para el desarrollo de este estudio, se contó con información del modelo hidrológico VIC (Liang et al., 1994), implementado para toda la zona austral de Chile, el cual entrega caudales diarios en más 30000 cuencas costeras, para el periodo 1979-2018, los resultados de este modelo son posibles de visualizar a través de la plataforma Chonos (<u>http://chonos.ifop.cl/</u>), la cual además, entrega la comparación de los resultados de VIC con los datos de caudales de la Dirección General de Aguas (DGA) en sus estaciones de monitoreo.

El modelo hidrodinámico R1-Chiloé, cubre un periodo 2016-2018 y fue evaluado con respecto a mediciones realizadas en los años 2017 y 2018. El modelo hidrodinámico entregó un buen ajuste respecto de diversos parámetros físicos medidos, capturando la dinámica de este sistema estuarino. Las condiciones hidrográficas en la superficie de R1-Chiloé están controladas por flujos océano-

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

atmósfera, viento, marea, y escorrentía continental de agua dulce proveniente principalmente de los estuarios Reloncaví y Comau (Castillo y Salinas 2012). En tanto, la estructura hidrográfica vertical es bien resuelta generando perfiles salinidad adecuados de acuerdo a su ubicación en Chiloé, siendo consistente en replicar zonas mayormente mezcladas o bien estratificadas.

En las observaciones de corrientes ubicadas en el golfo Corcovado (Tranqui) aparece una señal de 15 días asociada a periodos de sicigias, y que el modelo simula correctamente, este mecanismo parece tener una alta importancia en el transporte en el golfo Corcovado, sector con una alta capacidad de mezcla turbulenta, lo que fue apreciado de buena forma por el modelo a través de los perfiles de salinidad. En Paso Desertores, por otra parte, presenta un flujo intenso hacia el sur y que cubre hasta los 80 m, con corrientes residuales sobre los 20 cm s⁻¹ siendo más intensas hacia la superficie, flujos hacia el norte se observan débiles y bajo los 80 m.

La circulación media para el periodo 2016-2018, para la capa superficial (0-50 m) muestra una persistente e intensa corriente que recorre el borde continental desde el seno de Reloncaví hasta el golfo Corcovado (Fig. 17a), este flujo de salida fluctúa en su recorrido entre 10 a 20 cm s⁻¹ y tiene una bifurcación en dos ramas que traspasan los pasos de Apiao y Desertores continuando su curso hacia el sur por la costa continental del golfo Corcovado. Esta corriente sería un mecanismo eficiente en el transporte tanto de solutos (oxígeno disuelto, nutrientes), como de agentes biológicos (patógenos, larvas) desde las cuencas del fiordo y seno de Reloncaví hacia el sector del golfo Corcovado. Por otra parte, si bien los modelos esquemáticos de circulación vertical en esta región (Sievert y Silva 2008) comparados con el modelo hidrodinámico son coincidentes en su estructura general, con el típico patrón de circulación estuarina de dos capas, con una capa superficial de salida, esta podría no cumplirse en algunos sectores, tal es el caso de la parte sur de la Isla de Chiloé, entre isla San Pedro e isla Tranqui, en donde se observa una corriente hacia el norte que podría tener implicancias en el transporte, por ejemplo, de floraciones algales nocivas.

Las características hidrodinámicas para R2-Aysén, en específico en canal Moraleda, muestran un importante efecto del viento sobre las corrientes, especialmente durante el invierno. En este lugar, tanto el modelo, como las observaciones realizadas mediante un perfilador acústico de corrientes, mostraron que el esfuerzo del viento sobre la superficie, en episodios transitorios, puede llegar a mover la columna de agua hasta 40 m de profundidad hacia el interior del canal, actuando en oposición al gradiente de presión y cambiando el balance dinámico durante estos eventos, generando una intensa mezcla turbulenta durante estos periodos. En primavera en cambio, la estratificación se fortaleció, al generarse cambios en la dirección del viento (hacia el norte) y aumentar el caudal de los ríos, generando una capa superficial (~20 m) con flujos residuales ocasionales del orden de 20 cm s⁻¹. La respuesta del viento también fue observada en canal Costa, sin embargo, esta quedó acotada a los primeros 10 m de la columna de agua, no presentando influencia directa bajo esta profundidad, bajo esta capa y hasta los ~60 m, un flujo intenso (~20 cm s⁻¹) hacia el norte fue observado en el perfilador

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

acústico, con fluctuaciones quincenales, lo cual, podría estar asociado a mareas de sicigias y cuadraturas. Bajo los 60 m, tanto en la observación como en el modelo se presentó una tercera capa con dirección hacia el sur. En el fiordo Quitralco una compleja estructura residual de las corrientes fue observado tanto en el perfilador acústico como en el modelo, los mecanismos que originan esta estructura son aún desconocidos, lo que hace necesario ser abordado en futuras investigaciones.

La circulación media superficial (0-50 m) en R2-Aysén derivada del modelo, muestra diferencias en la intensidad del flujo de salida desde los fiordos, siendo en estero Elefantes y fiordo Aysén los que presentan mayor velocidad (~10 cm s⁻¹) y los fiordos Puyuhuapi y Quitralco los menores, esto probablemente asociado a que estos presentan ríos con caudales menores a los antes descritos. En tanto, desde el canal Costa y conectando con el canal Moraleda se presentó una corriente hacia el norte que recorre el lado oeste del Moraleda hasta conectar con borde norte de las islas Guaitecas continuando su recorrido hasta el borde más oceánico de estas islas, Por otra parte, una corriente hacia el sur, originada en la zona costera del golfo Corcovado y cercana a la desembocadura del rio Palena, ocupa el borde este del canal Moraleda, y sería capaz de transportar parte de la pluma del rio Palena hacia el sur. La aparición de un giro ciclónico en la parte central del canal Moraleda requiere de una especial atención por su eventual importancia en procesos biológicos, ya que esta zona tiene especial recurrencia de eventos FAN.

5.2 Escalas de tiempo de transporte

Las escalas de tiempo de transporte, agrupa una serie de conceptos relativos al tiempo que toma a una masa de agua en moverse de un cierto lugar, respecto de las cuales, existen aún diversas definiciones y métodos para cada cual (por ejemplo: tiempo de residencia, edad del agua, tiempo de tránsito, tiempo de renovación, "flushing time"), para evitar malentendidos e incluso conclusiones erróneas, es importante introducir definiciones precisas y utilizarlas con cuidado (Bolin y Rodhe, 1973). La edad del agua es definida como el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua. (Bolin y Rodhe, 1973; Delhez et al., 1999; Monsen et al., 2002), para el caso de modelos R1-Chiloé y R2-Aysén, estos límites coinciden, por una parte, con los bordes abiertos más cercanos al océano y la entrada de ríos, en ambos casos la edad en esos límites es igual a 0, por lo tanto, el agua oceánica de mayor salinidad, como el agua dulce de menor salinidad, son las fuentes por donde se renueva el sistema interior. Sin embargo, la colocación de los límites para definir una región de interés es una elección arbitraria, e influirá en los valores absolutos de las escalas de tiempo (Sandery y Kämpf, 2007).

Hasta cierto punto, las distribuciones de escala temporal en el sistema son relativas por naturaleza, por consecuencia los patrones similares serán vistos sin importar la localización del límite (Sandery y

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Kämpf, 2007) lo cual indica que los valores absolutos de la edad del agua son menos relevantes que la estructura espacial y temporal que esta adopta. En el caso de los dominios empleado en este estudio, con el borde abierto principal cercano a la boca del Guafo o golfo Corcovado, se está asumiendo a todo el mar interior de Chiloé o Aysén, incluyendo los fiordos continentales, como un gran sistema estuarino. Esto genera tiempos de transporte relativamente mayores para las zonas alejadas del borde, respecto de si estos límites fueran ubicados en la boca de cada uno de estos fiordos, sin embargo y a pesar que los valores absolutos puedan cambiar, los patrones de distribución de estos tiempos serán similares.

La noción de lo relativo de las escalas de transporte debe ser tomado en cuenta, dado las distintas aproximaciones, en cuanto al método y la elección del dominio de control que son utilizadas, por tanto, las comparaciones con otras métricas o métodos como aquellos analíticos utilizando datos observaciones en algunos fiordos en Chile (Guzmán y Silva 2013; Calvete y Sobarzo 2011; Valle-Levinson et al., 2007; Salinas et al. 2002) pueden ser inadecuados e inducir a conclusiones erróneas. De acuerdo a la definición de la edad del agua empleada en este trabajo, el mayor volumen de agua que renueva el sistema es el de origen oceánico, por esta razón no es extraño, que la principal vía de renovación sea mediante el ingreso de aguas más salinas o densas y que, por tanto, la entrada de ríos sea menos importante en la renovación, dado su volumen respecto de las aguas de origen oceánico.

La edad del agua en el mar interior de Chiloé, modelada para el periodo 2016-2018, muestra espacialmente a las islas Desertores como el límite más importante entre condiciones de aguas de edad relativamente menores, al sur de Desertores y aguas de edad mayores, al norte de estas. Las aguas más densas que penetran por el paso Desertores permiten renovar los grandes golfos y fiordos a norte de islas Desertores, las entradas de ríos tienen un impacto menor en la renovación de estas regiones.

La influencia de las condiciones hidrográficas y atmosféricas en los tiempos de intercambio de agua parecen relevantes. El año 2016 se presentó en la zona sur de Chile uno de los años más secos originado por un fuerte evento de El Niño y la fase positiva del Modo Anular del Sur que alteró la circulación atmosférica en el sur de América del Sur y el Océano Pacífico adyacente (León-Muñoz et al., 2018). La descarga de ríos se redujo casi a la mitad de su condición promedio anual, la menor disponibilidad de agua dulce inhibió la estratificación y a la vez, el flujo estuarino superficial se debilitó, esto también redujo el flujo de aguas más densas oceánicas que penetran por el paso Desertores, lo que limitó la renovación de las cuencas al norte de esta.

La edad del agua en la región de Aysén muestra a la constricción de Meninea como un límite similar al descrito en islas Desertores. Las aguas de origen oceánico que penetran por el canal Moraleda registran edades menores al resto de la región, los valores promedio mayores se encontraron en la cuenca sur de la región de Aysén, especialmente en la Laguna San Rafael y el fiordo Cupquelán. En

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

la parte central del archipiélago de los Chonos, en las cercanías de canal King, se observa un aumento en los valores de edad del agua respecto de otros canales ubicados más al sur o más al norte, esto podría indicar que los canales ubicados en la parte central reciben aguas desde el interior, mientras que los canales ubicados hacia el sur, como el canal Darwin, contienen aguas de origen más oceánico, por tanto, aguas de relativa menor edad.

5.3 Dinámica del oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es una medida importante de salud en estuarios y en especial en fiordos con umbrales batimétricos que, en la mayoría de los casos, no permiten una renovación rápida de las aguas en profundidad o impiden la circulación (Zhang et al., 2010). La lenta renovación de aguas de fondo o el impedimento de la circulación de aguas profundas, es comúnmente visto en cuencas que presentan un umbral somero (Silva y Vargas, 2014). Los fiordos de la Patagonia albergan una intensiva industria acuícola basada principalmente en la salmonicultura, la comprensión de los procesos que regulan la dinámica del oxígeno disuelto es crucial para estimar la capacidad de carga de estos sistemas y así mejorar la gestión de esta industria.

Se implementó un modelo simple de oxígeno disuelto en R2-Aysén, basado en el modelo de Hong y Shen (2013) en bahía Chesapeake. Los resultados muestran consistencia entre los patrones espaciales de OD modelados y las observaciones obtenidas por Cimar-7 (Fig. 23), o sea, mayores valores se encuentran en la capa superficial y en las cercanías de los grandes ríos. En las capas profundas, valores hipóxicos son revelados en el fiordo Puyuhuapi y fiordo Quitralco, mientras que, contenidos relativamente altos de OD son encontrados en las cercanias de Campo de Hielo Norte, esto es, Laguna San Rafael, fiordo Cupquelán y estero Elefantes.

El Fiordo de Puyuhuapi, ha sido descrito como uno de los fiordos hipóxicos en la Patagonia Chilena, con niveles de oxígeno disuelto (OD) por debajo de 2 mL L⁻¹ (~30% de saturación) entre 100-250 m de profundidad (Schneider et al. 2014, Silva & Vargas 2014, Pérez-Santos 2017). Desde 1995, los valores de OD profundos han mostrado mínimos de 1,14 mL L⁻¹ en la zona central de Puyuhuapi (Silva et al. 1998), con registros similares en 2015 (Pérez-Santos et al. 2017). A pesar de que la hipoxia ha sido registrada con regularidad, las aguas nunca presentaron condiciones de anoxia, lo que indica que el fiordo se ventila en ciertos momentos y mantiene aguas con niveles de OD sobre 1 mL de L⁻¹ (Pérez-Santos 2017). Pinilla et al. (2020), contrastando datos de estaciones de OD y el método de la edad del agua, señala que la ventilación de las cuencas profundas se produce entre primavera y verano modulado por cambios en la salinidad en el umbral sur del fiordo Puyuhuapi, esta estacionalidad es bien reproducida por el modelo (Fig. 26a).

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

El modelo muestra al fiordo Quitralco como el segundo fiordo con menos niveles de OD de la región, sin embargo, no se aprecia una estacionalidad clara, ambos años modelados difieren en su comportamiento. Silva y Vargas (2014), utilizando información de 16 cruceros Cimar detectaron la presencia de hipoxia en 4 lugares en el sur de Chile: fiordo Puyuhuapi, canal Jacaf, fiordo Aysén y golfo Almirante Montt en la región de Magallanes. Las observaciones de OD en el fiordo Quitralco nunca detectaron aguas hipóxicas, más aun, de las 3 observaciones realizadas (C1F, C7F, C13F), el promedio está sobre los 4 mL L⁻¹, con un valor mínimo en los registros de 3.44 mL L⁻¹, esto contrasta enormemente con nuevos datos registrados por IFOP en fiordo Quitralco, específicamente en su cabeza, donde valores inferiores a 1 mL L⁻¹ fueron obtenidos en los 4 cruceros realizados (Fig. 27). Lo anterior ha derivado en la iniciativa de realizar un estudio más profundo en el fiordo Quitralco, incluyendo no solo aspectos físicos, también químicos y biológicos en la columna de agua y los sedimentos marinos.

El modelo de OD tiene parámetros muy simples, entre sus limitaciones, no simula la dinámica de fitoplancton ni los nutrientes, aun así, logra resultados aceptables, lo que indicaría que el componente físico (transporte y mezcla) es muy importante en la dinámica del OD en la Patagonia norte. El control físico sobre el oxígeno disuelto ha sido descrito en estuarios en otros lugares del mundo como un importante mecanismo en la variabilidad del oxígeno disuelto (Hong y Sheng 2013; England 1995; Wilson et al. 2008; Shen y Hong 2013).

Este modelo está sujeto a mejoras, como el ajuste de algunos parámetros, revisión de las condiciones de borde, extensión del periodo de modelación y mejora en la recopilación de datos de calidad para su validación, sin embargo, permite una clasificación general de OD en toda la región y explorar hipótesis sobre principales forzantes que intervienen en su dinámica espacial y temporal, por último, es de sencilla implementación (por ejemplo, en R1-Chiloé) y muy eficiente computacionalmente.

⁵³

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

6. CONCLUSIONES

Mediante el uso de modelación hidrodinámica se obtuvo la circulación marina y las características físicas de la columna de agua para los mares interiores de la región de los Lagos y Aysén, el desempeño de los modelos es evaluado adecuadamente respeto de observaciones in situ.

En la región de Los Lagos, el año 2016 presentó caudales de ríos muy por debajo de sus valores históricos, mientras que el año 2018 sus valores fueron muy por sobre el promedio, los vientos por su parte, se presentaron menos intensos en 2016 que los presentes en 2017-2018.

Bajo la definición de edad del agua usada en este estudio: El agua oceánica de mayor salinidad es la principal fuente de renovación de los sistemas interiores, el agua dulce tiene un impacto menor como fuente de renovación y está acotado a zonas muy específicas de la Patagonia norte.

Tanto las islas Desertores en el mar de Chiloé, como la constricción de Meninea, en la región de Aysén, actúan como un importante limite espacial en la edad del agua. Dejando los mayores valores hacia los fiordos interiores de cada región.

Durante años secos (2016), en el mar interior de Chiloé, se reduce la estratificación y, por tanto, la intensidad de la circulación estuarina, esto provoca el incremento en la edad del agua al norte de islas Desertores, en cambio. En cambio, en años con ríos más caudalosos, la circulación estuarina es más activa permitiendo la entrada de aguas de edad menor a través del paso Desertores.

Se implementó un modelo simple de oxígeno disuelto para el mar interior de Aysén obteniendo resultados adecuados respecto información histórica.

En zonas bajo los 50 m, se revelan como zonas hipóxicos (< 2 mL L⁻¹) el fiordo Puyuhuapi y fiordo Quitralco, siendo en extensión mayor la primera.

En fiordo Quitralco, observaciones realizadas en los últimos años revelan una severa hipoxia hacia la cabeza de este fiordo.

54

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adams, T., Black, K., MacIntyre, C., MacIntyre, I., & Dean, R. 2012. Connectivity modelling and network analysis of sea lice infection in Loch Fyne. Aquaculture Environment Interactions 3, 51-63. DOI: 10.3354/aei00052

Antezana, T., Hamamé, M., Eissler, Y., Jara, S., 1996. Hydrography in Chilean Fjords: Strait of Maggellan to Beagle Channel. Berichte zür Polarforschung 190, 16–19,

Antezana, T., 1999. Hydrographic features of Magellan and Fuegian inland passages and adjacent Subantartic water. Scientia Marina 63 (1), 23–34.

Beckman, A. and Haidvogel, D. B., 1993: Numerical simulation of flow around a tall isolated seamount. Part I: Problem formulation and model accuracy, J. Phys. Oceanogr., 23, 1736–1753.

Bendtsen, J., J. Mortensen, and S.Rysgaard, 2014. Seasonal surface layer dynamics and sensitivity to runoff in a high Arctic, J. Geophys. Res.Oceans, 119, 6461–6478.

Boghen, Andrew D. (ed.), 1995. Cold-Water Aquaculture in Atlantic Canada. Second Edition. (Moncton): The Canadian Institute for Research on Regional Development, (1995).

Bolin, B., Rodhe, H., 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. Tellus 25, 58–62.

Boynton, W. R., and W. M. Kemp, 1985. Regeneration and oxygen consumption by sediments along an estuarine salinity gradient, Mar. Ecol. Prog. Ser., 23, 45–55

Buschmann AH & R Pizarro. 2001. El costo ambiental de la salmonicultura en Chile. Análisis de Políticas Públicas, Fundación Terram (Chile) 5: 1-7.

Bustos B. 2012. Brote del virus ISA: crisis ambiental y capacidad de la institucionalidad ambiental para manejar el conflicto. Eure. 38 (115) 219-245 pp. Disponible en <u>http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612012000300010&script=sci_arttext</u>

Calvete, C., Sobarzo, M., 2011. Quantification of the surface brackish water layer and frontal zones in southern Chilean fjords between Boca del Guafo and Estero Elefantes. Continental Shelf Research 31 (3–4), 162–171.

Carrasco C & N Silva. 2010. Comparación de las características oceanográficas físicas y químicas presentes en la zona de Puerto Montt a la boca del Guafo entre el invierno y la primavera de 2004 y entre las primaveras de 1995 y 2004. Ciencia y Tecnología del Mar 33(2): 17-44.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

De Brye B., A. de Brauwere, O. Gourgue, E.J.M. Delhez and E. Deleersnijder, 2012. Water renewal timescales in the Scheldt Estuary, Journal of Marine Systems, 94, 74-86.

Deleersnijder, E., Campin, J.M., Delhez, E.J.M., 2001. The concept of age in marine modelling: I. Theory and preliminary model results. J. Mar. Syst. 28, 229–267

Deleersnijder, E., Mouchet, A., Delhez, E.J.M., Beckers, J.-M., 2002. Transient behaviour of water ages in the world ocean. Math. Comput. Model. 36, 121–127.

Deleersnijder, E., 2007. Timescale- and tracer-based methods for understanding the results of complex marine models. Editorial, Estuarine, Coastal and Shelf Science 74.

Delhez, E.J.M., Campin, J.M., Hirst, A.C., Deleersnijder, E., 1999. Toward a general theory of the age in ocean modelling. Ocean Model. 1, 17–27.

Delhez, E.J.M., Deleersnijder, E., 2002. The concept of age in marine modelling II. Concentration distribution function in the English channel and the North Sea. Journal of Marine Systems 31, 279-297.

Delhez, E.J.M., Heemink, A.W., Deleersnijder, E., 2004. Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem. Estuarine, Coastal and Shelf Science 61, 691-702.

Delhez, E.J.M., 2006. Transient residence and exposure times. Ocean Sci. 2, 1–9. doi.org/10.5194/os-2-1-2006.

DHI, 2019. Mike 3, User guide and reference manual. Danish Hydraulic Institute, Denmark England, M.H., 1995. The age of water and ventilation timescales in a global ocean model.J. Phys. Oceanogr. 25, 2756–2777

England, J. H. (1995), The age of water and ventilation timescales in a global ocean model, J. Phys. Oceanogr., 25, 2756–2777

Gregoire, M., Oguz, T., 2003. *Modeling Biogeochemical Processes in Marine Ecosystems*. UNESCO – EOLSS. Sample Chapters. Oceanography – Vol.III.

Guerra, D. and N. Silva (2004). Distribución de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes entre la boca del Guafo y el fiordo Aysén. Resultados crucero CIMAR 9 Fiordos. Comité Oceanográfico Nacional, Valparaíso. Libro de Resúmenes: 15-24

Guzmán D y Silva, N. 2002. Caracterización física y química y masas de agua en los canals australes de Chile entre Boca del Guafo y golfo Elefante (crucero CIMAR fiordo 4). Cienc. Tecnol. Mar. 25 (2) 45-76

Guzmán, D., Silva, N., 2013. Caracterización físico-química de los canales australes. Modelo geoquímico del Fiordo Aysén. Editorial Académica Española, p. 106.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO

Gustafsson, K.E., Bendtsen, J., 2007. Elucidating the dynamics and mixing agents of a shallow fjord through age tracer modeling. Estuarine, Coastal and Shelf Science 74 (4), 641–654.

Hirst, A.C., 1999. Determination of water component age in ocean models: application to the fate of North Atlantic Deep Water. Ocean Modelling 1, 81–94

Hong, B., and J. Shen (2013), Linking dynamics of transport timescale and variations of hypoxia in the Chesapeake Bay, J. Geophys. Res. Oceans, 118, 6017–6029.

Hunter, J.R., Craig, P.D., Phillips, H.E., 1993. On the use of random walks models with spatially variable diffusivity. Journal of Computational Physics 106, 366–376

Kärnä, T., & Baptista, A. M, 2016. Water age in the Columbia River estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 183, 249-259. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.09.001

Karstensen, J., Tomczak, M., 1998. Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. Journal of Geophysical Research 103 C9, 18599–18609

Kawase, M. & B. Bang. 2013. Seasonal variability of salinity and circulation in a silled estuarine fjord: a numerical model study. Coni. Shelf Res. 71:109-126.

Koutitonsky, V. G., T. Guyondet, A. St-Hilaire, S. C. Courtenay, and A. Bohgen (2004), Water renewal estimates for aquaculture developments in the Richibucto Estuary, Canada, Estuaries, 27(5), 839–850.

León-Muñoz, J., Urbina, M.A., Garreaud, R. et al. Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). Sci Rep 8, 1330 (2018). <u>https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4</u>

Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges (1994), A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, J. Geophys. Res., 99(D7), 14415–14428, doi:10.1029/94JD00483.

Liu, Z., H. Wang, X. Guo, Q. Wang, H. Gao, 2012. The age of Yellow River water in the Bohai Sea. J. Geophys. Res.-Oceans, 117 (C11), C11006, doi:10.1029/2012JC008263

National Center for Environmental Prediction, 2000. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, Continuing from July 1999. National Weather Service, U.S. Department of Commerce, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO

Oliveira, A., Baptista, A.M., 1997. Diagnostic modeling of residence times in estuaries. Water Resour. Res. 33 (8), 1935–1946.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Monsen, N.E., Cloem, J.E., Lucas, L.V., Monismith, S.G., 2002. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport timescales. Limnology and Oceanography 47 (5), 1545-1553

Myksvoll, M.S., Sandvik, A.D., Skarðhamar J, Sundby S., 2012. Importance of high resolution wind forcing on eddy activity and particle dispersion in a Norwegian fjord. Estuar Coast Shelf Sci 113: 293–304. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.08.019.

Pérez-Santos, I., 2017. Deep ventilation event during fall and winter 2015 in the Puyuhuapi Fjord (44.6°S). Lat. Am. J. Aquat. Res., 45(1): 223-227.DOI: 10.3856/vol45-issue1-fulltext-25.

Pinilla, E., 2018. Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia, Etapa I. (Informe final). Valparaíso: Instituto de Fomento Pesquero. Disponible en: http://190.151.20.106/exlibris/aleph/a23_1/apache_media/XA7Y3QAT7GJNIHKAVLVJ6PXM4NILIU.pdf

Pinilla E, Soto G, Soto C, Venegas O, Salas P, Reche P, et al. Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia sur, Etapa II. Instituto de Fomento Pesquero - Subsecretaría de Economía 2019, pp. 55.

Pinilla, Elías, Manuel I. Castillo, Iván Pérez-Santos, Oliver Venegas, and Arnoldo Valle-Levinson. 2020. "Water Age Variability in a Patagonian Fjord." Journal of Marine Systems, Volume 210 103376. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103376

Salinas, S., J. Fierro, M. Castillo y J. Letelier. 2002. Tiempo de residencia y proceso de mezcla en la cuenca sur de la constricción de Meninea. Libro de Resúmenes pág. 33-43. Taller sobre los resultados del Crucero Cimar 7 Fiordos. Valparaíso.

Salinas, S. y M. Castillo. 2012. Corrientes mareales y submareales en el Canal Desertores (42°42'S, 72°50'W). Ciencia y Tecnología de Mar, 35 (1): 5-18.2

Sandery, P.A., Kämpf, J., 2007. Transport timescales for identifying seasonal variation in Bass Strait, southeastern Australia. Estuar. Coast. Shelf Sci. 74, 684–696.

Schneider, W., Pérez-Santos, I., Ross, L., Bravo, L., Seguel, R.,and Hernández, F.: On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia, Prog. Oceanogr., 129, 8–18, 2014

Shen, J., Wang, H.V., 2007. Determining the age of water and long-term transport timescale of the Chesapeake Bay. Estuar. Coast. Shelf Sci. 74, 585–598.

Shen, J., B. Hong, and A. Y. Kuo (2013), Using timescales to interpret dis- solved oxygen distributions in the bottom waters of Chesapeake Bay, Limno, Oceanogr., 58(6), doi:10.4319/lo.2013.58-06.0000.

Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation Interpreting Multivariate Data (pp. 21-36). Chichester: John Wiley.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Sievers, H. A., C. Calvete y N. Silva. 2002. Distribución de características físicas, masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR Fiordo 2), Chile. Cienc. Tecnol. Mar, 25(2): 17-43.

Sievers, H. & N. Silva. 2008. Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. En: N. Silva & S. Palma (eds.). Avances en el conocimiento océano-gráfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 53 – 58.

Silva N., C. Calvete & H. Sievers 1997. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero Cimar Fiordo 1). Cienc. Tecnol. Mar, 20: 23 - 106.

Silva N., C. Calvete M. & H. A. Sievers 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y laguna San Rafael, Chile (Crucero CIMAR Fiordo 1). Cienc. Tecnol. Mar, 21: 17-48.

Silva, N., S. Palma. 2006. Producción científica del Programa CIMAR en los canales y fiordos Australes. Cruceros CIMAR 1 a 4 Fiordos, pp. 145-162. En:N. Silva& S. Palma (eds.). Avances en el Conocimiento oceanógrafico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanógrafico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 162 pp

Silva, N. & A. Valdenegro. 2008. Caracterización oceanográfica de canales australes chilenos entre la boca del Guafo y los canales Pulluche – Chacabuco (CIMAR 8 fiordos). Cienc. Tecnol. Mar., 31 (1): 05 – 44.

Silva N, Vargas CA., 2014. Hypoxia in Chilean Patagonian fjords. Prog Oceanogr.;129:62–74.

Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A description of the advanced research WRF version 3. In: NCAR Technical Note (475). p. 125.

Valdenegro A & N Silva. 2003. Caracterización oceanográfica física y química de la zona de canales y fiordos australes de Chile entre el estrecho de Magallanes y cabo de Hornos (CIMAR 3 fiordo).Ciencia y Tecnología del Mar 26(2): 19-60.

Valle-Levinson, A., Sarkar, N., Sanay, R., Soto, D., León, J., 2007. Spatial structure of hydrography and flow in a Chilean Fjord, Estuario Reloncaví. Estuaries and Coasts 30 (1), 113–126.

Viero, DP., Defina, A.,2016. Water age, exposure time, and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow. Journal of Marine Systems, Volume 156, p. 16-29.

Visser, A.W., 1997. Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. Marine Ecology Progress Series 158, 275–281

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP

INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.

Walker, S.J., 1999. Coupled hydrodynamic and transport models of Port Phillip Bay, a semi-enclosed bay in south-eastern Australia. Australian Journal of Marine and Freshwater Research 50, 469e481

Wilson, R. E., R. L. Swanson, and H. A. Crowley (2008), Perspectives on long-term variations in hypoxic conditions in western Long Island Sound, J. Geophys. Res., 113, C12011, doi:10.1029/2007JC004693.

Zhang, W.G., Wilkin, J.L., Schofield, O.M.E., 2010. Simulation of water age and residence time in New York Bight. J. Phys. Oceanogr. 40, 965–982.

Zimmerman, J.T.F., 1976. Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea. Part I: Distribution or salinity and calculation or mixing time scales. Neth. J. Sea Res. 10 (2), 149–191.

CONVENIO DESEMPEÑO 2019: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP INFORME FINAL: DETERMINACION DE LAS ESCALAS DE INTERCAMBIO DE AGUA EN FIORDOS Y CANALES DE LA REGION DE LOS LAGOS Y REGION DE AYSEN DEL GENERAL CARLOS IBAÑEZ DEL CAMPO.