



INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2016:

Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte
Hidrodinámico, al interior del Estero Elefante XI Región de
Aysén

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / AGOSTO 2017

INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2016:

Modelación de Alta Resolución Aplicada al
Transporte Hidrodinámico, al interior del Estero
Elefante XI Región de Aysén

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / AGOSTO 2017

REQUIRENTE

**SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y
EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO**

Subsecretaria de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Natalia Piergentili Domenech

EJECUTOR

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Director Ejecutivo
Leonardo Nuñez Montaner

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

JEFE PROYECTO

Gabriel Soto Soto

AUTORES

Gabriel Soto Soto
Elías Pinilla Matamala
Marcela Arriagda

COLABORADORES

Oliver Venegas
Patricio Salas
Manuel Moya
Cesar Loncón

RESUMEN EJECUTIVO

Como parte del convenio de desempeño entre Subsecretaría de económica y EMT y el IFOP, se ejecutó durante el año 2016 y parte del 2017 el proyecto: "Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte Hidrodinámico, al interior del Estero Elefante XI Región de Aysén.

Debido a las brechas de conocimiento que aún existen desde el punto de vista de la oceanografía en la zona de canales, mares interiores y fiordos de la zona sur Austral, se requiere la identificación de los diferentes procesos y su influencia sobre los patrones de circulación, ya que esto se ha vuelto un asunto 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, junto con esto el desarrollo de la investigación enfocado a determinar las características oceanográficas, ha permitido la implementación de modelos numéricos para el estudio de amplias zonas geográficas. Este tipo de estudios tiene como una de sus ventajas la capacidad de extender los resultados de la medición y monitoreo puntual a un área geográfica mayor, con la capacidad de predecir su comportamiento en diferentes escenarios. Una de las formas de entender y poder predecir el comportamiento de un sistema marino es a través de modelos numéricos, estos son abstracciones de la realidad, por ello tienen errores al intentar simularla. En estudios anteriores ejecutados por IFOP en el ámbito de oceanografía y modelación, se han implementado y validado modelos a diferentes escalas y en distintas regiones de la zona sur austral de Chile, no obstante se hace necesario ampliar la cobertura de información oceanográfica detallada, sobre todo en zonas donde esta es aún insuficiente, como lo es el sector del estero Elefantes y sus fiordos adyacentes, lo que permitirá implementar y desarrollar modelos hidrodinámicos. Para esto el principal objetivo fue ampliar la cobertura de información oceanográfica para describir la dinámica en el sistema denominado estero Elefantes, (región de Aysén), con la finalidad de implementar y desarrollar un modelo hidrodinámico de alta resolución, utilizable en estimaciones de conexión y transporte entre áreas cercanas (centros de cultivos).

Para el desarrollo de este estudio se realizaron 4 campañas oceanográficas, las cuales comenzaron en agosto de 2016 y finalizaron en abril de 2017, en el sector denominado estero Elefante, incluyendo los fiordos Cupquelan y Quitralco. Durante estas campañas se realizaron mediciones de correntometría eulerianas en la columna de agua mediante la instalación de 5 ADCP lo cuales midieron los periodos agosto-diciembre y diciembre-abril. Junto a las líneas de anclaje de los ADCP, se instalaron sensores de conductividad, temperatura y oxígeno disuelto, para registros continuos de estos parámetros. También fueron instalados una serie de sensores de presión para determinar el nivel medio del mar, se instalaron 2 estaciones meteorológicas para medir las condiciones atmosféricas durante el periodo de estudio. Se efectuaron mediciones de ADCP remolcado con la finalidad de medir el flujo transversal de diferentes secciones seleccionadas. En cada uno de los cruceros oceanográficos se tomaron muestras discretas de agua para obtener información de clorofila total y nutrientes (nitrato, fosfato y silicato), en cada una de estas estaciones también se efectuó un registro de salinidad, oxígeno disuelto, temperatura, mediante la utilización de CTD.

Con la finalidad de extender la información espacial y temporal de las observaciones, se implementó un estudio de la dinámica oceanográfica junto al transporte de partículas mediante modelación numérica.

Mediante una asesoría externa, con investigadores de la Estación Patagonia de investigaciones Interdisciplinarias, perteneciente a la Pontificia Universidad Católica, se efectuaron mediciones en varios puntos de las sub-cuencas que desembocan en Bahía Exploradores, donde realizaron una caracterización de las cuencas del área de estudio utilizando sistemas de información geográfica, determinando atributos morfológicos básicos para las cuencas como la pendiente, área y porcentaje de superficie glaciada. Todo esto con la finalidad de realizar estimaciones volumétricas de caudal en 3 puntos diferentes de la cuenca perteneciente a bahía Exploradores, para establecer una aproximación de la cantidad de agua dulce que ingresa al sistema marino.

El análisis espectral junto con el análisis armónico realizado a las corrientes eulerianas mostró que estas son afectadas significativamente por el régimen de marea semidiurno (12.42 horas) y cuartidiurno (6.21 horas).

canal Costa y estero Elefante presentaron un importante efecto de la marea sobre las corrientes, siendo un más marcada en canal Costa. Mientras que entre los esteros Quitralco y Cupquellan se identificó una mayor influencia mareal en Quitralco, a mayor profundidad, y en Cupquellan se observó una mayor energía en las capas superiores, atribuible a la configuración batimétrica del sector.

Destacaron las diferencias en cuanto a las intensidades de la corriente ya que los esteros Quitralco y Cupquellan mostraron menores intensidades con respecto a canal Costa y Estero Elefantes.

Los resultados de ADCP remolcado en paso Tres Cruces mostraron que existiría un intercambio de agua entre estero Elefante y los canales contiguos

En el fiordo Quitralco se observó un comportamiento típico estuarino con agua superficial de salida atribuible a la descarga de agua dulce y agua subsuperficial de entrada asociada al efecto de la marea. El transecto efectuado en el estero Cupquellan se vio más influenciado por la cercanía con el estero Elefantes y sigue el mismo comportamiento con un flujo de agua superficial hacia el norte

La caracterización hidrográfica permitió distinguir zonas con una columna de agua con mayor uniformidad, en estas zonas se ubicaron las estaciones de canal Costa, Paso Tres Cruces, estero Elefante, golfo Elefante y Laguna San Rafael, entre las estaciones de la zona norte y la zona sur, se registraron intensos gradientes horizontales, tanto de salinidad, temperatura oxígeno disuelto y nutrientes, estos patrones se deben en primera instancia al efecto de la marea y el viento.

Las estaciones localizadas dentro del Fiordo Quitral y Cupquellan, en cambio, evidenciaron una columna de agua estratificada, con una capa superior que registró una alta variabilidad en salinidad temperatura, oxígeno disuelto y nutrientes, la segunda capa fue más profunda con una profundización variada y con una clara tendencia a la uniformidad y estabilidad de los parámetros anteriores descritos.

La columna de agua se observó en general bien oxigenada, no obstante destacan los niveles de hipoxia registrados en las series de tiempo de oxígeno disuelto en la capa de 90, dentro del Fiordo Quitralco, estos eventos estuvieron asociados a y/o acoplados a periodo de cuadratura, periodo en el cual la columna tiende a generar una estratificación más intensa y limitar el intercambio (aireación desde las capas más superficiales bien oxigenadas. También se señala que el fiordo presentó los mayores niveles de productividad primaria (concentración clorofila a), dentro de todos lugares y épocas

de estudio en el cual posibilita la acumulación y generación de materia orgánica. Si bien se indica que desde este punto de vista Fiordo Quitralco, podría ser considerada una zona sensible para el desarrollo de la acuicultura, los resultados son aun incipientes y requieren ser estudiados en más detalle, para determinar si esta condición es permanente dentro del fiordo, es estacional o solo fue un hecho particular.

La evaluación del modelo hidrodinámico ha demostrado una adecuada concordancia con una amplia gama de parámetros importantes tales como: nivel del mar, salinidad y corrientes en escalas de alta y baja frecuencia. La respuesta del modelo es capaz de representar las variaciones estacionales, y de corto plazo asociado al cambio del régimen de descarga de agua dulce y viento en una región con una costa extremadamente compleja. El forzamiento realista de la superficie del mar se logró mediante el desarrollo de un modelo meteorológico con una alta resolución espacial y temporal, que proporcionó una buena relación con los datos observacionales disponibles, especialmente en la presión atmosférica, velocidad y la dirección del viento.

Los patrones de circulación derivados de los resultados de modelación muestran una marcada respuesta de la marea, asociada al constituyente M2, esto fue posible notarlo en los fiordos Quitralco y Cupquelan y con mayor fuerza en el canal Elefantes. En la banda submareal aparece una señal de 15 días, asociada a periodos de sicigias. Por otra parte, es posible notar que en ciertos periodos el viento sopla hacia la cabeza de los fiordos generando una circulación superficial hacia el interior. Esto ya se ha observado en otros fiordos de Chile, como el Reloncaví. En este fiordo durante el invierno, el esfuerzo del viento se dirige principalmente fuera del fiordo, mientras que en verano se dirige al interior del fiordo, oponiéndose al flujo de salida superficial (Castillo, 2016).

La circulación media derivada del modelo entre los meses de septiembre de 2016 y Marzo de 2017, se encuentra determinada en buena medida por la gran cantidad de agua dulce proveniente principalmente desde Campo de Hielo Norte. Esto genera una capa superficial de salida desde los fiordos y canales interiores hacia el norte, este flujo puede llegar a ser muy intenso especialmente en canal Elefantes, dado su condición topográfica. Verticalmente la estructura de salinidad, se encuentra determinado por los distintos límites batimétricos que limitan el libre transporte de aguas más saladas hacia el interior, esto provoca que el fiordo Cupquelan tenga, relativo a otros fiordos de la Patagonia Norte, un contenido de sal relativamente más bajo que otros fiordos.

Los experimentos de transporte de partículas realizados como parte de este estudio permiten establecer zonas que son más proclives a recibir partículas y otras que más bien funcionan como zonas exportadoras. Entre el canal Costa y el paso Tres Cruces (parte norte de este sistema), se encuentra la zona que más conexiones recibe de todo el sistema, mientras que tanto el fiordo Quitralco, como Cupquelan, tienen las menores probabilidades de recibir conexiones de otras zonas. Este comportamiento es explicado por la circulación gravitacional, producto del gradiente de presión baroclínico, inducido por la gran cantidad de agua dulce que proviene de las descargas de agua dulce. La posibilidad de generar un cortafuego en canal Elefantes, libre de producción acuícola, minimizaría las posibles conexiones entre la parte sur y norte del sistema.

INDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	i
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE FIGURAS, TABLAS	v
1. ANTECEDENTES	1
2. OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo general	6
2.2 Objetivos específicos	6
3. METODOLOGÍA	7
3.1 Objetivo específico 2.2.1 Establecer las bases de un estudio que permitan cuantificar el aporte de agua dulce que ingresa al sistema del Estero Elefantes, con la finalidad de realizar la mejor aproximación del volumen de agua dulce que influencia el sistema estuarino estudiado.	7
3.2 Objetivo específico 2.2.2. Caracterizar oceanográficamente el área definida, mediante correntometría euleriana y lagrangiana, utilizando técnicas de ADCP y complementado con mediciones de boyas derivadoras, nivel del mar y registros meteorológicos.....	8
3.3 Objetivo específico 2.2.3. Realizar una caracterización hidrográfica con registros de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químico-biológicas, con la hidrodinámica del sistema.	16
3.4 Objetivo específico 2.2.4. Desarrollar modelos hidrodinámicos de alta resolución con el fin de generar una herramienta que permita estimar la capacidad del transporte del sistema.	17

4.	GESTIÓN DEL PROYECTO	22
4.1	Taller Importancia del agua dulce en la circulación estuarina (11/01/2016)	22
4.2	Reunión IFOP- SUBPESCA: 25/01/2016	22
4.3	Reunión investigadores UC, propuesta cuantificación de agua dulce: 06/07/2016.....	23
4.4	Compra de equipos oceanográficos: 28/03/2016.....	23
4.5	Licitación embarcación: (06/06/2016)	23
4.6	Solicitud datos oceanográficos SHOA: 23/09/2016.....	23
5.	RESULTADOS	
5.1	Objetivo específico 2.2.1	24
5.2	Objetivo específico 2.2.2	52
5.3	Objetivo específico 2.2.3	73
5.4	Objetivo específico 2.2.4	97
6.	DISCUSIÓN	120
7.	CONCLUSIONES	126
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

FIGURAS

TABLA

ANEXO

Anexo I Base datos

Anexo II Ecuaciones

Anexo III Derivadores

Anexo IV Evaluación estadística

ÍNDICE FIGURAS, TABLA y ANEXO

FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de transectos de ADCP remolcado (rojo).

Figura 2. Ubicación geográfica de la instalación de ADCP (Color rojo); estaciones Meteorológica (color verde); mareógrafos (color azul).

Figura 3. Ubicación geográfica señalando punto inicial de derivadores lagrangianos.

Figura 4: Modelo batimétrico basado en cartas náuticas SHOA.

Figura 5: Discretización horizontal del dominio con elementos triangulares variables.

Figura 6: Discretización vertical del dominio con combinación de capas sigma y rectangulares en una sección desde canal costa hasta el fiordo Cupquelán.

Figura 7: Dominio del modelo atmosférico WRF y ejemplo de la temperatura del aire a 2m

Figura 8: en color rojo las fuentes puntuales de ingreso de agua dulce.

Figura 9: Serie de tiempo de caudal diario en las cuatro secciones instrumentadas.

Figura 10. a) transecto efectuado en Paso Tres Cruces, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en paso Tres Cruces. (c) flujo residual (componente V) en paso Tres Cruces durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

Figura 11. a) transecto efectuado en Estero Quitralco, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Quitralco. (c) flujo residual (componente V) en estero Quitralco durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

Figura 12. a) transecto efectuado en Estero Elefante (frente isla Huemules), a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Elefante. (c) flujo residual (componente V) en estero Elefante durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

Figura 13. a) transecto efectuado en Estero Cupquelan (longitudinal), a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Cupquelan. (c) flujo residual (componente V) en estero Cupquelan durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

- Figura 14.** a) transecto efectuado en Estero Cupquellan (transversal), a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente V) en estero Cupquellan durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.
- Figura 15.** Adcp anclado estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016 (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.
- Figura 16.** a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 17.** Elipses de máxima varianza en las capas de 5-10-20-30-40-50-60-70-80m en estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 18.** Densidad espectral de la corriente. (a) Espectro de la componente U; (b) espectro de la componente V en estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 19.** Adcp anclado, paso tres Cruces, canal Costa entre septiembre y noviembre 2016. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.
- Figura 20.** a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En paso tres Cruces, canal Costa, entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 21.** Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70-80-90m en paso tres Cruces, canal Costa, entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 22.** Densidad espectral de la corriente. (a) Espectro de la componente U; (b) espectro de la componente V en paso tres Cruces, canal Costa, entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 23.** Adcp anclado Quitralco entre septiembre y noviembre 2016. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.
- Figura 24.** a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Quitralco entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 25.** Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70-80m en Quitralco entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 26.** Densidad espectral de la corriente. (a) Espectro de la componente U; (b) espectro de la componente V en Quitralco entre septiembre y noviembre 2016.

- Figura 27.** Adcp anclado Cupquelan entre septiembre y noviembre 2016. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal río exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.
- Figura 28.** a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Cupquelan entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 29.** Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70m en Cupquelan entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 30.** Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V en Cupquelan entre septiembre y noviembre 2016.
- Figura 31.** a) transecto efectuado en Paso Tres Cruces, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en paso Tres Cruces. (c) flujo residual (componente V) en paso Tres Cruces durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017.
- Figura 32.** a) transecto efectuado en estero Quitralco, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) estero Quitralco. (c) flujo residual (componente V) en estero Quitralco durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017.
- Figura 33.** a) transecto efectuado en Cupquelan longitudinal, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Cupquelan. (c) flujo residual (componente V) en estero Cupquelan durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017.
- Figura 34.** a) transecto efectuado en Cupquelan transversal, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero cupquelan durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017
- Figura 35.** Adcp anclado paso Tres Cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017. (a) anomalía del nivel del mar. (b) caudal río exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.
- Figura 36.** a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En Paso tres cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 37.** Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70-80m en Paso Tres Cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 38.** Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V en Paso Tres Cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017.

- Figura 39.** Adcp anclado estero Quitralco entre noviembre 2016 y marzo 2017. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal río exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.
- Figura 40.** a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Quitralco entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 41.** Elipses de máxima varianza en las capas de 5-10-20-30-40-50-60-70-80m en estero Quitralco entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 42.** Densidad espectral de la corriente. (a) Espectro de la componente U; (b) espectro de la componente V en estero Quitralco entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 43.** Adcp anclado estero Cupquellan entre noviembre 2016 y marzo 2017. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal río exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.
- Figura 44.** a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Cupquellan entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 45.** Elipses de máxima varianza en las capas de 5-10-20-30-40-50-60-70-80m en estero Cupquellan entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 46.** Densidad espectral de la corriente. (a) Espectro de la componente U; (b) espectro de la componente V estero Cupquellan entre noviembre 2016 y marzo 2017.
- Figura 47.** Batimetría zona de estudios
- Figura 48.** Distribución vertical de salinidad por sectores (micro-cuenca estero Elefante + micro-cuenca golfo Elefante), microcuenca fiordo Cupquellan y Quitralco.
- Figura 49.** Distribución vertical de temperatura por sectores (micro-cuenca estero Elefante + micro-cuenca golfo Elefante), microcuenca fiordo Cupquellan y Quitralco.
- Figura 50.** Distribución vertical de salinidad en Fiordo Cupquellan
- Figura 51.** Distribución vertical de salinidad en fiordo Quitralco
- Figura 52.** Diagrama Temperatura Salinidad (T-S) señalando el cuerpo de agua característico para: a) agosto b) octubre c) noviembre, d) marzo.

Figura 53. Parámetro de mezcla promedio para las diferentes micro-cuencas de la zona de estudio y para cada periodo.

Figura 54 . Posición geográfica de instalación sensores de temperatura, oxígeno disuelto y esquema de anclaje.

Figura 55. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados en canal Costa a 15 y 90 metros.

Figura 56. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados en bahía Eugenia a 15 y 90 metros.

Figura 57. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados en golfo Elefante a 3 y 8 metros.

Figura 58. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados fiordo Cupquelan a 10 y 90 metros.

Figura 59 Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados fiordo Quitalco a 15 y 90 metros.

Figura 60. Distribución vertical de oxígeno disuelto por sectores.

Figura 61. Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados en canal Costa a 15 y 90 metros.

Figura 62 Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados en bahía Eugenia a 15 y 90 metros.

Figura 63. Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados en golfo Elefante a 3 y 8 metros.

Figura 64 Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados fiordo Cupquelan a 10 y 90 metros.

Figura 65 Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados fiordo Quitalco a 15 y 90 metros.

Figura 66: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol}/\text{L}$) registrados en agosto.

Figura 67: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol}/\text{L}$) registrados en octubre.

Figura 68: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol}/\text{L}$) registrados en noviembre.

Figura 69: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol}/\text{L}$) registrados en marzo.

Figura 70: Mapa esquemático con la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas.

Figura 71: Serie de tiempo con valores modelados (rojo) y datos observados (azul) para la presión atmosférica en superficie entre el periodo 08/09/16 – 20/03/17. El panel superior corresponde a la estación Elefante Norte y el panel inferior a Elefante Sur. En la columna derecha se presentan los valores correspondientes a la evaluación estadística.

Figura 72. Serie de tiempo con valores modelados (rojo) y datos observados (azul) para la **componente U del viento** entre el periodo **08/09/16 – 20/03/17**. El panel superior corresponde a la estación Elefante Norte y el panel inferior a Elefante Sur. En la columna derecha se presentan los valores correspondientes a la evaluación estadística.

Figura 73. Serie de tiempo con valores modelados (rojo) y datos observados (azul) para la **componente V del viento** entre el periodo **08/09/16 – 20/03/17**. El panel superior corresponde a la estación Elefante Norte y el panel inferior a Elefante Sur. En la columna derecha se presentan los valores correspondientes a la evaluación estadística.

Figura 74: Rosas de viento para el periodo estudiado. Las observaciones se presentan en la columna izquierda y en la derecha lo simulado. Por otro lado la fila superior muestra el sector norte del Estero Elefante y la inferior el sector sur.

Figura 75: Comparación de las series de nivel del mar observadas y simuladas para el fiordo Quitralco y Cupquelán (arriba) y diagrama de dispersión con tabla de estadísticos (abajo).

Figura 76: Posición de los perfiles de salinidad para evaluación del modelo.

Figura 77: Perfiles de salinidad observados y modelados en las principales cuencas del sistema Elefantes.

Figura 78: Posición de ADCP para evaluación del modelo.

Figura 79: Componente V-Norte del viento (a), nivel del mar (b), caudal río Exploradores (c), componente V-Norte de la corriente del ADCP (d) y componente V-Norte de la corriente del modelo (e) en canal Elefantes.

Figura 80: Componente U-Este del viento (a), nivel del mar (b), caudal río Exploradores (c), componente U-Este de la corriente del ADCP (d) y componente U-Este de la corriente del modelo (e) en fiordo Quitralco.

Figura 81: Componente V-Norte del viento (a), nivel del mar (b), caudal río Exploradores (c), componente V-Norte de la corriente del ADCP (d) y componente V-Norte de la corriente del modelo (e) en fiordo Cupquelán.

Figura 82: Campo de corrientes superficial promedio obtenido del modelo hidrodinámico

Figura 83: Campo de salinidad superficial promedio obtenido del modelo hidrodinámico

Figura 84: Sección vertical de salinidad promedio desde el canal Costa hasta el fiordo Cupquelán obtenido del modelo hidrodinámico

Figura 85: Transectos utilizados en análisis de secciones verticales

Figura 86: Sección vertical de la componente V-Norte de la corriente a lo largo del canal Elefantes.

Figura 87: Sección vertical de la componente U-Este de la corriente a lo largo del fiordo Quitralco.

Figura 88: Sección vertical de la componente V-Norte de la corriente a lo largo del canal Cupquelán.

Figura 89: Condiciones de viento (WRF) y caudal de río para escenario de invierno (a) y verano (b) para dispersión de partículas.

Figura 90: Fuentes de dispersión de partículas asociadas a concesiones de acuicultura y separación de áreas para análisis.

Figura 91: Dispersión de partículas para la zona 1 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Figura 92: Dispersión de partículas para la zona 2 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Figura 93: Dispersión de partículas para la zona 2 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Figura 94: Dispersión de partículas para la zona 4 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Figura 95: Dispersión de partículas para la zona 5 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Figura 96: Comparación datos CTD, con sensor de oxígeno (panel superior). Serie de tiempo sensor oxígeno disuelto en fiordo Quitralco a 15 y 90 metros, junto a la anomalía sensor de presión (panel inferior).

Tablas

Tabla I. Detalle de mediciones de ADCP Remolcado en Octubre 2016 y marzo 2017.

Tabla II. Fase lunar en los meses de medición.

Tabla III. Mareógrafos y estaciones Meteorológicas instaladas en la zona de muestreo.

Tabla IV. ADCP instalados en la zona de muestreo

Tabla VI. Medición de nutrientes ríos que desembocan en Bahía Exploradores.

Tabla V Concentración de clorofila (mg/m^3) promedio, para los distintos periodos analizados

Tabla VI Medición de nutrientes ríos que desembocan en Bahía Exploradores

ANEXO

Anexo I Base datos

Anexo II Ecuaciones

Anexo III Derivadores

Anexo IV Evaluación estadística

1. ANTECEDENTES

1.1 Condiciones oceanográficas generales de la Patagonia chilena

La geografía patagónica es producto de la acción glacial acontecida principalmente en el cuaternario, estos eventos formaron una línea de costa desmembrada, caracterizada por fiordos profundos y canales que comunican numerosos cuerpos de agua (Araya-Vergara 1997, 1999 y 2006), particularmente la topografía submarina, se exhibe como irregular alternando conformaciones tipo cuencas explanadas de represamiento y cuencas explanadas tipo cubeta (Rodrigo, 2004).

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 serie 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 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 2006). De esta forma 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, pycnoclina, 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 (Godoy *et. al.*, 2008), 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 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 (Fuentes 2014).

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

Balace 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 su 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 salmonícolas 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 agua y las partículas contenidas en ella en suspensión, dilución o flotación. Dado que la conectividad implica el desplazamiento de masas de agua entre dos puntos (o parcelas de agua), 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 dicho 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

1.3 Implementación de medidas en la gestión de la acuicultura

Actualmente se lleva a cabo el desarrollo e implementación de múltiples medidas y normativas, las cuales están dirigidas a resolver los principales temas sanitarios y ambientales que afectan a la acuicultura. Entre estas medidas una de las de más amplio impacto es el establecimiento de macrozonas, concepto que conlleva un nivel de organización y control de cobertura y nivel superior a los barrios o agrupaciones de concesiones establecidas en versiones anteriores de la Ley de Pesca y Acuicultura. Uno de los efectos principales de este nuevo concepto de organización es la necesidad de establecer sectores en los cuales no deberá desarrollarse actividad de cultivos, especialmente salmónidos. Junto a esta situación se observa una constante evolución del conocimiento de la oceanografía en la zona sur austral, motivada por la necesidad de gestionar en forma sustentable el desarrollo de la industria acuícola. Este desarrollo ha mostrado la gran cantidad de complejidades de este ambiente, así como la dificultad de aplicar directamente herramientas complejas, tales como los modelos numéricos, a la solución de problemas ambientales, sanitarios y productivos. Es así como se torna clara la necesidad de mejorar dichas herramientas así como también potenciar el uso de los productos generados por ellas, proveyendo a la autoridad de utilidades que permitan dicha gestión. Las posibilidades de aumentar el conocimiento en estos sectores y mejorar la administración por parte del estado hacen imprescindible la ejecución de esfuerzos mayores en la mejora de las herramientas disponibles, en la diversificación de sus usos y en la obtención de información de línea base de dichas áreas. La investigación para proveer esta información debe comenzar por la descripción del medioambiente físico, especialmente su dinámica y variabilidad espacial y temporal como base para la comprensión y manejo sustentable del medio ambiente. Sin embargo, la gran extensión y difícil acceso de la zona sur austral dificultan su estudio. Debido a esto se han priorizado áreas de interés, seleccionado en este estudio el Estero Elefante y sus alrededores (fiordos y canales).

El desarrollo de la investigación enfocado a determinar la dinámica estuarina, ha permitido la implementación de modelos numéricos para el estudio de amplias zonas geográficas. Este tipo de estudios tiene como una de sus ventajas la capacidad de extender los resultados de la medición y monitoreo puntual a un área geográfica mayor, con la capacidad de predecir su comportamiento en diferentes escenarios.

Una de las formas de entender y poder predecir el comportamiento de un sistema marino es a través de modelos numéricos, estos son abstracciones de la realidad, por ello tienen errores al intentar simularla. Cualquier modelo de predicción intenta simular los múltiples procesos que producen cambios en un sistema, por lo tanto, su objetivo es comprender estos procesos y predecir los efectos en los cambios e interacciones (Kamga *et al*, 2000). La simulación se realiza mediante la descripción de un sistema en términos de leyes físicas, por consiguiente, un modelo numérico está compuesto por una serie de ecuaciones que expresan estas leyes (Kalnay *et al*, 1998). Siempre existen desviaciones entre lo simulado y lo real, que se corrigen a medida que las simulaciones avanzan y se contrastan contra lo real, ajustando a posteriori los datos, y volviendo a ejecutar las simulaciones. Es un proceso de retroalimentación, sin el cual, sería muy imprudente tomar como certeras las predicciones realizadas (Jolliffe *et al*, 2003).

Existen múltiples experiencias de modelamiento hidrodinámico en sistemas similares a la Patagonia Chilena como los fiordos Escandinavos o Canadienses. De especial interés es el experimento NorKyst-800 (Albretse *et al*, 2011) el cual, es un sistema de modelamiento hidrodinámico basado en ROMS para las zonas costeras de Noruega. El dominio de este modelo cubre toda la costa de Noruega con una resolución de 800 m. Funciona como un dominio madre para ejecuciones de alta resolución en zonas particulares.

En proyectos anteriores ASIPA en el ámbito de oceanografía y modelación, se han implementado y validado modelos a diferentes escalas y en distintas regiones de la zona sur austral de Chile, pero aun se hace necesario ampliar la cobertura de información oceanográfica detallada en zonas donde esta es aún insuficiente, como lo es el sector del estero Elefantes y sus fiordos adyacentes, lo que permitirá implementar y desarrollar modelos hidrodinámicos en estas zonas, ya que esta ha presentado brotes de virus ISA. Además el área seleccionada para este estudio se encuentra afectada por derramamiento del Campo de Hielo Norte (46.3° S - 47.5° S), ya que sus principales cuencas vierten directamente a través de la laguna San Rafael, fiordo Cupquelan y golfo Elefantes, influenciando directamente a los canales y fiordos localizados dentro el mar interior de la región de Aysén, debido a que el agua dulce es el principal forzante de la circulación estuarina, para realizar un adecuada caracterización oceanográfica de este sistema, en este estudio se dará especial énfasis en abordar metodologías que permitan efectuar una mejor aproximación sobre los volúmenes de agua dulce que ingresan al sistema, junto con integrar información químico-biológica para determinar el comportamiento de estos parámetros asociado a la hidrodinámica.

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

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Ampliar la cobertura de información oceanográfica para describir la dinámica en el sistema denominado estero Elefantes, XI región, con la finalidad de implementar y desarrollar un modelo hidrodinámico de alta resolución, utilizable en estimaciones de conexión y transporte entre áreas cercanas (centros de cultivos).

2.2. Objetivos específicos

- 2.2.1** Establecer las bases de un estudio que permitan cuantificar el aporte de agua dulce que ingresa al sistema del Estero Elefantes, con la finalidad de realizar la mejor aproximación del volumen de agua dulce que influencia el sistema estuarino estudiado.
- 2.2.2** Caracterizar oceanográficamente el área definida, mediante correntometría euleriana y lagrangiana, utilizando técnicas de ADCP y complementado con mediciones de boyas derivadoras, nivel del mar y registros meteorológicos.
- 2.2.3** Realizar una caracterización hidrográfica con registros de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químico-biológicas, con la hidrodinámica del sistema.
- 2.2.4** Desarrollar modelos hidrodinámicos de alta resolución con el fin de generar una herramienta que permita estimar la capacidad del transporte del sistema.

3. METODOLOGÍA

3.1 **Objetivo específico 2.2.1** *Establecer las bases de un estudio que permitan cuantificar el aporte de agua dulce que ingresa al sistema del Estero Elefantes, con la finalidad de realizar la mejor aproximación del volumen de agua dulce que influencia el sistema estuarino estudiado.*

Dado que, dentro del área de estudios seleccionada para el desarrollo del presente estudio oceanográfico, no existen cuantificación de fuentes de agua dulce, por entidades pública tal como DGD u otro tipo entes gubernamentales o privados, considerando además la complejidad, que se ha presentado en estudios anteriores, se decidió abordar la cuantificación y/o aproximación del agua dulce que ingresa al sistema Elefante, mediante una asesoría externa, con investigadores de la Estación Patagonia de investigaciones Interdisciplinarias, perteneciente a la Pontificia Universidad Católica, se efectuaron mediciones en varios puntos de las sub-cuencas que desembocan en Bahía Exploradores.

Para la determinación de este objetivo el consultor propuso la siguiente metodología.

Caracterización morfológica cuencas área de estudio

A partir de un modelo de elevación digital de 30 metros (Aster DEM, 2011), se realizó un procesamiento con sistemas de información geográfica (SIG) para generar una delimitación topográfica de cuencas. Se seleccionaron 15 macro-cuencas con un área mínima de drenaje de 50 km². Para estas cuencas se realizó un análisis de cobertura de suelo en base al Catastro de Uso de Suelo de CONAF, 2013 en complemento con la cartografía de base del IGM 1:50,000, 2009. Del análisis de cobertura de suelo se obtuvo la superficie de cada cuenca cubierta por hielo y glaciares lo que permite conocer la influencia del agua de deshielo sobre los caudales promedios mensuales. Utilizando el mismo modelo de elevación digital, se re-definieron micro-cuencas en función de los puntos de medición de terreno. Las mediciones se realizaron en cuencas de distinto tamaño y con distinta proporción de superficie glaciada para tener buena representatividad de los distintos tipos de cuenca del área de estudio. Se tomaron mediciones en once secciones (cuatro instrumentadas y siete no instrumentadas). Para éstas once micro-cuencas se realizó nuevamente un análisis de cobertura de suelo.

Mediciones de nivel hidrométrico.

En terreno se instalaron tres sensores Levellogger Edge, que registraron el nivel hidrométrico en función de la presión hidrométrica, y los correspondientes barómetros para compensar por la presión atmosférica. Los sensores fueron instalados en la primera campaña de terreno entre el 23 y 27 de agosto

Adicionalmente, se utilizan los registros obtenidos con el primer sensor instalado por la Estación Patagonia UC el 24 de noviembre de 2015. Este sensor cuenta con la serie de tiempo más larga, lo que resultó esencial para los análisis de este estudio ya que permitieron conocer con mayor certeza el régimen hidrológico o la distribución del caudal promedio anual a lo largo de los meses del año (caudal promedio mensual).

Mediciones de caudal

Se tomaron mediciones en once secciones utilizando un perfilador de corriente acústico doppler (ADCP marca SonTek, modelo RiverSurveyor® S5). En cada sección se tomaron tres mediciones de calado (velocidad [m/s] x profundidad[m]) para obtener un promedio por sección de caudal [m³/s] en el momento específico.

Se realizaron mediciones de caudal en cada una de las visitas a terreno y luego se calculó un promedio mensual para cada sección. Con los datos disponibles se estima un caudal promedio anual, el cual se distribuye en meses de mayor caudal (verano) y meses de menor caudal (invierno). La distribución, o régimen hidrológico, se obtiene de las series de tiempo nivel hidrométrico, en especial de Río Exploradores I, y se asume que es la misma para todas las cuencas. Lo que varía es la cantidad de caudal (relacionado con el área total de la cuenca) y el aumento de caudal en verano producto del porcentaje de superficie de la cuenca glaciada.

Construcción de relaciones empíricas

A partir de los datos de nivel hidrométrico y las mediciones puntuales de caudal (calado) se construyen relaciones empíricas entre nivel hidrométrico y calado, o curvas de gasto (Objetivo #6). Estas curvas de gasto son relaciones lineales que sirven para obtener estimaciones del caudal en fechas durante las que no se ha medido directamente, pero sí se cuenta con los datos registrados con los sensores hidrométricos. Las curvas de gasto permiten generar una serie de tiempo de caudal diario (m³/s). Con las curvas de gasto y conociendo el régimen hidrológico de las cuencas en el área de estudio, fue posible estimar los caudales promedios anual y distribuirlos en caudales promedios mensuales.

Modelación de caudales en macro-cuencas

En general, el área de una cuenca es la principal variable que determina cuánto caudal es generado por una cuenca anualmente, aunque existen otras variables que influyen. Conociendo los datos de caudal promedio se genera una regresión entre caudal promedio y área de la cuenca para modelar esta relación e identificar cuánto caudal puede explicarse por el área total de la cuenca en el área de estudio. Luego, se calcula una estimación del caudal específico, o caudal promedio anual (m³/s) generado por área de cuenca (km²). Con estos valores se genera una segunda regresión entre caudal específico y porcentaje de la cuenca glaciada para estimar la influencia de las masas de hielo sobre las crecidas estivales en los ríos del área de estudio.

El coeficiente de determinación (r^2) de una regresión refleja el ajuste de los datos empíricos al modelo de relación entre nivel hidrométrico y caudal. El coeficiente determina la proporción de los resultados que puede explicarse por el modelo y la calidad del modelo para replicar los resultados. Ambas regresiones (caudal-área total; caudal específico-porcentaje de área glaciada) muestran buen ajuste, por lo que se decide ocupar estas regresiones para modelar información sobre caudales de las macro-cuencas que desembocan en el Estero Elefantes.

Con las regresiones generadas es posible extrapolar y estimar caudal promedio anual generado por las macro-cuencas seleccionadas. Destacamos que la metodología utilizada entrega una aproximación y no una medida exacta de caudales anuales generados por las macro-cuencas que aportan al Estero Elefantes. Se ocupa el régimen hidrológico, conocido principalmente a través de la estación de medición en Exploradores I (serie de tiempo más larga), para distribuir el caudal

promedio anual en los doce meses de años. Esta distribución también es una aproximación y se basa en los datos disponibles de solo una temporada.

3.2 Objetivo específico 2.2.2 *Caracterizar oceanográficamente el área definida, mediante correntometría euleriana y lagrangiana, utilizando técnicas de ADCP y complementado con mediciones de boyas derivadoras, nivel del mar y registros meteorológicos.*

3.1.1 Campañas oceanográficas

Es importante señalar que se dio especial énfasis a cubrir un área geográfica, que en estudios anteriores de modelación de alta resolución no pudieron ser cubiertas, por ende se consideró el área de Estero Elefante y alrededores como Fiordo Quitralco, Fiordo Cupquelan, Laguna San Rafael. (**Figura 3**). En esta área seleccionada se realizarán 4 cruceros, para cubrir una variabilidad temporal intra-anual.

a) ADCP remolcado

Se efectuaron mediciones de corrientes en la columna de agua mediante ADCP remolcado. Seleccionando secciones transversales a los principales canales del área de estudio (**Figura 1**) en octubre de 2016 y marzo del 2017.

Para la realización de este estudio, se efectuaron mediciones con un ADCP en tiempo real, a través de un sistema remolcado del ADCP, utilizando para ello un perfilador acústico Doppler (ADCP) RDI Workhorse Sentinel de 150 kHz. Este equipo fue configurado con la opción Bottom Tracking, que permitió medir las corrientes durante un track de navegación a tiempo real por 24 hrs. El equipo fue fijado en un costado de la embarcación, remolcado y orientado hacia el fondo marino, a una velocidad inferior a 5 nudos. Los tracks de navegación fueron posicionados mediante GPS Garmin 60cx. Los datos fueron almacenados inmediatamente en un archivo en el computador. Los intervalos de medición se realizaron cada 5 segundos. Mientras que los ensambles son promediados cada 30 segundos. Información más detallada del muestreo viene adjunta en la **Base de Datos (ANEXO I)** junto con un archivo PDF explicativo del ADCP y las variables que se obtienen. En tanto la fecha, duración, tamaños de celda, otras informaciones, junto con la fase lunar (Sicigia y Cuadratura) de cada experimento se detallan en las **Tablas I y II**. En este último caso se definió la fase de sicigia / cuadratura como 2 días antes y 2 días después del evento, en tanto los días exentos son llamados fase intermedia.

Las mediciones de ADCP remolcado fueron utilizadas para extraer la corriente residual, definida como aquella parte de la corriente que queda después de eliminar las señales de frecuencia cuartidiurna, semidiurna y diurna durante uno o más ciclos de marea (Tee, 1977). Para esto, los datos de compás del ADCP fueron corregidos siguiendo el método de Joyce (1989) y los datos erróneos de velocidades fueron eliminados siguiendo el procedimiento explicado por Valle-Levinson & Atkinson (1999). La señal cuartidiurna, representada por la constituyente M4 con un periodo de

6.21; la semidiurna de la marea, M2 con un período de 12,42 horas, y la señal diurna, representada por la constituyente K1 con un período de 23,93 horas, fueron separadas de la señal submareal de los componentes del flujo observado usando un análisis de regresión sinusoidal de mínimos cuadrados (Lwiza *et al.*, 1991). La señal submareal representó el flujo residual o promedio de estas dos componentes armónicas para el período de mediciones. Finalmente, en caso de ser necesario, los datos de velocidad fueron rotados en la dirección de más alta variabilidad. Una información más detallada de las ecuaciones empleadas en el cálculo de las corrientes residuales viene dada en el ANEXO II.

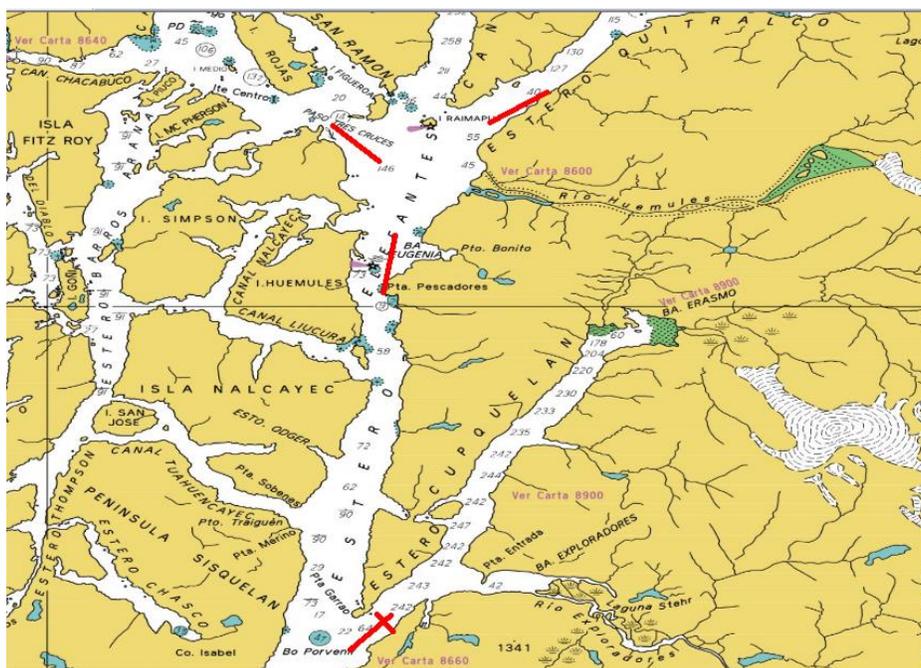


Figura 1. Ubicación geográfica de transectos de ADCP remolcado (rojo).

Tabla 1.
Detalle de mediciones de ADCP Remolcado en Octubre 2016 y marzo 2017.

a) ADCP Remolcado campaña estero Elefante octubre 2016													
Sector	fecha	tiempo (hr)	repeticiones	tamaño celda (m)	intervalo medición (s)	promedio cada ensamble (s)	desv. Estandar σ	cms- longitud "W	latitud" S	longitud "W	latitud "S	longitud "W	latitud "S
Paso tres cruces	24-10-2016	6	6	4	5	30	7.44	73.6923	45.7883	73.6425	45.8263		
Quitralco	26-10-2016	24	23	4	5	30	7.44	73.4628	45.7516	73.5238	45.7846		
E.Elefante	28-10-2016	12	10	4	5	30	7.44	73.6379	45.9664	73.6253	45.9056		
Cupquelan Long	30-10-2016	12	11	8	5	30	3.68	73.6736	46.3494	73.6291	46.3118		
Cupquelan trans	31-10-2016	12	28	8	5	30	3.68	73.6445	46.3105	73.6277	46.3292		
b) ADCP Remolcado campaña estero Elefante marzo 2017													
Paso tres cruces	24-3-2017	24	25	2	5	30	27.29	73.6941	45.785	73.6431	45.8288		
Quitralco	25-3-2017	24	30	4	5	30	13.86	73.5188	45.7834	73.4652	45.7507		
Cupquelan Long	30-3-2017	13	18	4	5	30	13.86	73.6285	46.3113	73.6728	46.3487		
Cupquelan trans	31-3-2017	12	36	4	5	30	13.86	73.6422	46.3097	73.6277	46.3299		

Tabla 2.
Fase lunar en los meses de medición.

mes	Luna Nueva	Cuarto Creciente	Luna Llena	Cuarto Menguante
octubre 2016	30	9	16	22
marzo 2017	27	5	12	20

a) ADCP Anclado

Se realizaron mediciones de correntometría eulerianas en la columna de agua entre canal Costa, estero Elefantes y los esteros Cupquelan y Quitralco. Para esto se efectuaron 4 anclajes de ADCP a media agua y un anclaje a fondo en modo auto contenido con un intervalo de grabación de 10 minutos entre los meses de **septiembre a noviembre (primera etapa) y de noviembre a marzo (segunda etapa)**, para ello se emplearon 4 ADCP RDI 300kHz y un 1 ADP Sontek 500kHz. Es importante mencionar que debido a una falla del equipo en la segunda medición no se presentaron datos del ADCP instalado en bahía Eugenia, Estero Elefantes.

Una información más detallada de cada anclaje, como el tamaño de la celda y el blank, ente otros, se encuentra en la base de datos (**ANEXO I**) en un archivo denominado 'metadata'.

Como primera parte del procesamiento de los datos se procede a eliminar las capas superiores, que se encuentran afectadas por las variaciones del nivel del mar. Posteriormente para efecto de análisis y dado que estos instrumentos se refieren en forma original a la dirección del norte magnético, los registros son corregidos por la desviación magnética terrestre, indicada para la zona de estudio, quedando los datos referidos al norte geográfico. Después de corregir la dirección de la corriente se calcularon sus componentes ortogonales U (este) y V (norte), que son rotadas siguiendo los ejes de máxima y mínima variabilidad.

Para determinar la dirección a lo largo de la cual la corriente oscila se calcularon los ejes de máxima varianza (EMV) por medio de un análisis de las componentes principales, que describen la información de un conjunto de variables observadas mediante un conjunto de variables más pequeñas y que se obtiene de la descomposición en valores propios (autovalores) y vectores propios (autovectores) de la matriz de covarianzas.

Con el fin de obtener una visión más clara de la corriente dentro de la columna de agua se graficaron los perfiles promedio y máximo de la magnitud, así como los perfiles promedio de las componentes ortogonales U (este) y V (norte).

En el análisis en el dominio de la frecuencia se utilizó la técnica propuesta por de Bendat y Piersol (1986). Las series se dividieron en trozos o segmentos de igual tamaño, con cada segmento se calculó un espectro, el cual se promedia para cada frecuencia (Emery & Thomson, 1998). Puesto que cada estimación espectral posee una distribución χ^2 con dos grados de libertad, los grados de libertad del espectro promedio son dos veces el número de trozos (Bendat & Piersol, 1986). En estos registros se empleó 12 grados de libertad.

Finalmente, se calcularon los flujos residuales, con el objetivo de separar las oscilaciones de marea de aquellas fluctuaciones asociadas a un forzamiento distinto a la marea. Para ello cada componente de la corriente horaria (U y V) fue filtrada con un filtro de paso bajo Lanczos de 121 pesos y un periodo de corte de 40 horas, utilizando programas de Matlab ya preparados. Por otra parte y de manera análoga a las mediciones de ADCP remolcado, a los registros de corrientes se les realizó un análisis armónico, utilizando como entrada el algoritmo de Pawlowicz (2002a) el vector complejo de la forma $\mathbf{w} = (\mathbf{u} + \mathbf{vi})$. El algoritmo utilizado para estimar la amplitud y fase se basa en el algoritmo descrito por Godin (1972), Foreman (1977) y Foreman (1978). Por lo tanto se definió la corriente total (VT) asociada a la corriente directa medida por el ADCP, es decir, la corriente por marea más la componente residual (vr) asociada a otros mecanismos (viento, topografía, inercial, etc.).

Asociados a estas mediciones Se instalaron 4 mareógrafos en los canales de interés. Para caracterizar los procesos atmosféricos se instalaron 2 estaciones meteorológicas midiendo dirección, velocidad del viento, humedad y precipitación, estas estaciones se transmitirán en línea los registros de los parámetros señalados de manera permanente.

La cantidad de equipos y sus respectivas mediciones se resumen en **Tabla III y Tabla IV** mientras que la posición se muestra **Figura 2**.

Tabla III
Mareógrafos y estaciones Meteorológicas instaladas en la zona de muestreo.

Equipo	latitud S	longitud W	fecha instalación	fecha retiro
mareógrafo	-45,73831	-73,59242	27-08-2016	23-03-2017
mareógrafo	-45,76233	-73,75292	28-08-2016	23-03-2017
mareógrafo	-45,64662	-73,27493	31-08-2016	25-03-2017
mareógrafo	-46,08911	-73,41702	01-08-2016	30-03-2017
E. Meteo	-45,80319	-73,64299	28-08-2016	23-03-2017
Meteo	-46,55523	-73,92371	02-09-2016	29-03-2017

Tabla IV.
ADCP instalados en la zona de muestreo

ADCP	Lugar	Fecha instalación	fecha cambio batería	latitud/longitud	fecha retiro	Profundidad (m)	Tipo fondeo
ADP Sontek	Pta Sobenes/estero Elefantes sur	30 -08-2016	24-11-2016	-46.20555 -73.67547	28-03-2017	70	FONDO
RDI 300	Canal Costa (paso Tres cruces/I. Raimapu)	27-08-2016	22-11-2016	-45.80254 -73.61397	23-03-2017	90	MEDIA AGUA
RDI 300	Estero Quitralco	29-08- 2016	23-11-2016	-45.74736 -73.45151	26-03-2017	90	MEDIA AGUA
RDI 300	b. Eugenia /estero Elefante norte	30-08-2016	23-11-2016	-45.89606 -73.62037	28-03-2017 Fallo en equipo	90	MEDIA AGUA
RDI 300	Cupquelan	1-9-2016	24-11-2016	-46.29811 -73.60006	31-03-2017	90	MEDIA AGUA

3.3 Objetivo específico 2.2.3 Realizar una caracterización hidrográfica con registros de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químico-biológicas, con la hidrodinámica del sistema.

Para caracterizar la hidrografía del área seleccionada, en cada uno de los cruceros oceanográficos, se realizaron estaciones de CTDO, (salinidad, Temperatura, oxígeno disuelto). Para complementar la caracterización en la columna de agua se tomaron muestras de aguas a profundidades discretas localizando los máximos de clorofila mediante el fluorómetro del CTD, en estas profundidades también se tomaron muestras de agua para nutrientes (nitrato, fosfato, silicato) y biomasa fitoplanctónica (clorofila). Los análisis de nutrientes y clorofila total fueron realizados en el laboratorio del CIEP en Coihayque, las metodologías utilizadas se detallan a continuación:

- Clorofila y feopigmentos: Determinación Fluorométrica Standard Methods 21 St Edition, 2005.
- Nitrato: 4500 NO₃-E Standard Methods 21 St Edition, 2005.
- Fosfato: 4500 P –E Standard Methods 21 St Edition, 2005.
- Silicato: Strickland & Parson, 1972.

Para cuantificar los grados de mezcla o estratificación vertical, basados en la salinidad, se utilizó el parámetro de estratificación ns , siguiendo los procedimientos detallado en (Haralambidou *et al.*, 2010), posteriormente se promediaron los valores obtenidos para cada perfil vertical en cada una de secciones verticales y se obtuvo un valor promedio para cada sección y para cada periodo estacional. El parámetro se obtiene de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$ns = - \frac{(Sf - Ss)}{(Sf + Ss) * 0.5}$$

Donde Sf: salinidad de fondo, Ss: salinidad superficial. El valor del parámetro considera que cuando $ns < 0.1$ la columna de agua se encuentra completamente mezclada, $ns > 0.1$ indica que en la columna de agua se produce una mezcla parcial, $ns > 1$ la columna de agua está bien estratificada.

Además, fue implementado un sistema de sensores de oxígeno, conductividad y temperatura, para obtener series de tiempo de estas variables, en la capa superficial y en zonas más profundas (60-80m) aprox. Los sensores fueron instalados por un periodo similar al de ADCP anclados.

Debido a un problema con los valores de los registros de conductividad (valores inconsistentes), en el presente informe solo se analizaron los registros de oxígeno disuelto y temperatura.

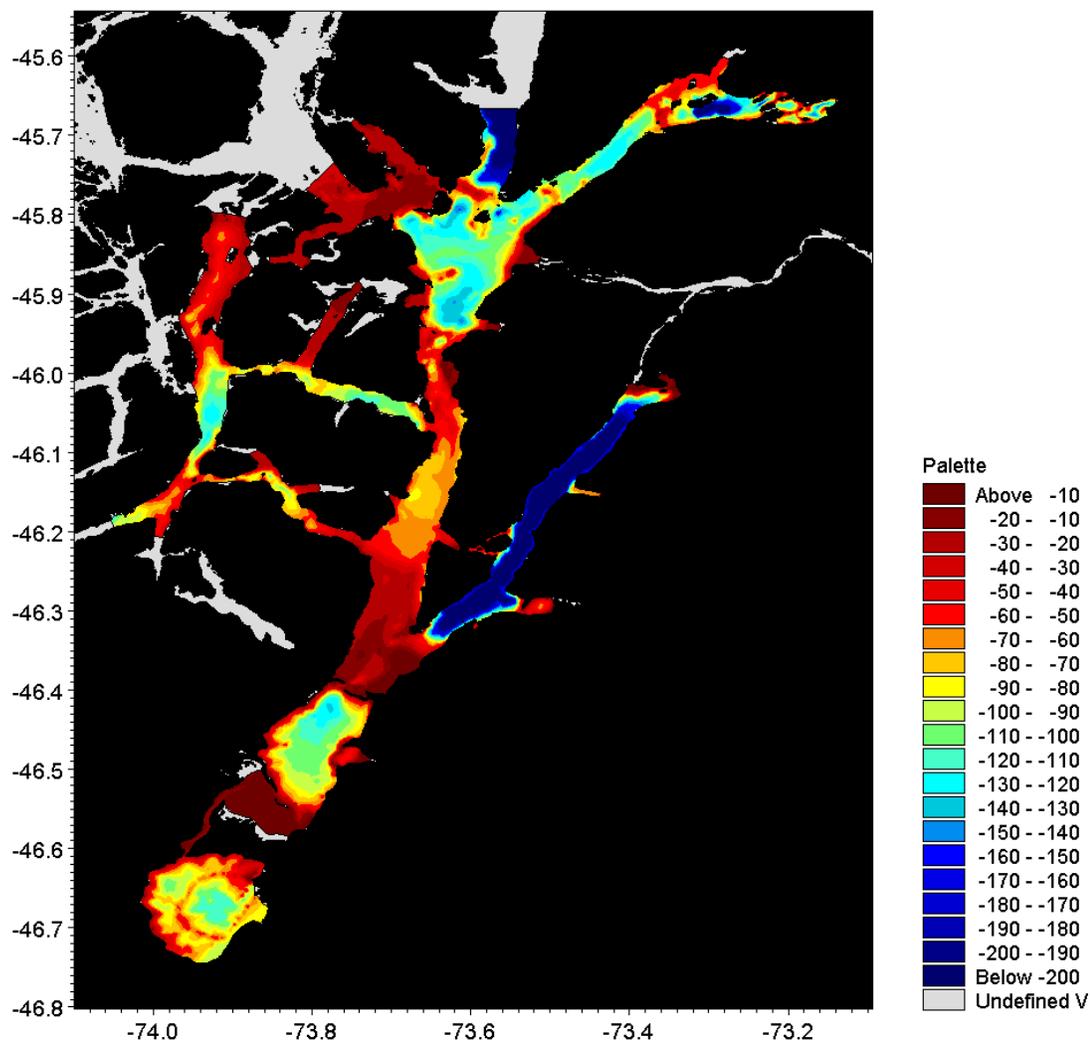
Para las muestras de agua se dio énfasis en medir zonas próximas a la desembocadura de las principales cuencas de la zona de estudio. Y en algunas estaciones donde estudios anteriores (CIMAR-Fiordos) realizaron mediciones similares con el fin de realizar una comparación.

3.4 Objetivo específico 2.2.4 *Desarrollar modelos hidrodinámicos de alta resolución con el fin de generar una herramienta que permita estimar la capacidad del transporte del sistema.*

Se utilizó un modelo hidrodinámico 3D de volumen finito, con el propósito de simular la circulación en fiordos y canales del sistema marino del campo de Hielo Norte, con el fin de determinar los patrones de circulación generales de área. El modelo utilizado es MIKE 3 FM (DHI, 2016). Este modelo resuelve desde el punto de vista matemático, la ecuación de conservación de la masa, las ecuaciones de Navier-Stokes incluyendo el efecto de turbulencia y variación de la densidad, junto con el transporte de temperatura y sal. Para mayor detalles de la ecuaciones utilizadas ver el manual de MIKE 3 FM (DHI, 2016).

a) Dominio del modelo

El dominio del modelo está ubicado al norte del Campo de Hielo Norte, región de Aysén, entre los paralelos 45.6°S y 46.8°S y meridianos 72.1°W a 74.1°W (**Figura 4**). La batimetría pertenece a compilación de cartas náuticas SHOA. El Modelo batimétrico fue generando mediante una interpolación por el método del vecino natural.



4: Modelo batimétrico basado en cartas náuticas SHOA.

El modelo utiliza elementos triangulares flexibles para discretizar el espacio, obteniéndose de esta forma diferenciación en zonas de mayor interés. La resolución alcanza entre 100 m. a 1000 m. (Figura 5). Siendo los sectores más someros aquellos que tienen una mayor resolución y viceversa. Para la discretización vertical del dominio fueron utilizadas 45 capas, para los primeros 25 metros desde la superficie se usaron 25 capas sigmas regulares de 1 m. y bajo esa profundidad hasta el fondo fueron usadas 20 capas en coordenadas rectangulares de grosor variable, siendo de mayor tamaño a medida que se hace más profundo (Figura 6). Se utiliza esta configuración con al finalidad de mantener un grosor del capas constantes en la parte superficial y para evitar pendientes abruptas en capas sigma, esto otorga una mejor representación de los proceso de estratificación y mezcla.

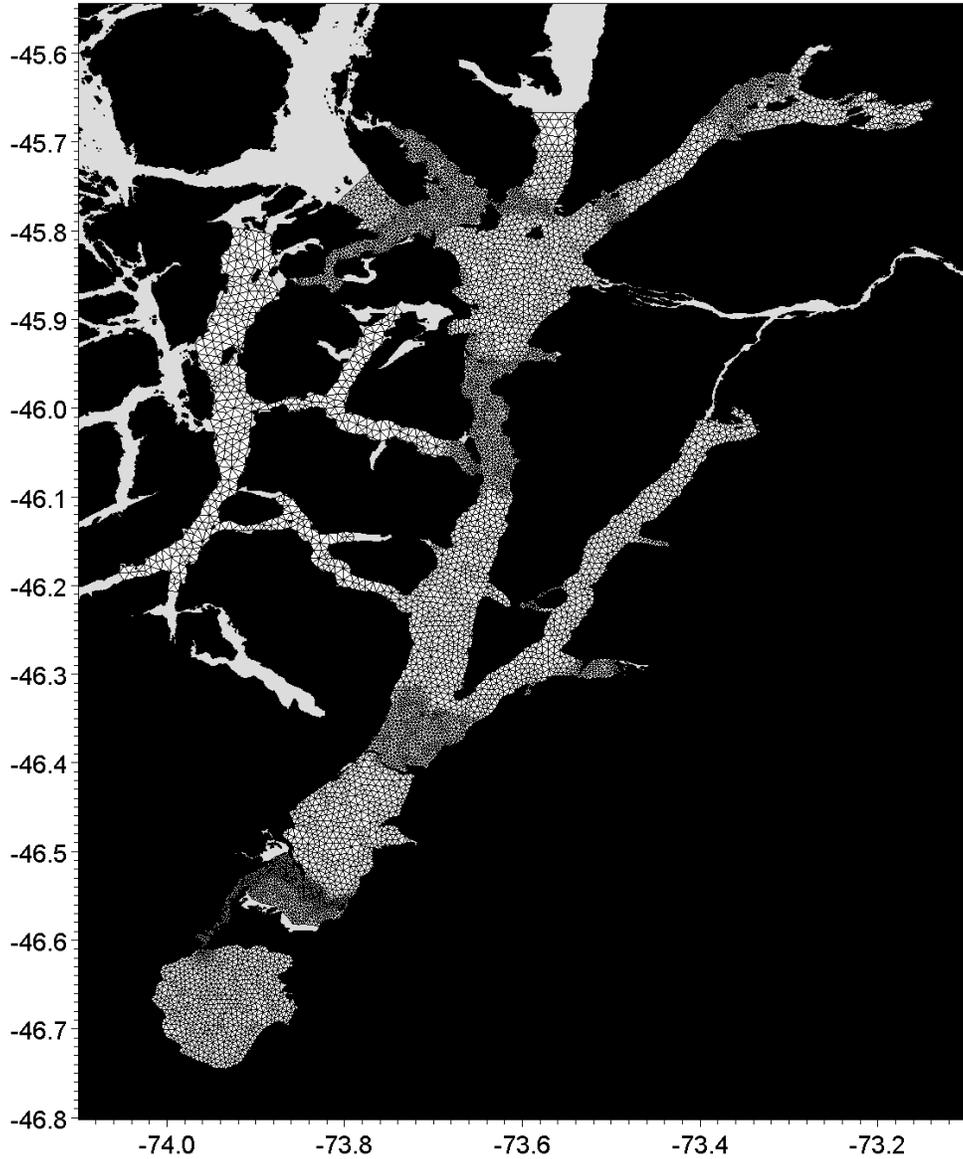


Figura 5: Discretizaci3n horizontal del dominio con elementos triangulares variables.

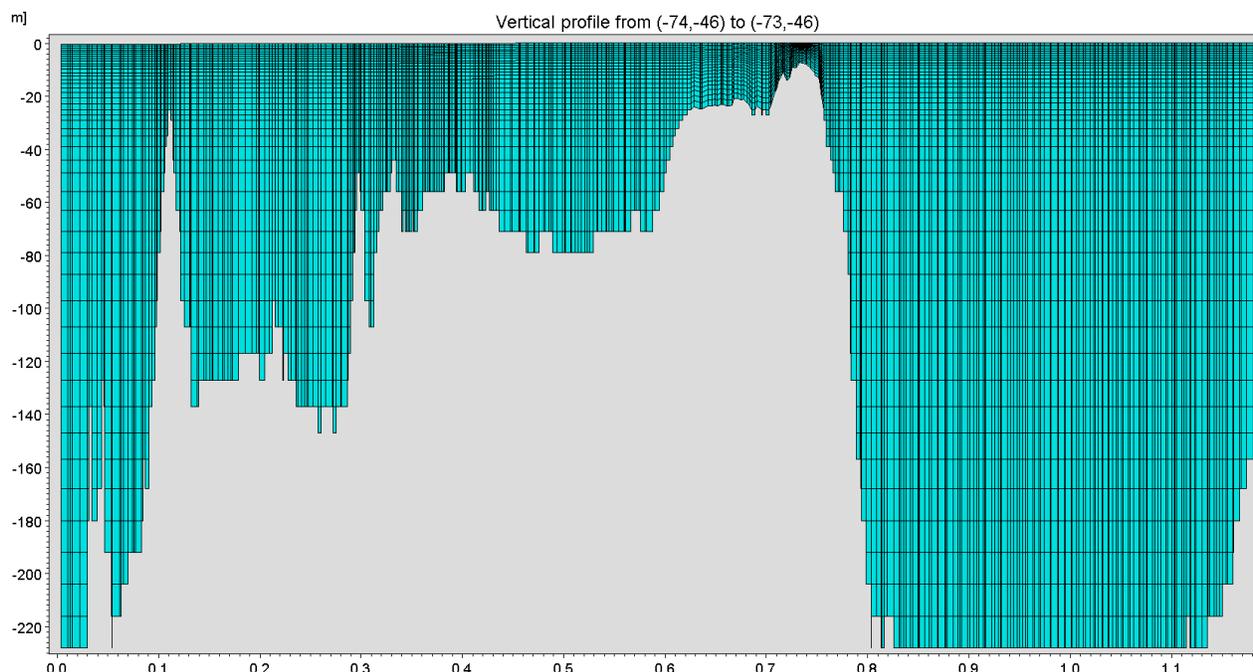


Figura 6: Discretización vertical del dominio con combinación de capas sigma y rectangulares en una sección desde canal costa hasta el fiordo Cupquelán.

b) Condiciones iniciales y de borde

Las condiciones iniciales de temperatura y salinidad son derivadas de las campañas de CTD realizadas durante este proyecto, de manera que los datos de perfiles de T y S son interpolados tanto horizontal como verticalmente. Tanto la corriente como el nivel del mar comienzan la simulación desde un campo nulo. Las condiciones de borde de T y S, también son derivadas de las 4 campañas oceanográficas, generando así una variación temporal de estas condiciones. El nivel del mar en los bordes es generado por datos de mareógrafos ubicados en cada uno de los bordes durante todo el periodo (septiembre 2016 – marzo 2017).

c) Forzante atmosférico

Se utilizó el modelo regional de la atmósfera Weather Research and Forecasting (WRF), logrando una reducción de escala de modelos globales. De esta manera, procesos meteorológicos locales son representados de mejor forma, como la circulación local del viento, ya que en gran parte, es controlada por las características geomorfológicas del terreno. Esto fue posible mediante dominios anidados, los cuales siguieron una relación de 1/5 cada dominio hijo con respecto al padre. Se establecieron tres dominios, uno padre y dos hijos. El primero corresponde al padre, con resolución espacial de 5km. El segundo corresponde al primer dominio anidado con resolución horizontal de 1km. Finalmente, que corresponde al segundo y último dominio hijo, conteniendo desde los canales Costa y Errazuriz, hasta la Laguna San Rafael (**Figura 7**). La fuente de datos topográficos utilizada pertenece a la USGS incorporada en el modelo WRF, con ~1km de resolución horizontal para todos

los dominios. Finalmente el modelo se alimentó con datos iniciales y de frontera resultado del modelo global de la atmósfera FNL, proporcionados por el National Center for Environmental Prediction (NCEP), con resolución horizontal de ~25km.

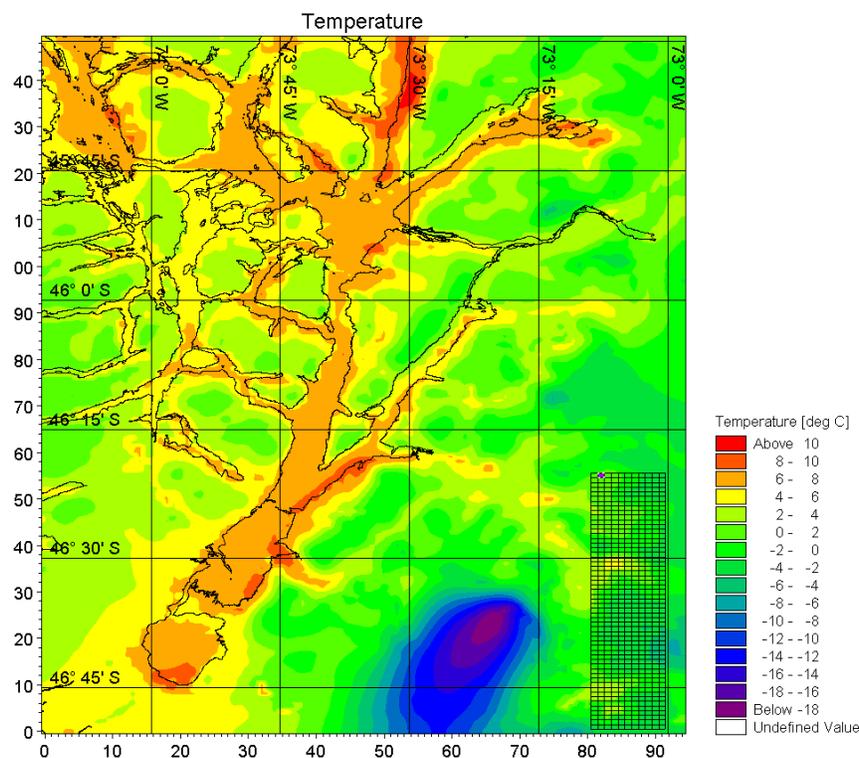


Figura 7: Dominio del modelo atmosférico WRF y ejemplo de la temperatura del aire a 2m.

d) Agua dulce

Los datos de caudal de los principales ríos utilizados en el modelo provienen del estudio detallado en el Objetivo 1. El caudal promedio que ingresó al sistema marino durante el periodo de agosto de 2016 a abril de 2017, como suma de todas las fuentes puntuales, alcanza un valor de $1024 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, siendo el río Exploradores y río Témpanos (Laguna San Rafael) quienes aportan cada uno con aproximadamente un 25% del total (**figura 8**).

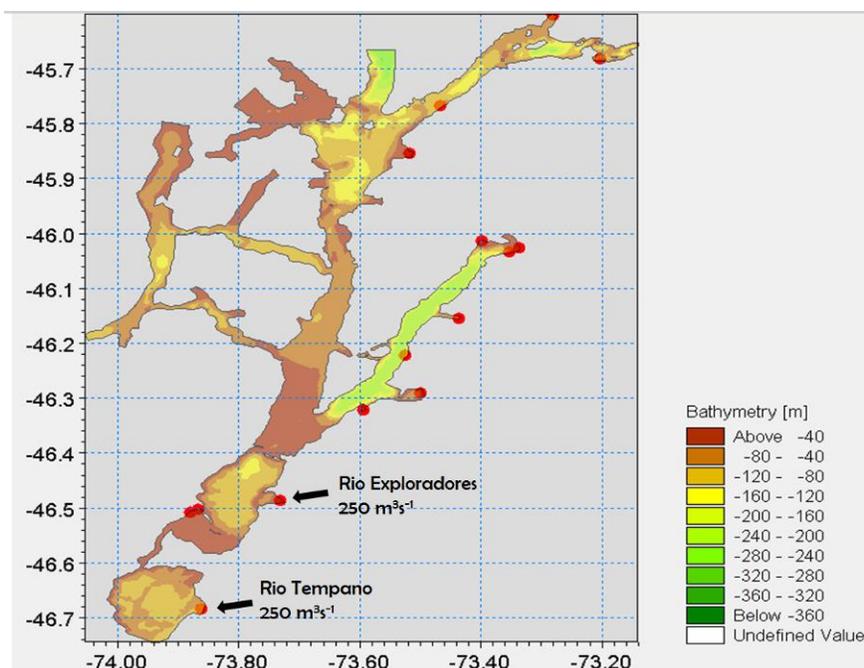


Figura 8: en color rojo las fuentes puntuales de ingreso de agua dulce.

Evaluación modelo hidrodinámico:

Para evaluar el desempeño de los modelos hidrodinámicos se utilizarán herramientas cualitativas, las cuales miden la capacidad del modelo de reproducir situaciones temporales, estructuras, y la conducta del sistema en general, y por otro lado se usarán herramientas cuantitativas, basadas en la descripción del fenómeno a través de parámetros estadísticos.

Entre las herramientas cualitativas según Murphy (1993), existen a lo menos 3 características que pueden definir una buena simulación.

Consistencia: Es el grado para el cual el pronóstico corresponde al mejor juicio sobre una situación dada, es decir que no se generen contradicciones, basados en un conocimiento base.

Calidad: Es el grado para el cual el pronóstico corresponde a lo que sucede realmente, es decir, la concordancia entre la predicción y la observación.

Valor: Es el grado para el cual el pronóstico ayuda a tomar una decisión, que se materializa en algún incremento o en algún otro beneficio.

Las evaluaciones se realizaron para verificar el comportamiento del modelo en distintas bandas de frecuencias, principalmente en la escala mareal y submareal (residual), para el último caso, los datos fueron filtrados utilizando un filtro paso bajo coseno de Lanczos de 40 horas de corte y 121 pesos (Walter y Heston, 1982; Thompson, 1983), con el fin de quitar la frecuencias asociadas a la marea.

También es presentada una evaluación cualitativa del perfil medio de la corriente. Las evaluaciones presentan un especial interés en la capa superficial de la columna de agua, por ser estas capas mayormente asociadas a actividades de acuicultura.

Los índices estadísticos para medir la **calidad** del modelo son:

- Error Medio Cuadrático (RMSE): es una medida cuadrática que mide la media de la magnitud del error, no muestra la dirección de las desviaciones.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{mo del,i})^2}{n}}$$

En donde,

- x = dato del pronóstico
- y = dato de la observación
- n = número de datos.

- Coefficiente de Correlación: es una medida estadística que trata de medir la relación entre 2 variables, oscila entre -1 y 1, siendo el signo, la dirección (proporcional o inversamente proporcional) y la cifra la magnitud de la relación.

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

Cov_{xy} = covarianza entre el modelo y la observación,

S_x = desviación estándar del modelo

S_y = desviación estándar de la observación.

- El índice de Concordancia (d): Representa la relación entre el error cuadrático medio y el error potencial (Willmot, 1984) y se define como:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

- P = dato del pronóstico
- O = dato de la observación
- n = número de datos.

La posibilidad de error en el denominador representa el valor más grande que la diferencia al cuadrado de cada par puede alcanzar. Los rangos van desde 0 a 1.

Escenarios Simulación de transporte de partículas

Acoplado al modelo hidrodinámico se implementó un modelo lagrangiano de transporte de partículas pasivas. El modelo simuló 2 grandes escenarios estacionales basados en la variabilidad observada en la zona durante las campañas oceanográficas realizadas. Estos escenarios están basados en la simulación de condiciones reales generadas en el modelo, estas son:

Invierno (Septiembre de 2016): Periodo de simulación caracterizado por un menor aporte de agua dulce y por un viento soplando hacia fuera de los fiordos. A estas dos condiciones se les suma tanto una condición de cuadratura, como de sicigias con el fin de evaluar el transporte por efecto de la marea.

Verano: Caracterizado un aumento de los caudales de los ríos y con una intensificación en la dirección del viento (hacia el interior de los fiordos). A estas dos condiciones se les suma tanto una condición de cuadratura, como de sicigias con el fin de evaluar también el transporte por efecto de la marea.

El modelo de transporte utiliza partículas pasivas, es decir, que estas no responden a alguna condición del medio para cambiar su comportamiento, solo responden al transporte advectivo otorgado por el modelo hidrodinámico. En cuanto a la referencia vertical hay tres definiciones disponibles para el posicionamiento vertical de una fuente.

- Profundidad (positiva hacia abajo desde la superficie del agua)
- Sobre el fondo (positivo hacia arriba en relación con el fondo marino)
- Datum (nivel absoluto)

Para este estudio se definió una condición de profundidad de 5 m desde la superficie del agua, por tanto, la partícula se moverá verticalmente tanto como varíe el nivel de superficie de agua, respecto al Datum o nivel absoluto, pero no considera el movimiento por corrientes en la coordenada vertical (z).

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1. Taller Importancia del agua dulce en la circulación estuarina: metodologías para abordar la cuantificación en sistemas de fiordos y canales de la Patagonia: 11/enero/2016

Fecha: 11 enero 2016

Ubicación: Salón de reuniones Hotel Los Ñires, Coyhaique.

Objetivo del Taller: exponer la importancia del agua dulce en los sistemas de fiordos y canales Australes, en la circulación hidrodinámica, dar a conocer las problemáticas en las metodologías de cuantificación del agua dulce, discutir aspectos relevantes en las metodología sobre cuantificación de agua dulce, que permitan ser incorporadas en el desarrollo de la modelación hidrodinámica realizada por IFOP. Finalmente se realizó la presentación de este proyecto, explicando los principales alcances.

Expusieron investigadores IFOP, e invitados externos. Además se contó con la participación de Jefe de División Acuicultura IFOP, Jefatura departamento medio Ambiente IFOP, consultoras ambientales, representantes SERNAPESCA, Representantes Seremi Medio Ambiente, autoridades Gobierno Regional y profesionales DGA.

4.2 Reunión Investigadores IFOP personal Subpesca: 4/03/2015

- Fecha: 25 de enero de 2016.
- Ubicación: Sala de reuniones dependencia CTPA IFOP castro,
- Participantes:

Susana Giglio	Subpesca
Gabriel Soto	IFOP
Elías Pinilla	IFOP

Objetivo de la reunión: Detallar los detalles de las mediciones, señalar las principales problemáticas, como los relacionados con los flujos de agua dulce, se indican la incorporación de información biogeoquímica a las mediciones de la hidrodinámica y los registros con series de tiempo (oxígeno disuelto, conductividad y temperatura).

4.3 Reunión investigadores UC para abordar determinación flujos de agua dulce en área de interés: 6/7/2016.

Las limitaciones actuales en el desarrollo de la modelación hidrodinámica, tiene como una de las principales fuentes de error, la cuantificación de agua dulce que ingresa al sistema marino. Esto puede ser separado en aportes de ríos y agua dulce que ingresa por efecto de deshielo glaciar en forma directa al sistema marino. Para poder abordar este tema, se ha requerido la asesoría externa de profesionales dedicados a temas de cuantificación y desarrollo en metodologías de cuantificación de agua dulce.

Reunión

Fecha: 6 de julio de 2016
Ubicación: Facultad de Geografía Pontificia Universidad Católica de Chile
Participantes:
 Alejandro Salazar B. Encargado Estación Patagonia de investigaciones Interdisciplinarias
 Luca Mao Geomorfologo investigador Facultad de agronomía UC
 Gabriel Soto IFOP

Objetivo de la reunión: Presentar a los investigadores UC, las problemáticas, de los diferentes proyectos de oceanografía ejecutados por IFOP, y la relación con los flujos de agua dulce y de cómo abordar los diferentes aportes (glaciares, fluviales, nivales, pluviales, etc) al sistema de fiordos y canales de Patagonia chilena.

Investigadores UC detallan una propuesta técnica, con mediciones en tres ríos que desembocan en bahía Exploradores (Estero Elefante), cada uno de estos ríos pertenece a una sub-cuenca con régimen diferente.

4.4 Compra de equipos oceanográficos (sensores de conductividad/temperatura y oxígeno disuelto: 28/03/2016

El Instituto de Fomento Pesquero, en el marco del proyecto “Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte Hidrodinámico, al interior del Estero Elefante XI región de Aysén. Realiza la compra de sensores de conductividad, temperatura y presión, además de sensores de oxígeno disuelto. Los sensores serán utilizados para generar series de tiempo en cada una de estas variables.

4.5 Licitación embarcación: 6/06/2016

El Instituto de Fomento Pesquero, en el marco del proyecto “Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte Hidrodinámico, al interior del Estero Elefante XI región de Aysén”, llama a licitación pública a armadores, personas naturales y jurídicas, para la contratación de embarcación menor destinada al transporte de personal.

Las bases aparecen publicadas en los siguientes diarios

- 1.- El Llanquihue de Puerto Montt (circulación X región)
- 2.- La Prensa de Aysén (circulación XI región)

Los servicios fueron Adjudicado a embarcación ANAMACO, perteneciente a armador Gloria Chijani Ojeda.

4.5 Solicitud formal a SENDHOC de datos oceanográficos (cartas náuticas digitalizadas): 23/09/2016

En el mes de septiembre Investigadores unidad de oceanografía, solicitaron formalmente cartas náuticas digitalizadas, para fines científicos a la unidad encarga del Servicio Hidrográfico de la Armada (SHOA), con la finalidad de utilizar las batimetrías para construcción del DEM, como información requerida para el desarrollo de los modelos hidrodinámicos.

5. RESULTADOS

5.1 **Objetivo 2.2.1** Establecer las bases de un estudio que permitan cuantificar el aporte de agua dulce que ingresa al sistema del Estero Elefantes, con la finalidad de realizar la mejor aproximación del volumen de agua dulce que influencia el sistema estuarino estudiado.

La información de nivel hidrométrico fue obtenida con los sensores instalados que registraron datos de manera continua. Los datos fueron rescatados en cada visita a terreno y posteriormente procesados en gabinete. Los tres sitios en los cuales se instalaron sensores para este estudio son el Río Circo, el Río Exploradores II (sector bajo), y el Río Sur. Adicionalmente se presentan los datos del sensor instalado previamente en Exploradores I (antes de la confluencia de tres ríos).

En la Figura 4 se muestran las series de tiempo de caudal diario (m^3/s) para las cuatro secciones instrumentadas. Además se generaron datos empíricos de nivel hidrométrico y los caudales modelados a través de las curvas de gasto establecidas. Las interrupciones entre abril y mayo de 2016 para la sección de Exploradores I reflejan momentos en que el caudal del río bajo mucho y el sensor hidrométrico, al no estar sumergido, dejó de registrar datos válidos. En general se observó una clara distribución de régimen hidrológico con caudales mayores en los meses de verano producto de mayor precipitación en forma líquida en conjunto con aguas de deshielo, y caudales menores en los meses de invierno cuando no hay deshielo y la precipitación es principalmente en forma de nieve en zonas de montaña. En el anexo bases de datos, se entrega el informe del asesor, junto a los datos de medición.

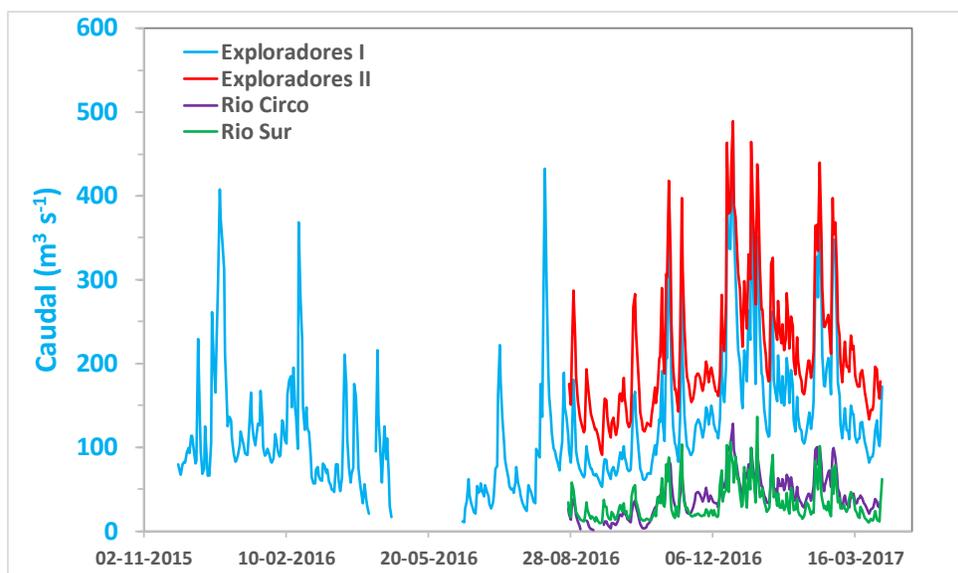


Figura 9: Serie de tiempo de caudal diario en las cuatro secciones instrumentadas.

5.2 Objetivo 2.2.2. *Caracterizar oceanográficamente el área definida, mediante correntometría euleriana y lagrangiana, utilizando técnicas de ADCP y complementado con mediciones de boyas derivadoras, nivel del mar y registros meteorológicos.*

caracterización oceanográfica, periodo septiembre-noviembre 2016

Mediciones ADCP remolcado

Los resultados residuales en la mayoría de los transectos se observaron en las componentes residuales U-este y V-norte para obtener una mejor definición de lo que ocurre con la dirección del flujo. Es importante describir que el flujo positivo (rojo) en V se dirige al norte y positivo en U se dirige al Este. También es importante mencionar, que los resultados del ADCP en punta Sobones no fueron incluidos, ya que los datos arrojados presentaban valores erróneos y el equipo debió ser enviado a mantención.

Tres cruces (figura 10a)

En los resultados de flujo residual del paso Tres Cruces (**figura 10b y 10c**). Se llegó a establecer que existe un flujo más cercano entre el vértice A y ~2km en dirección de salida (al oeste) con intensidades que llegan a los 30 cm s⁻¹. Mientras que en la mayor parte del transecto entre los 2km y 5km se observó un flujo de entrada al este con intensidades de 10 cm s⁻¹.

Estero Quitralco (figura 11a)

El flujo residual en el estero Quitralco (**figura 11b y 11c**) presentó una capa superficial de salida hacia el estero Elefante y una capa subsuperficial de entrada proveniente del estero Elefante. Cabe destacar la presencia de un sill, el que en su parte más somera llega hasta los 30m de profundidad, y que actúa sobre el intercambio de agua más profunda modificando y disminuyendo el flujo. En general las intensidades no superaron los 5cm s⁻¹.

Isla Huemules/estero Elefante (figura 12a)

En el flujo residual que atraviesa en forma longitudinal el estero Elefante frente a la isla Huemules (**figura 12b y 12c**) se observó una primera capa ubicada entre la superficie y los 60 m de profundidad en dirección norte. Por debajo de esta capa se observaron flujos en dirección sur. Las intensidades observadas llegan hasta los 30cm s⁻¹. La presencia de un sill cercano al vértice B claramente interrumpe el intercambio del flujo de mayor profundidad.

Estero Cupquelan Longitudinal (figura 13a)

El flujo residual en las afueras del estero Cupquelan (**figura 13b y 13c**) identificó una capa superficial que se dirigió al noreste, con una mayor profundización en el vértice A (más cercano a la boca del estero) y con intensidades de 10cm s⁻¹. Por debajo de esta capa se observó una capa de agua profunda en dirección suroeste con leves intensidades. Tal configuración del flujo superficial podría ser atribuida a la influencia del viento.

Estero Cupquelan Transversal (figura 14a)

El flujo residual transversal en la boca del estero Cupquelan (**figura 14b**) evidenció al igual que el transecto longitudinal una capa superficial en dirección norte, una capa de agua intermedia en dirección sur y una tercera capa con flujos al norte. En general Las intensidades no superaron los 5cm s^{-1} .

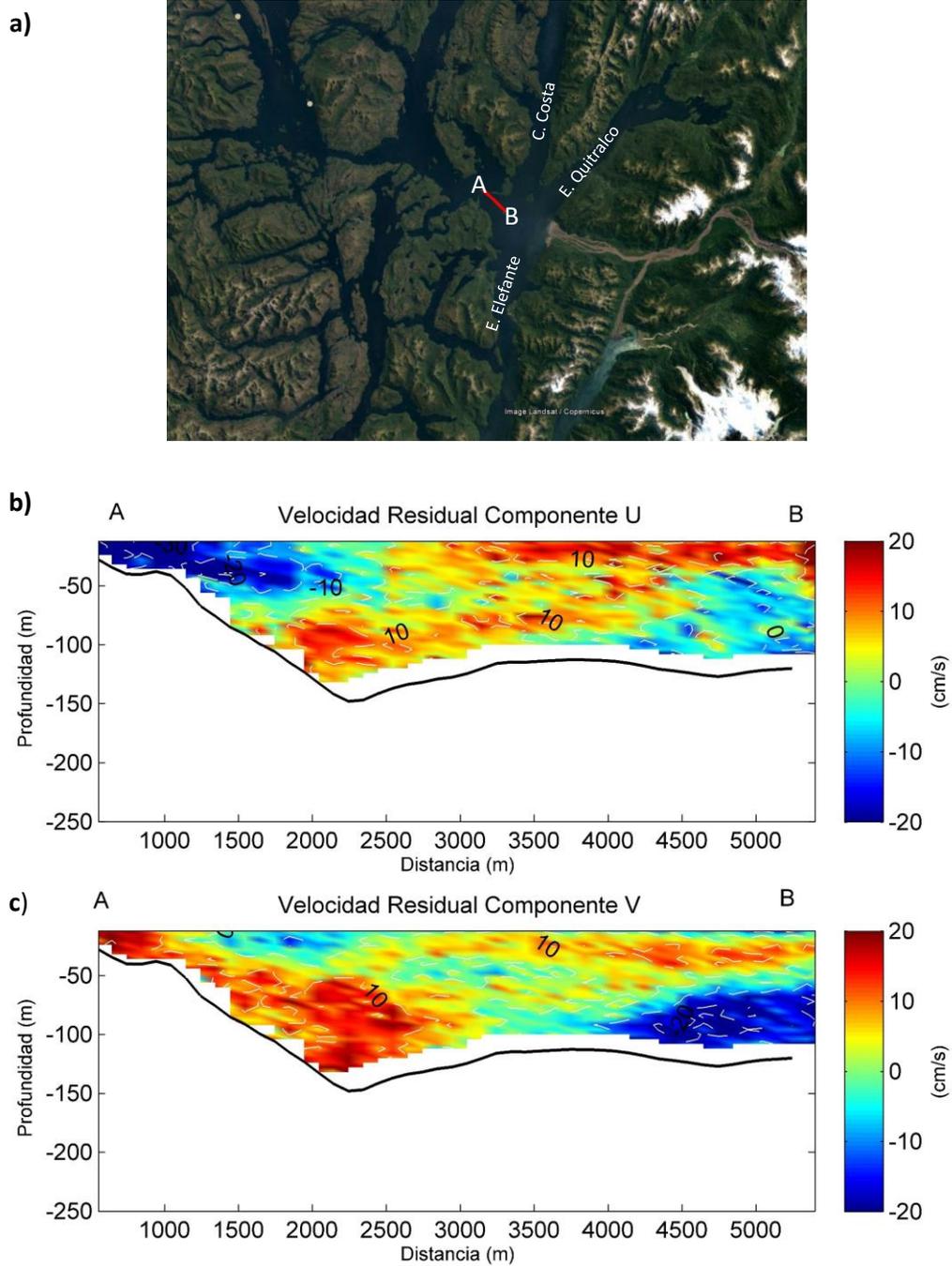


Figura 10. a) transecto efectuado en Paso Tres Cruces, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en paso Tres Cruces. (c) flujo residual (componente V) en paso Tres Cruces durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

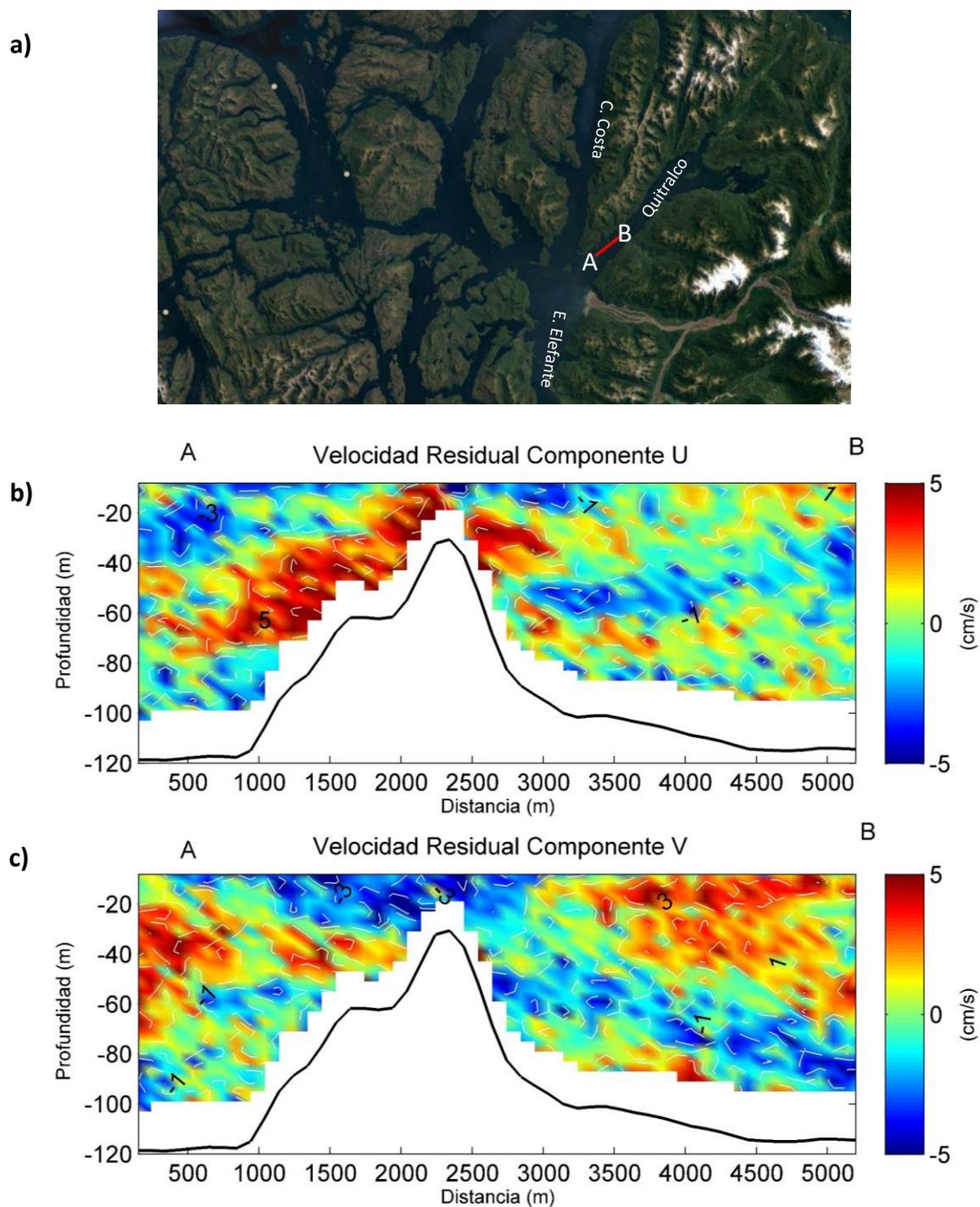


Figura 11. a) transecto efectuado en Estero Quitrалco, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Quitrалco. (c) flujo residual (componente V) en estero Quitrалco durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

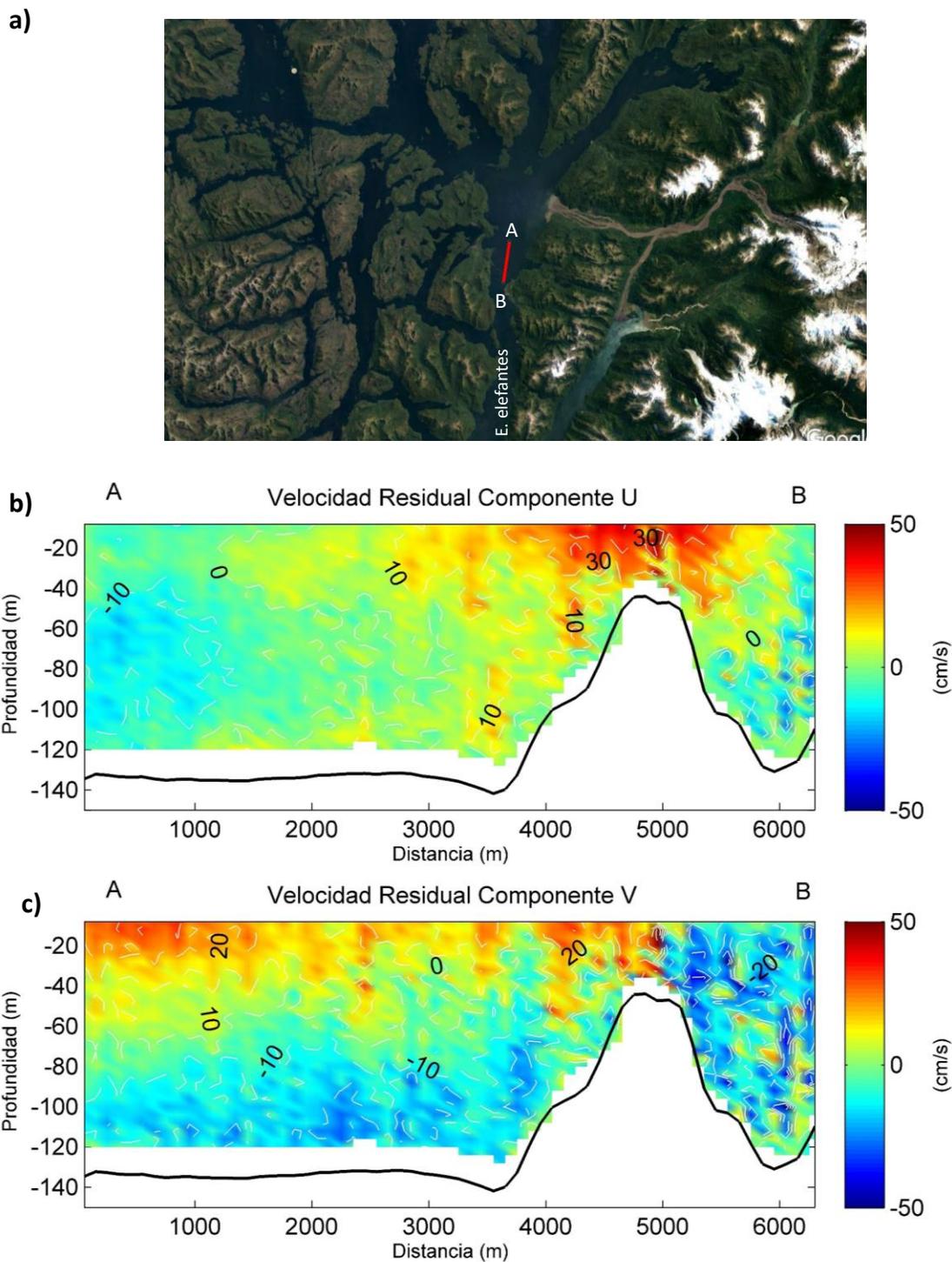


Figura 12. a) transecto efectuado en Estero Elefante (frente isla Huemules), a trav3s de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Elefante. (c) flujo residual (componente V) en estero Elefante durante la campaa de E. Elefantes en Octubre 2016.

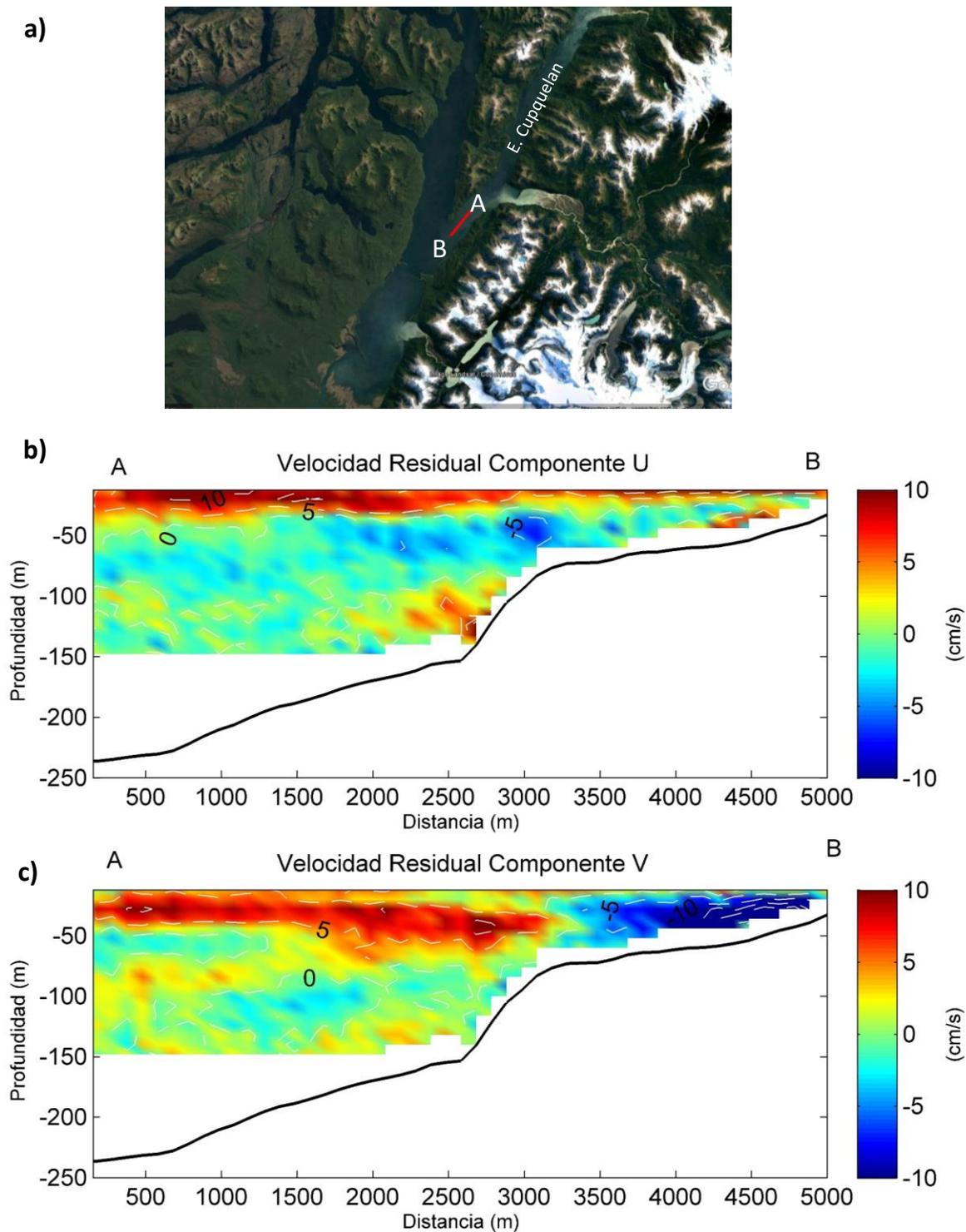


Figura 13. a) transecto efectuado en Estero Cupquellan (longitudinal), a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Cupquellan. (c) flujo residual (componente V) en estero Cupquellan durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

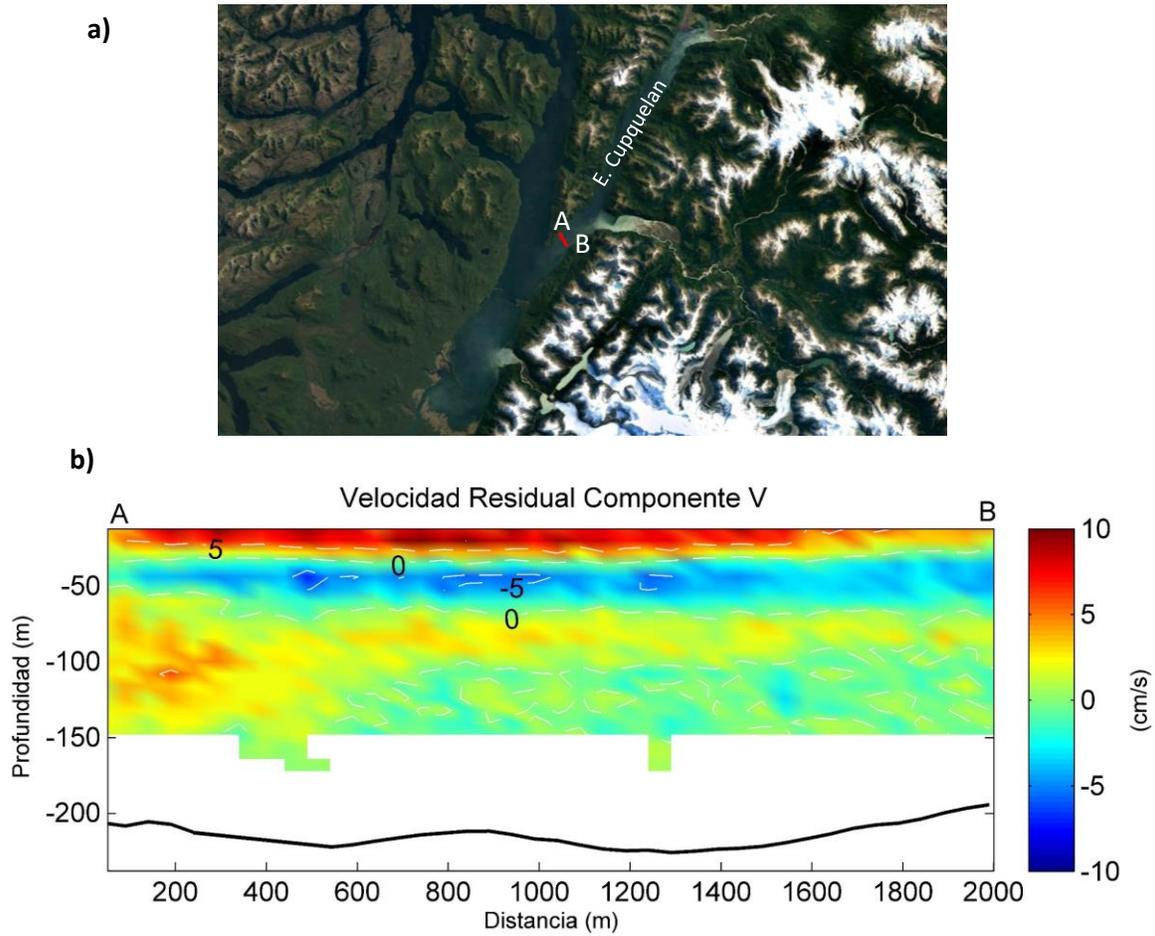


Figura 14. a) transecto efectuado en Estero Cupquelan (transversal), a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente V) en estero Cupquelan durante la campaña de E. Elefantes en Octubre 2016.

Mediciones ADCP anclado

La primera figura de cada registro de ADCP corresponde a las componentes residuales U y V de las corrientes; junto con el residual de vientos (convención oceanográfica), mostrado en forma de vector; las mediciones del nivel del mar que viene dada de los registros de los mareógrafos más cercanos a la zona de Anclaje y por último los valores de caudal de río corresponden a río Exploradores II ubicado en fiordo Cupuelan.

Estero Elefantes norte (bahía Eugenia) 30 agosto- 23 noviembre 2016

Las componentes residuales de U y V (**figura 15d y 15e**) evidenciaron un sistema con flujo de 3 capas. Una capa superficial, ubicada sobre los 10m, que fue claramente influenciada por el viento, (**figura 15c**) al mostrar flujos al sur coincidentes con la dirección de estos. Una segunda capa con un dominio del flujo en sentido norte, en la mayor parte de la columna de agua. Una tercera capa con un flujo de menor intensidad en sentido sur, revelando mayor extensión dentro de la columna de agua cada 28 días, atribuible a la constituyente de marea MM (**figura 15a**). El perfil vertical de la intensidad de la corriente (**figura 16a**) registró máximos superficiales del orden de 100cm s^{-1} disminuyendo gradualmente en profundidad a valores cercanos a 50 cm s^{-1} . Mientras el flujo promedio fluctuó cerca de los 20 cm s^{-1} . En tanto los perfiles verticales promedios de U y V (**figura 16b**) mostraron un dominio del sentido norte y oeste con intensidades cercanas a 15 cm s^{-1} en la componente V y menores a 10 cm s^{-1} en la componente U.

Las elipses de máxima varianza (**Figura 17**). Evidenciaron una oscilación de la corriente en sentido norte-sur, correspondiente a la configuración del estero Elefante.

El análisis espectral de las componentes ortogonales U y V (**Figura 18**) reveló una mayor energía en la componente V, dentro de toda la columna de agua, en frecuencias asociadas a los constituyentes de marea diurna, semidiurna y cuartidiurna, Pero con una disminución de su energía en las frecuencias diurnas y cuartidiurna a medida que aumento la profundidad. También se observó un peak significativo en la banda de frecuencia de 7 días.

El análisis armónico efectuado a la corriente reveló una influencia mareal de 42% a 5m; 57% a 10m en tanto entre las capas de 20 a 80m un 60 y 63%.

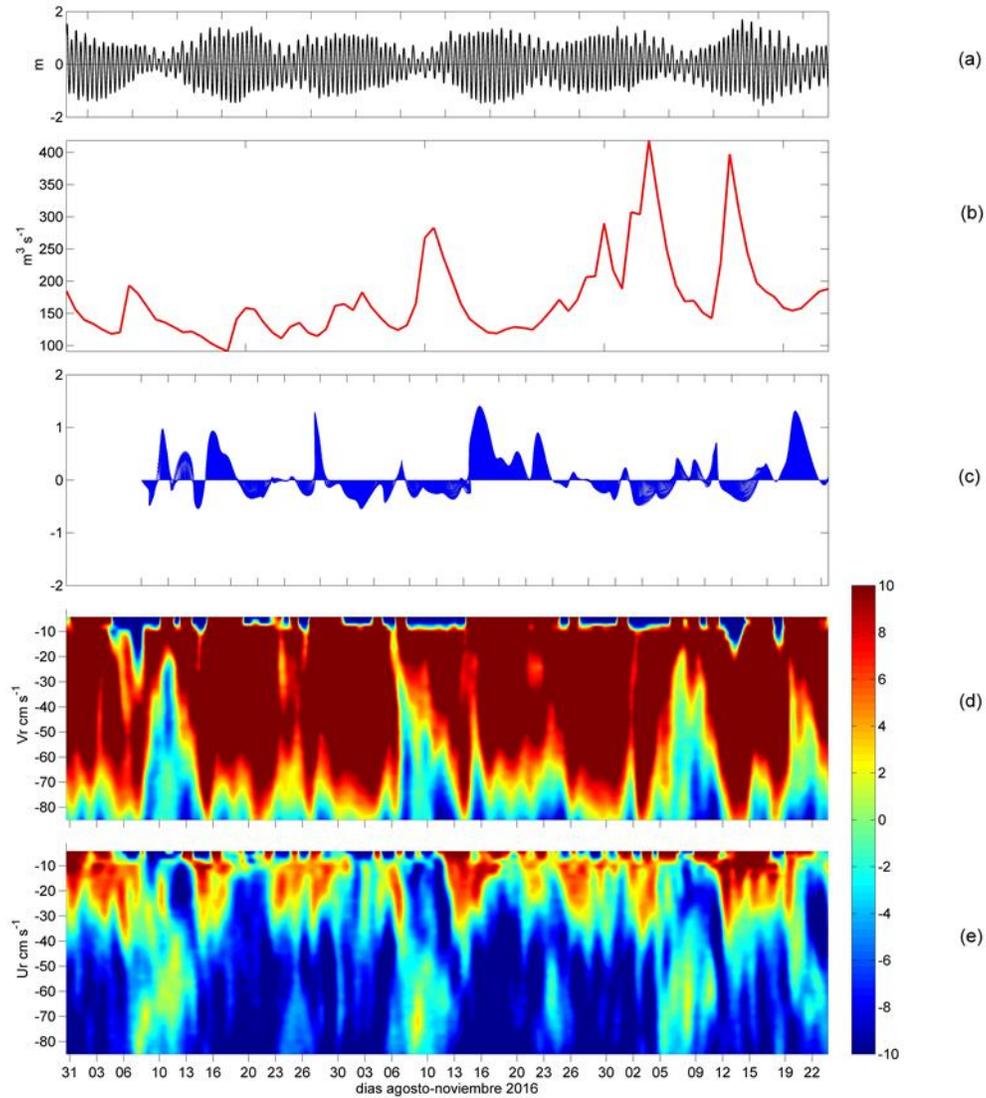


Figura 15. Adcp anclado estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016 (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.

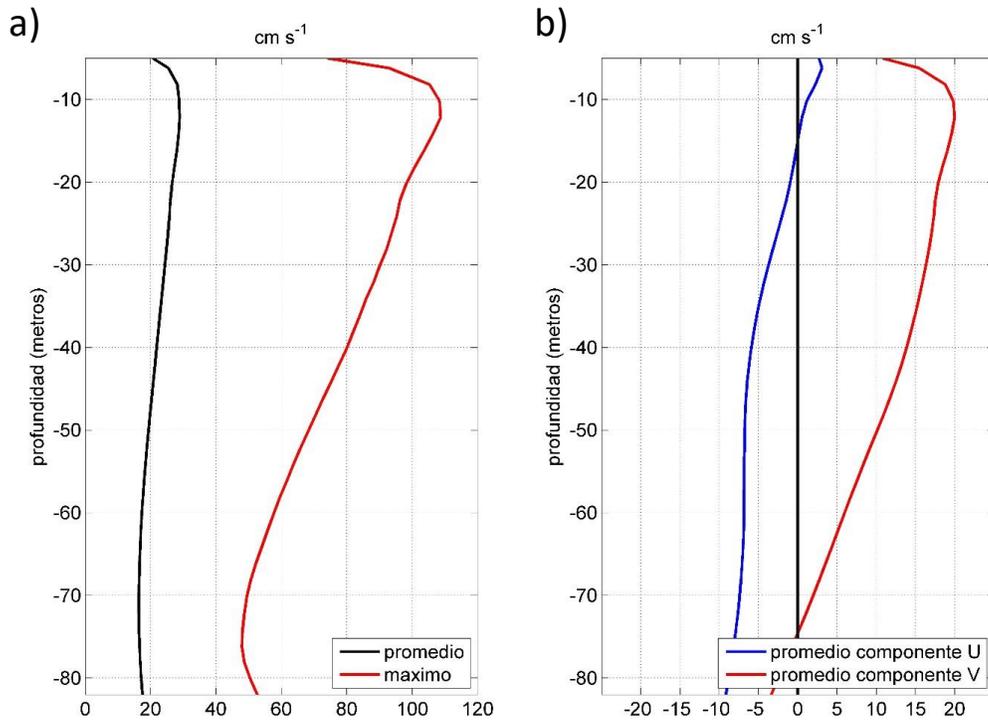


Figura 16. a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016

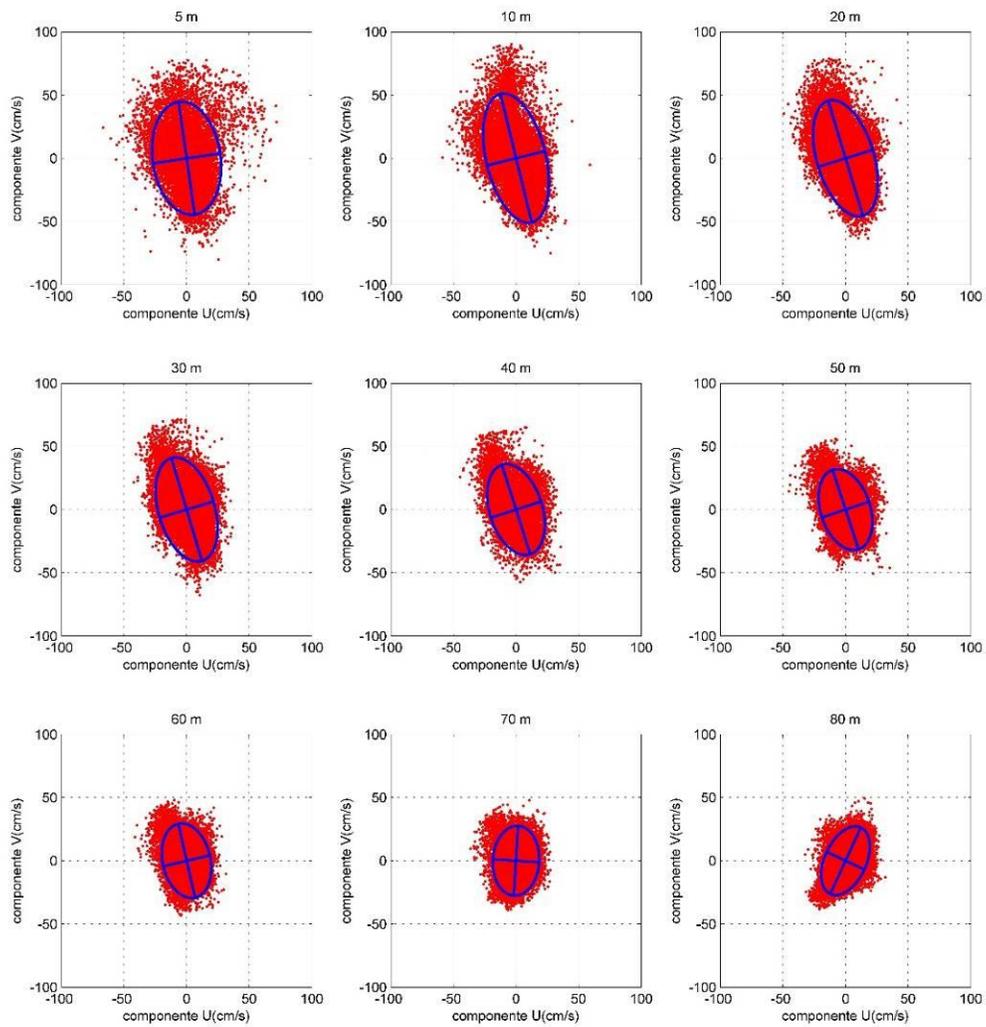


Figura 17. Elipses de máxima varianza en las capas de 5-10-20-30-40-50-60-70-80m en estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016.

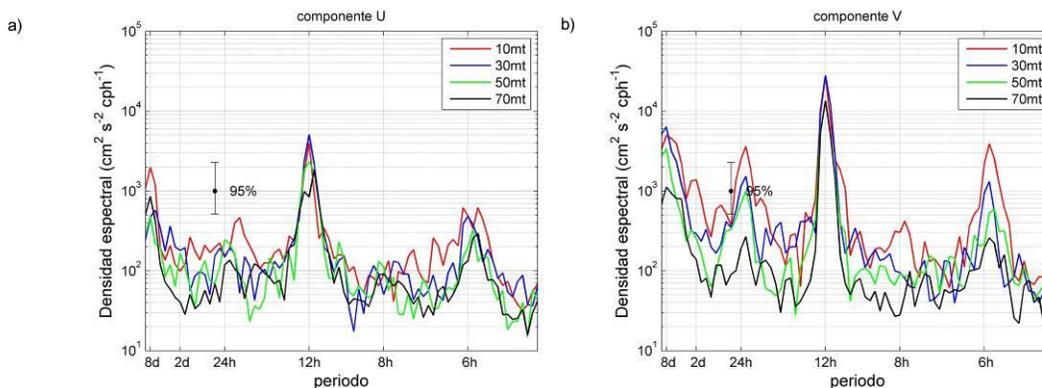


Figura 18. Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V en estero Elefante (bahía Eugenia) entre septiembre y noviembre 2016.

Paso Tres Cruces / canal Costa

Las corrientes residuales U y V (**figura 19d y 19e**) presentaron mayor intensidad en la componente V (norte-sur), donde se observó un sistema de capas. La capa superficial se vio claramente modulada por el viento, notando que con vientos norte la corriente se dirige al sur (**figura 19c**). La segunda capa, con una profundización cercana a los 60m de profundidad se dirigió al norte. Por debajo de esta capa predominaron los flujos al sur, resaltando una señal cada 30 días, atribuible al efecto de la constituyente de marea MM (*Lunar monthly constituent*) (**figura 19a**).

Los perfiles verticales de la magnitud de la corriente (**figura 20a**) mostraron máximos cercanos a 50 cm s^{-1} , mientras que el promedio fluctuó cerca de los 20 cm s^{-1} . Los perfiles verticales de las componentes ortogonales (**figura 20b**) evidenciaron la presencia de 2 capas una superior que se extiende hasta los ~60m en sentido noroeste y la inferior en sentido suroeste con valores de 10 cm s^{-1} en la componente V y de 5 cm s^{-1} en la componente U.

Las elipses de máxima varianza (**figura 21**) mostraron una oscilación de la corriente en sentido norte-sur, concordante con el eje del canal Costa.

El análisis espectral (**figura 22**) presentó una mayor energía en la componente V, pero destacando en ambas componentes ortogonales una mayor energía en las frecuencias de 24, 12 y 6 horas, siendo más significativas en estas 2 últimas.

Los armónicos de la corriente presentaron una influencia mareal de 35% a 5 metros; 61% a 10m; 71% a 20m; 72% a 30m; 70% a 40m; 72% a 50m; 73% a 60m; 78% a 70m; 81% a 80 y 90 metros.

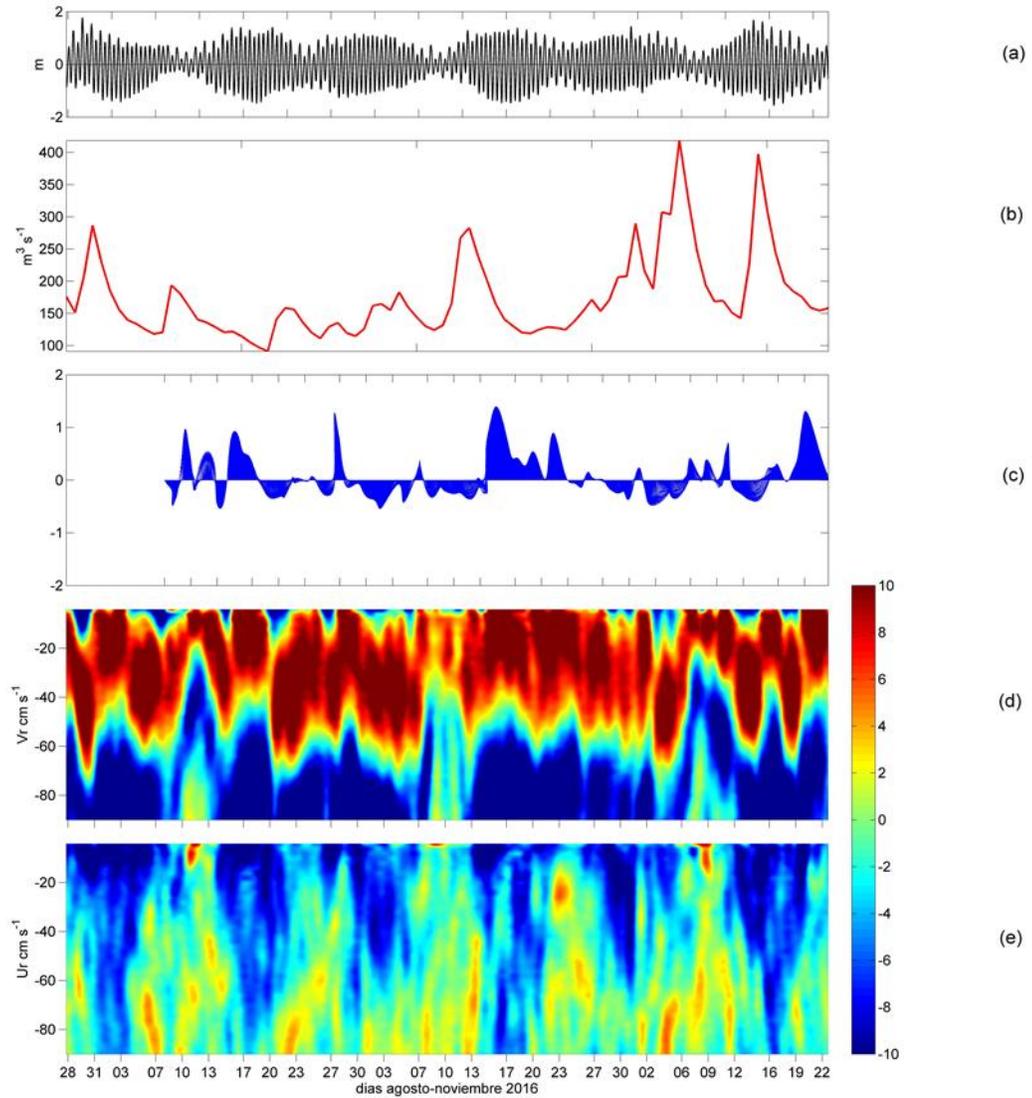


Figura 19. Adcp anclado, paso tres Cruces, canal Costa entre septiembre y noviembre 2016. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.

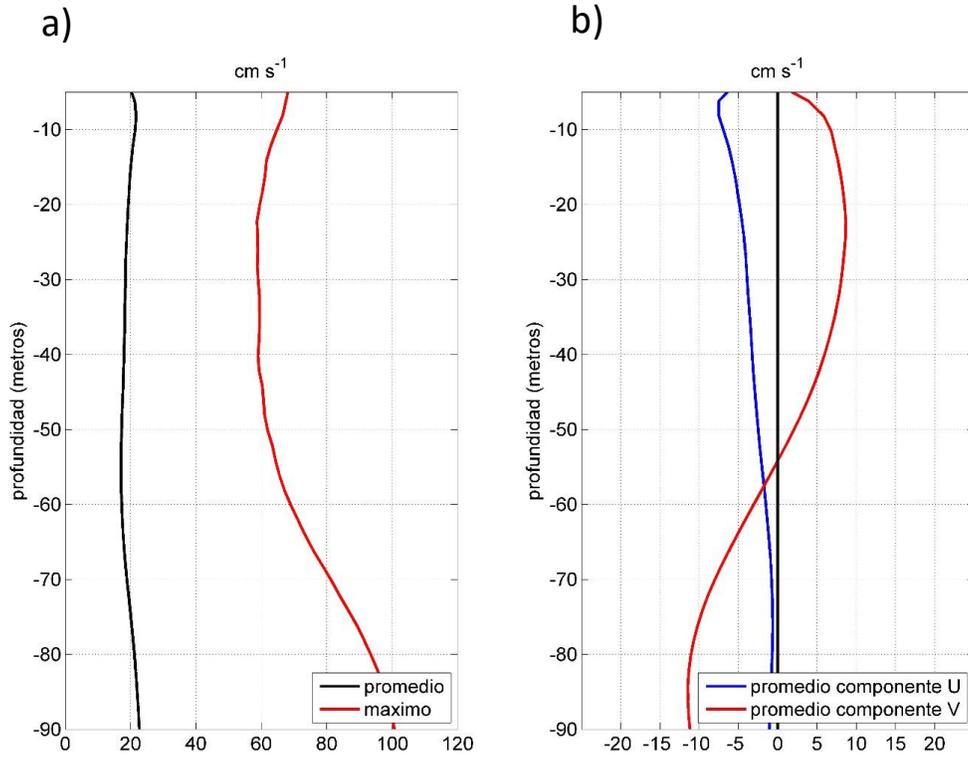


Figura 20. a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En paso tres Cruces, canal Costa, entre septiembre y noviembre 2016.

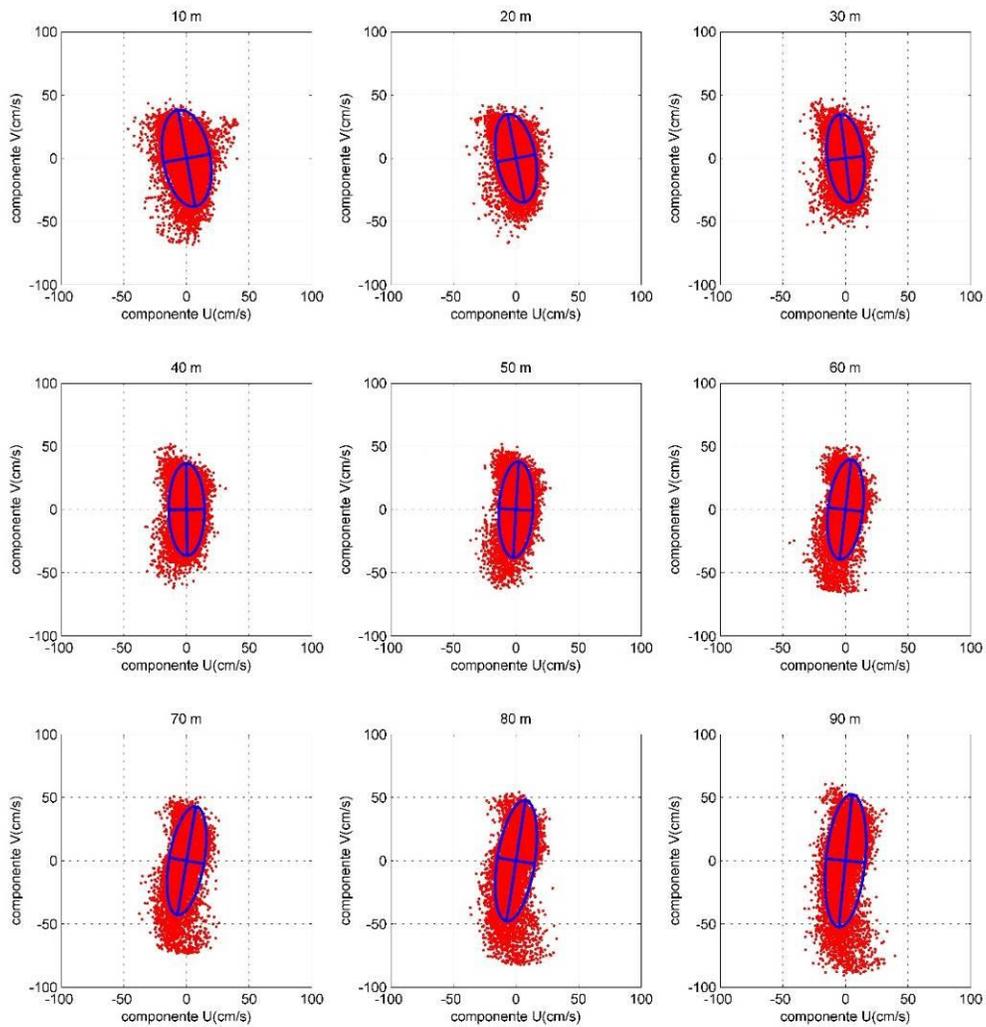


Figura 21. Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70-80-90m en paso tres Cruces, canal Costa, entre septiembre y noviembre 2016.

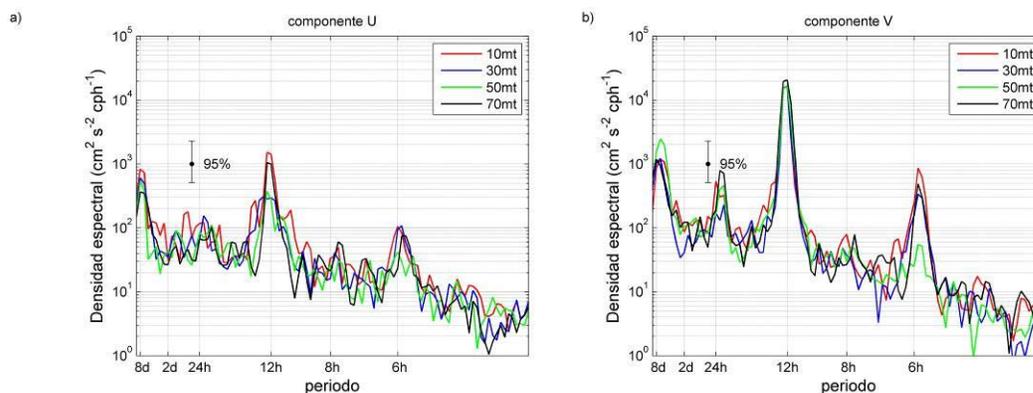


Figura 22. Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V en paso tres Cruces, canal Costa, entre septiembre y noviembre 2016.

Estero Quitalco

Las componentes ortogonales residuales (**figura 23d y 23e**) identificaron una alta variabilidad en la dirección del flujo, junto con una configuración de este en capas. Se logra ver cierta asociatividad entre la capa superficial y el forzante del viento (**figura 243c**).

El perfil vertical de la magnitud (**figura 24a**) identificó máximos entre 40 y 60 cm s⁻¹ mientras que los promedios fluctuaron cerca de los 10 cm s⁻¹. Los perfiles verticales de las componentes ortogonales (**figura 24b**) evidenciaron valores por debajo de 5 cm s⁻¹ mostrando una capa superficial que hasta los 20 m que se dirigió al noreste, mientras que por debajo se observaron flujos cercanos a cero y en dirección suroeste.

Las elipses de máxima varianza (**figura 25**) presentaron una oscilación que se dirige al noreste y al suroeste, al igual a lo observado en los perfiles verticales (**figura 25b**).

Los espectros de energía (**figura 26**) identificaron importantes peaks en las frecuencias asociadas a las componentes semidiurnas y cuartidiurnas.

El análisis armónico reveló una alta influencia de la marea que varió de 59% a 10 m; 48% a 20 m; 44% a 30 m; 41% a 40 m; 47% a 50 m; 60% a 60 m; 74% a 70 m y 80% a 80 m.

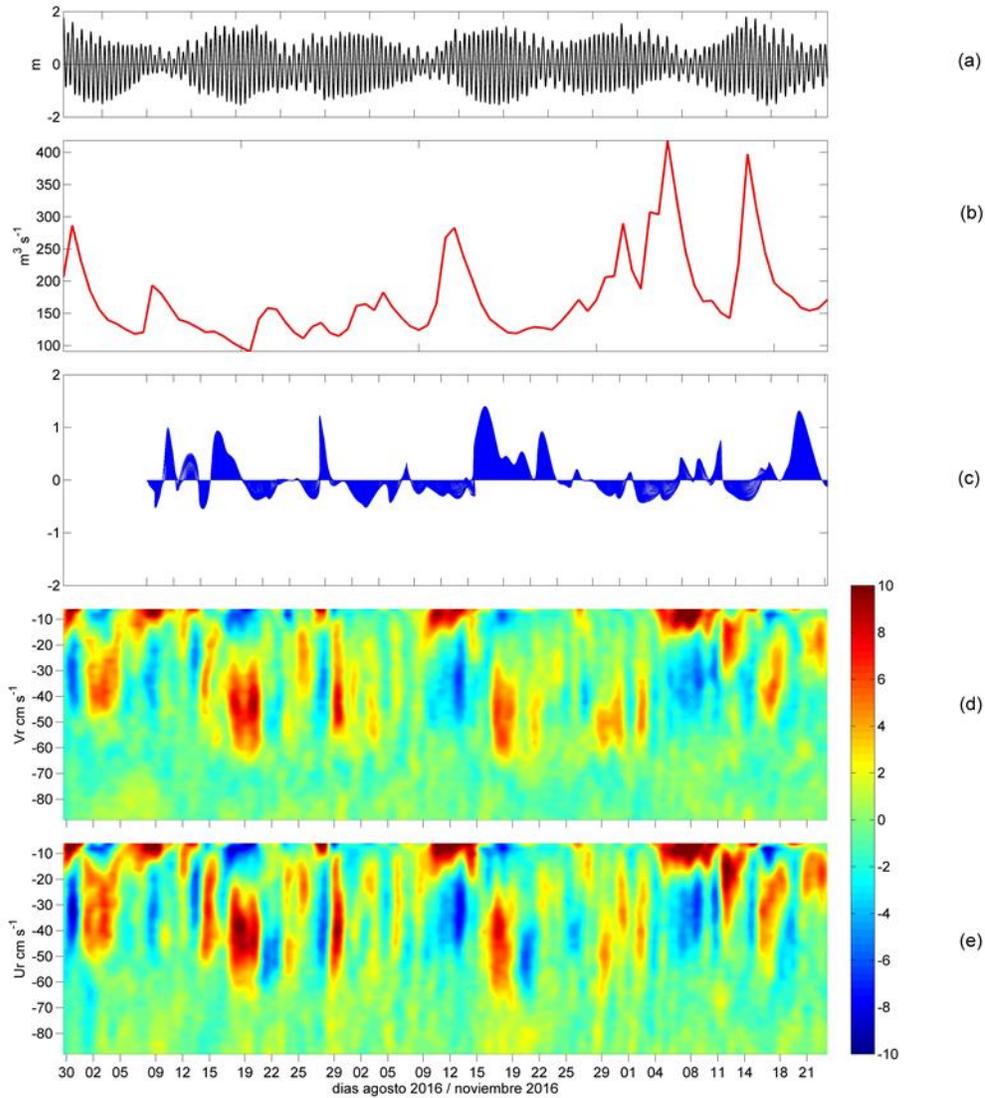


Figura 23. Adcp anclado Quitralco entre septiembre y noviembre 2016. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal río exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.

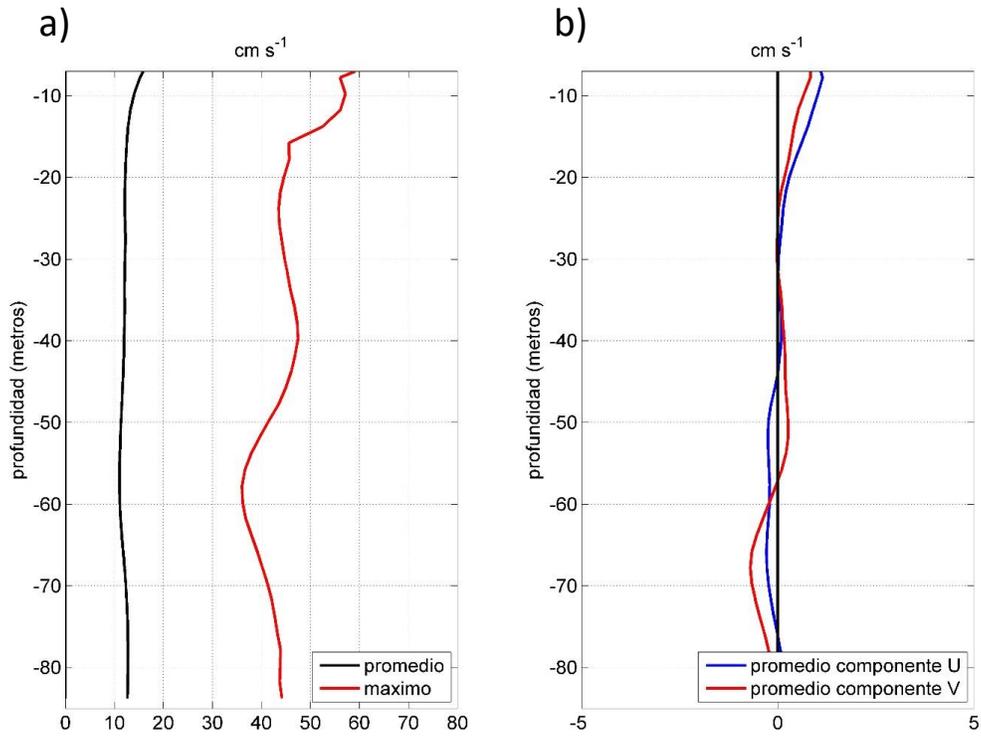


Figura 24. a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Quitralco entre septiembre y noviembre 2016.

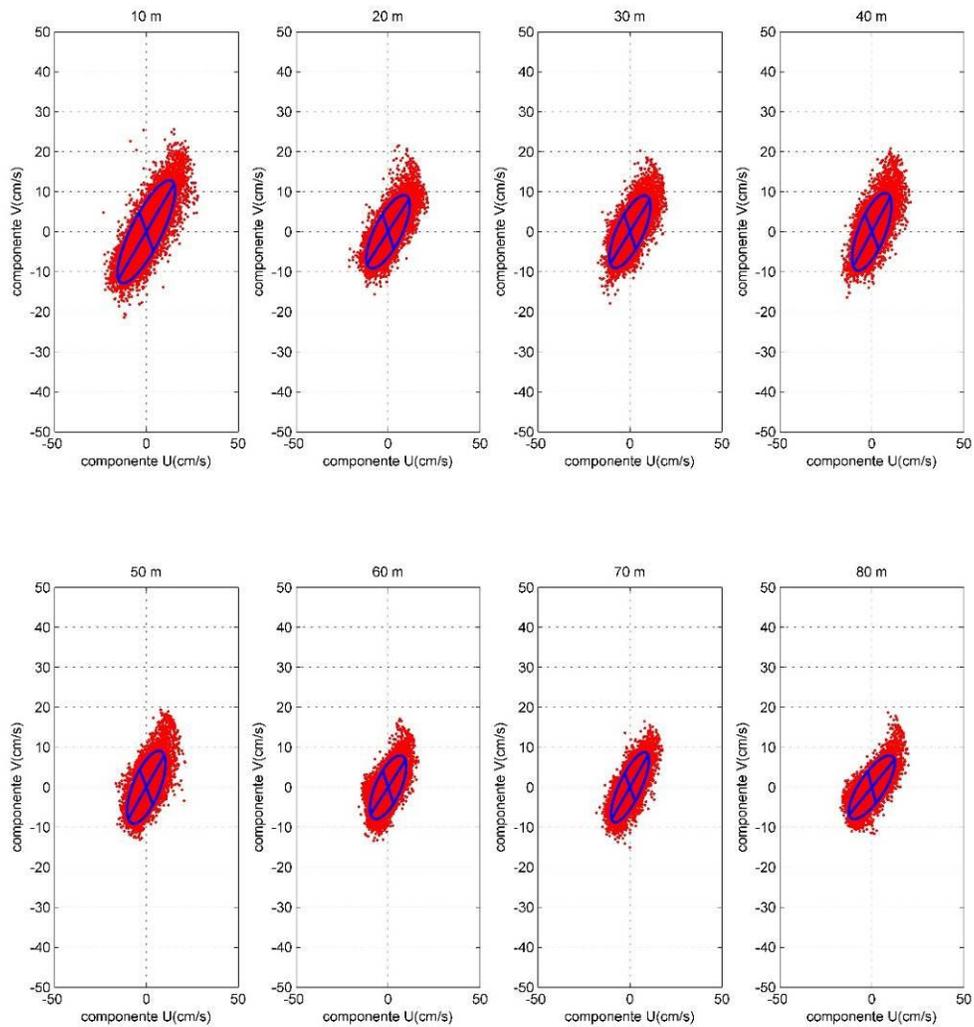


Figura 25. Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70-80m en Quitralco entre septiembre y noviembre 2016.

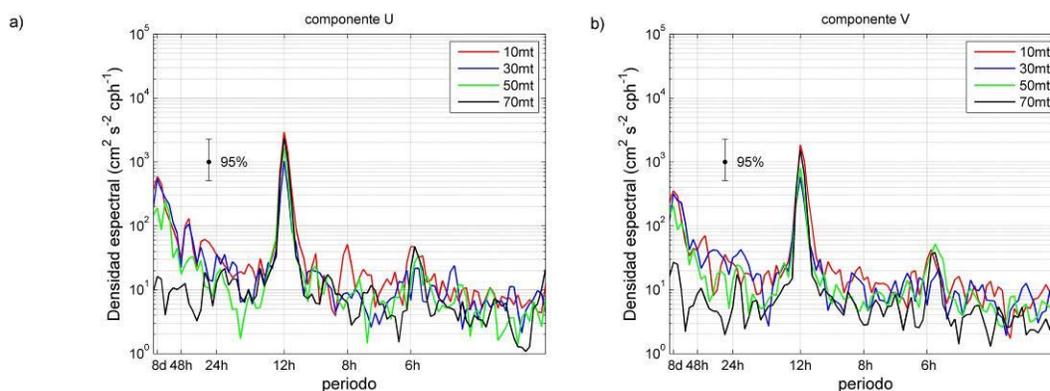


Figura 26. Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V en Quitralko entre septiembre y noviembre 2016.

Estero Cupquelan

Las componentes residuales V y U (**figura 27d y 27e**) evidenciaron una alta variabilidad en la dirección del flujo junto con una configuración en capas. Cabe destacar que en determinados pulsos de viento soplando al sur (ejemplo 12 y 28 de octubre) (**figura 27c**) se observó una capa superficial de entrada al estero.

Los perfiles verticales de la magnitud de la corriente (**figura 228a**) presentaron máximos en superficie, cercanos a los 50 cm s^{-1} disminuyendo en profundidad a valores menores de 20 cm s^{-1} , mientras que el promedio vertical fue menor a 10 cm s^{-1} . Los perfiles verticales de las componentes ortogonales (**figura 28b**) evidenciaron flujos de tres capas con un flujo al noreste hasta los 10m; suroeste entre los 10 y los 30m y noroeste por debajo de los 30m, con bajas intensidades.

Las elipses de máxima varianza (**figura 29**) mostraron una oscilación noreste-suroeste, concordante al eje del estero Cupquelan.

El análisis espectral (**figura 30**) presentó una leve mayor energía en la componente U, con importantes peaks en las frecuencias asociadas a las componentes semidiurnas y cuartidiurnas (12 horas y 6 horas). También se observó mayor energía en las capas superiores.

Los armónicos revelaron una influencia mareal de 55% a 5m; 76% a 10m; 77% a 20m; 72% a 30m; 63% a 40m; 53% a 50m; 46% a 60m y 33% a 70m.

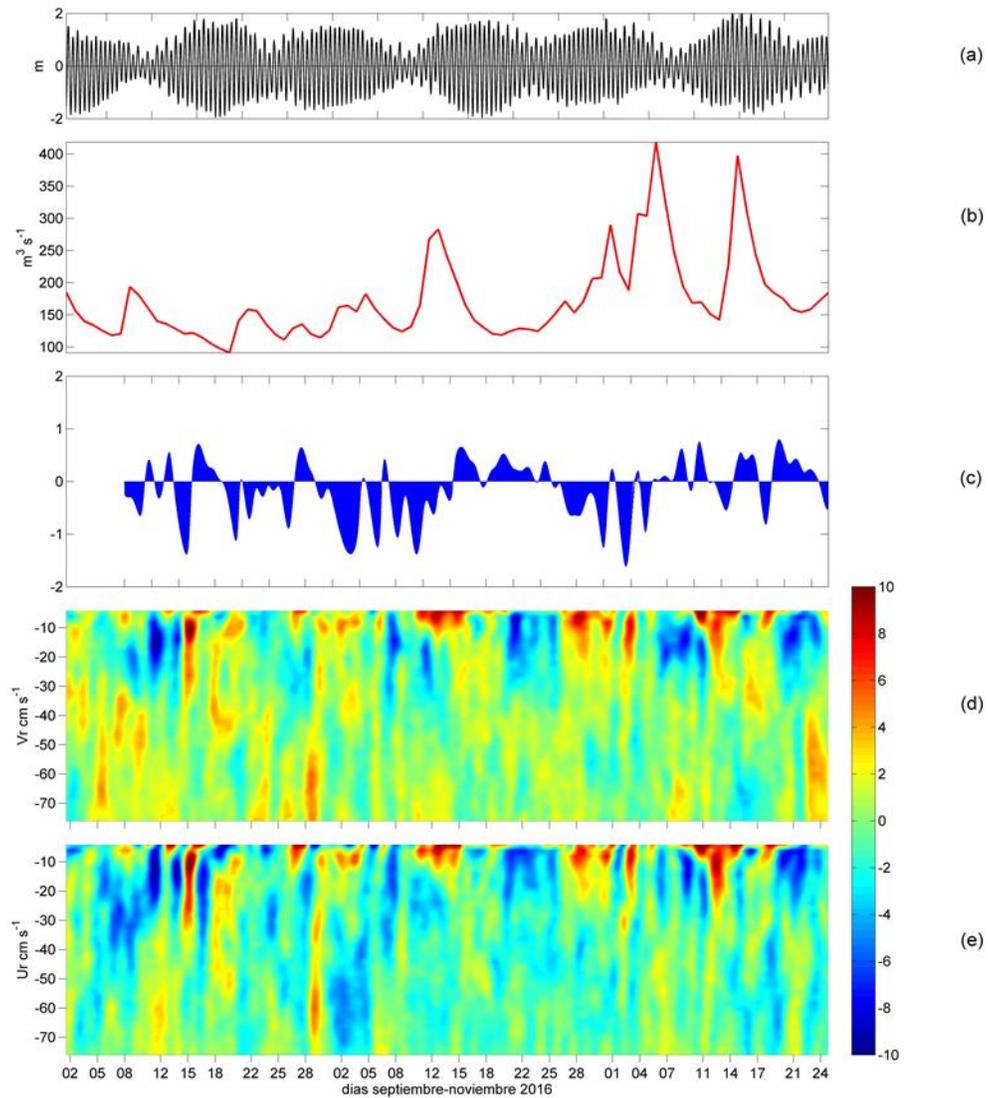


Figura 27. Adcp anclado Cupuelan entre septiembre y noviembre 2016. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.

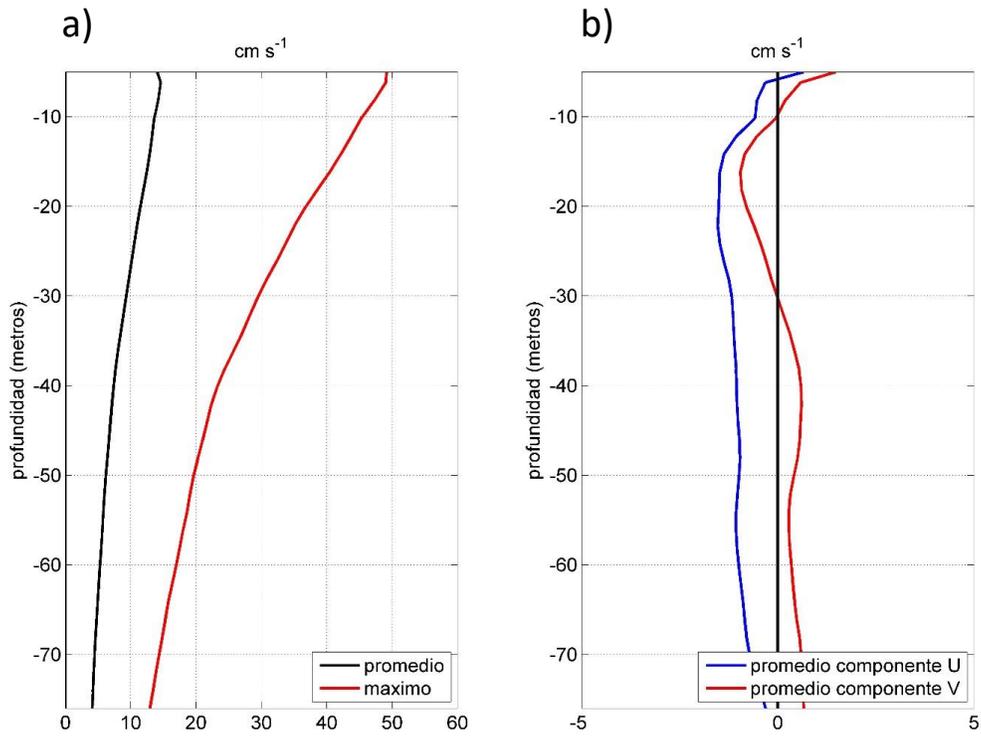


Figura 28. a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Cupquelan entre septiembre y noviembre 2016.

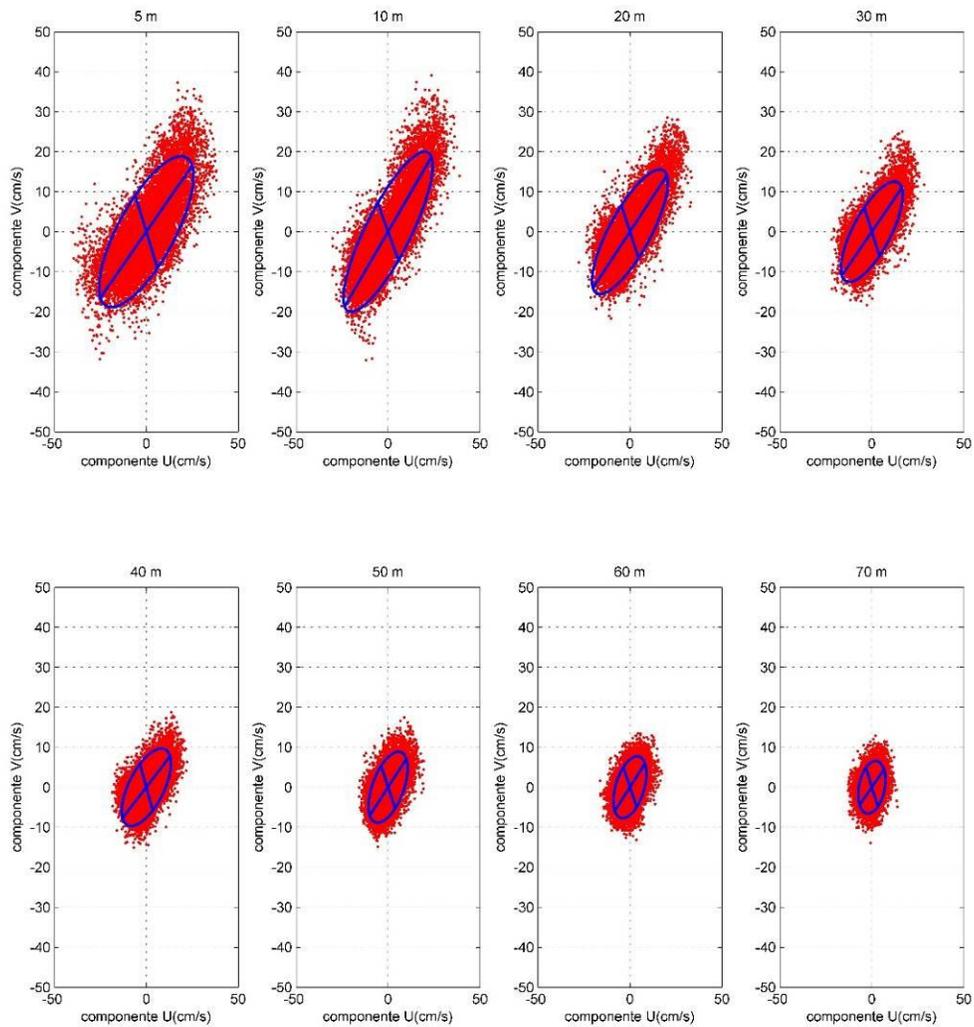


Figura 29. Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70m en Cupquellan entre septiembre y noviembre 2016.

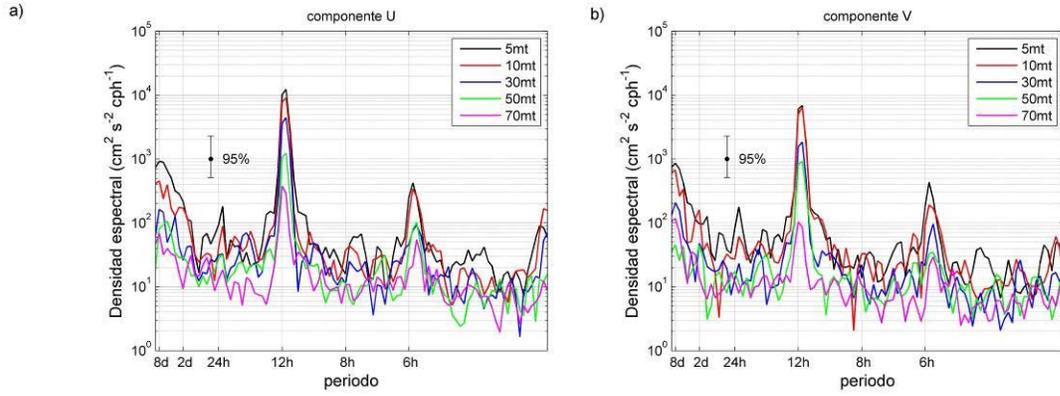


Figura 30. Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V en Cupquellan entre septiembre y noviembre 2016.

Caracterización oceanográfica periodo noviembre 2016 –marzo 2017.

ADCP remolcado

Los resultados residuales en la mayoría de los transectos se presentaron en las componentes residuales U-este y V-norte para obtener una mejor definición de lo que ocurre con la dirección del flujo. Es importante describir que el flujo positivo (rojo) en V se dirige al norte y positivo en U se dirige al Este.

Tres Cruces (figura 31a). El flujo residual en paso Tres Cruces (**figura 31b y 31c**) presentó una dirección predominante al este y sur siendo más intensos hasta aproximadamente los 50 metros de profundidad con intensidades de $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Por debajo de esta capa se observaron valores de baja intensidad.

Estero Quitralco (figura 32a). El flujo residual en el estero Quitralco (**figura 32b**) identificó una capa superficial de salida que extiende hasta los 20m app. Por debajo de esta capa se observaron flujos de entrada que se interrumpen por la presencia de un montículo que se extiende entre los 30 y 100m de profundidad.

Estero Cupquelan Longitudinal (figura 33a) . El flujo residual en estero Cupquelan (**figura 33b y 33c**) se identificaron flujos superficiales de salida hasta los 30m de profundidad. Mientras que por debajo de esta capa y hasta los 65m se observaron flujos de entrada con intensidades típicas de $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$

Estero Cupquelan Transversal (figura 34a). El flujo residual (**figura 34b**) presento 4 capas de flujo. Se alcanzo a percibir una delgada capa superficial de salida ubicada por sobre los 10m. En la segunda capa se distinguen flujos de entrada hasta los 50m de profundidad con intensidades de $10\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Por debajo de esta capa se observo con mayor predominancia flujos de salida e intensidades del orden de los $5\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ hasta los 100m de profundidad. Por debajo de los 100m se observaron leves flujos de entrada.

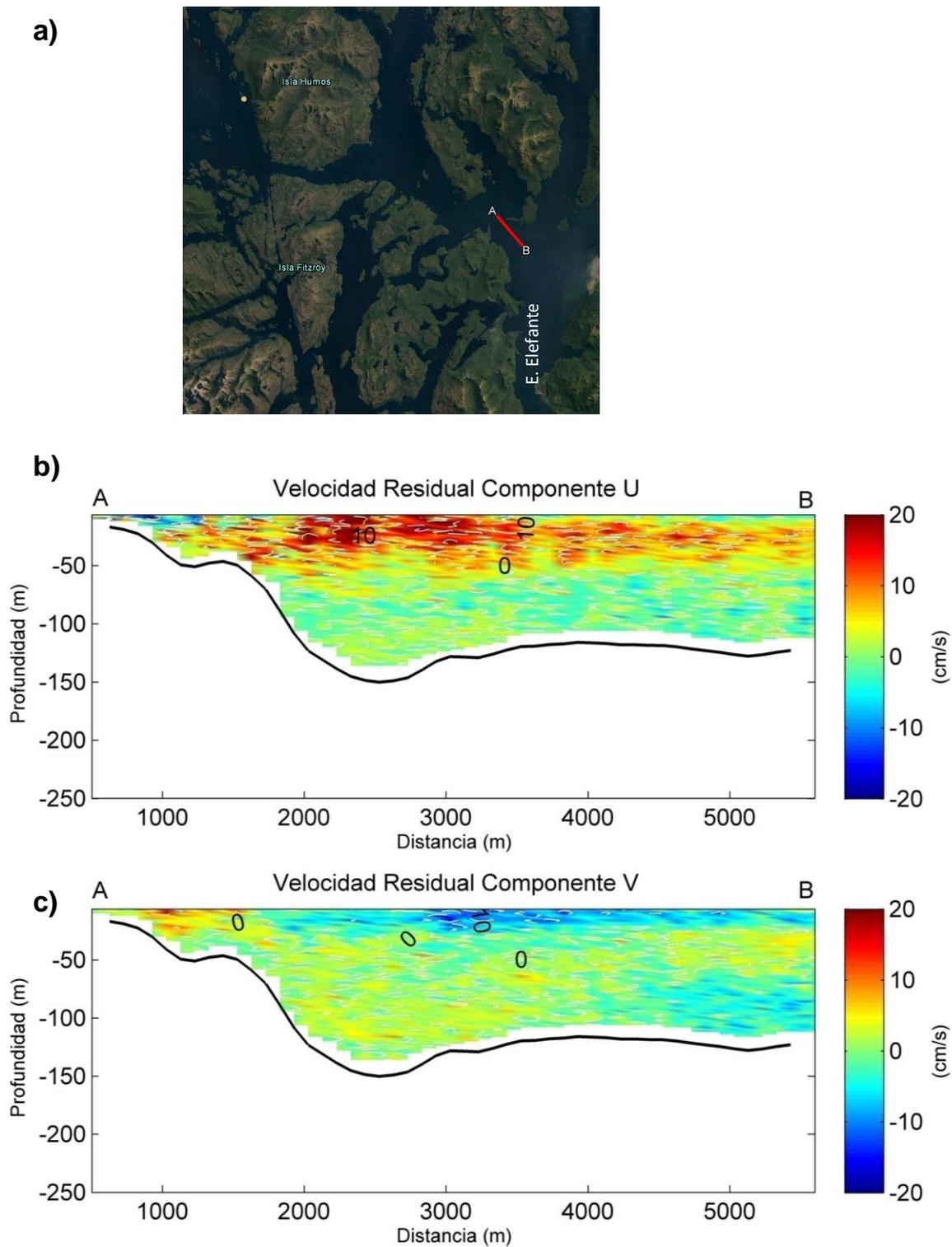


Figura 31. a) transecto efectuado en Paso Tres Cruces, a través de ADCP remolcado. (b) flujo

residual (componente U) en paso Tres Cruces. (c) flujo residual (componente V) en paso Tres Cruces durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017.

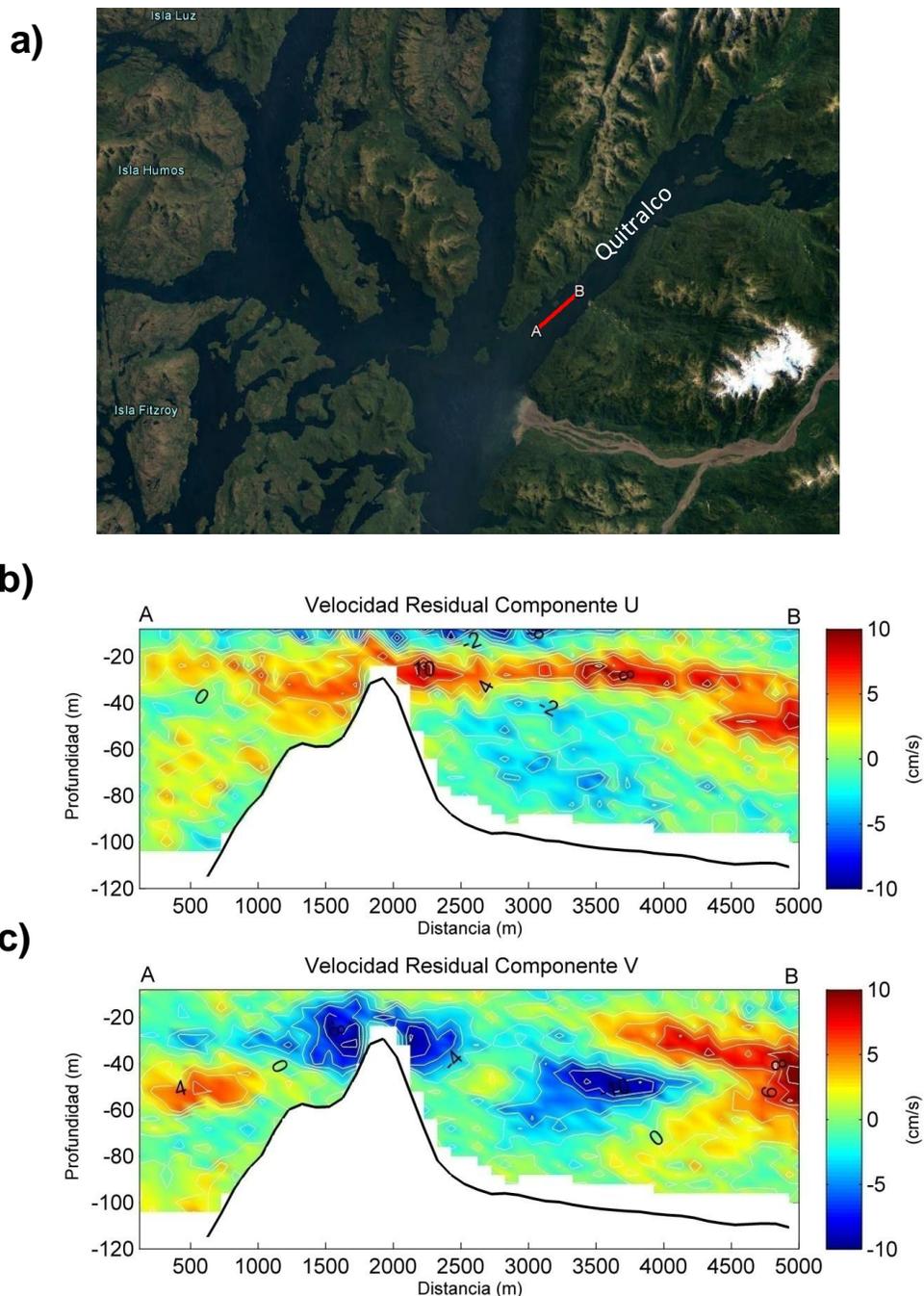


Figura 32. a) transecto efectuado en estero Quitrалco, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) estero Quitrалco. (c) flujo residual (componente V) en estero Quitrалco durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017.

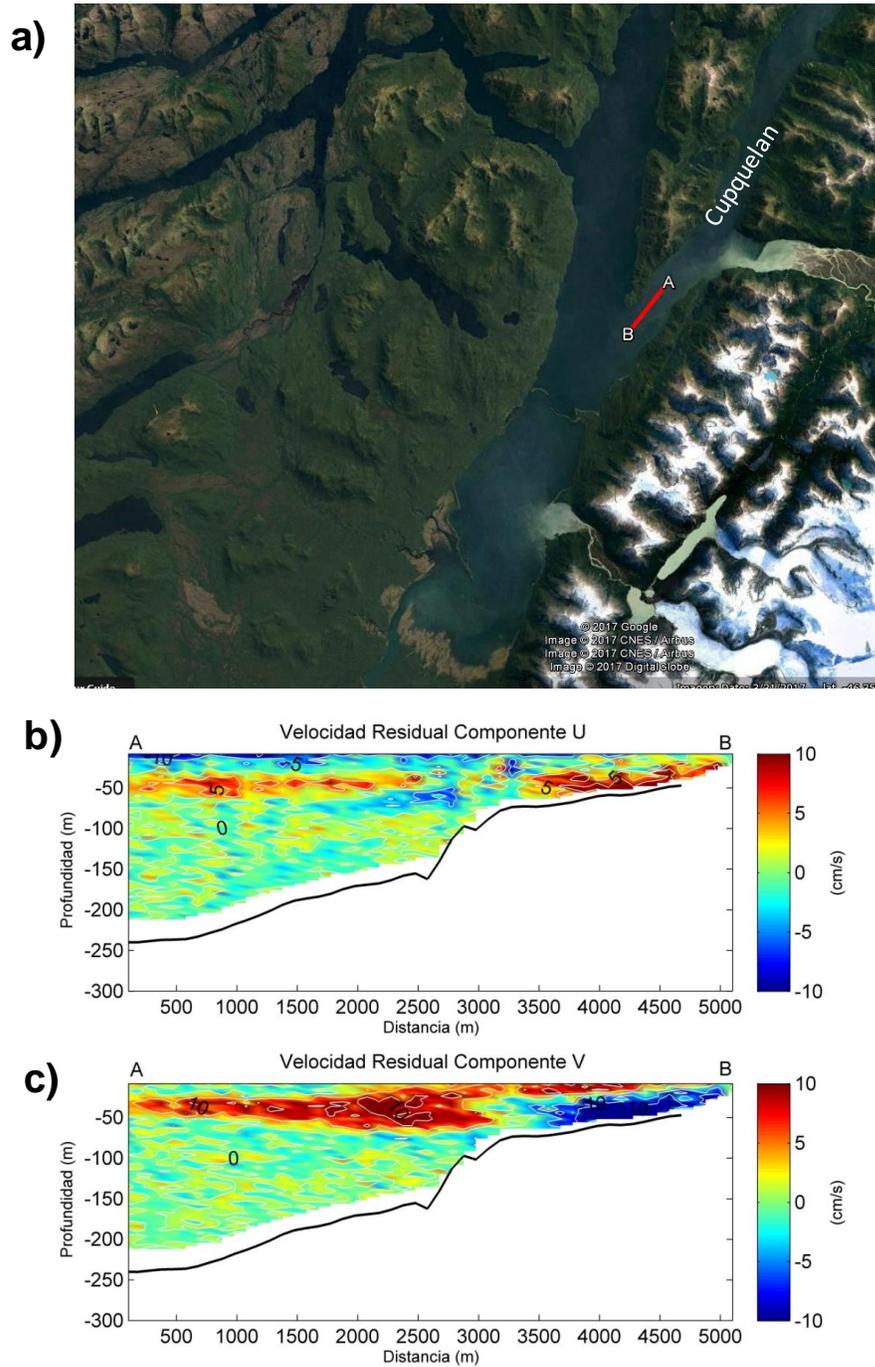


Figura 33. a) transecto efectuado en Cupquellan longitudinal, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero Cupquellan. (c) flujo residual (componente V) en estero Cupquellan durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017.

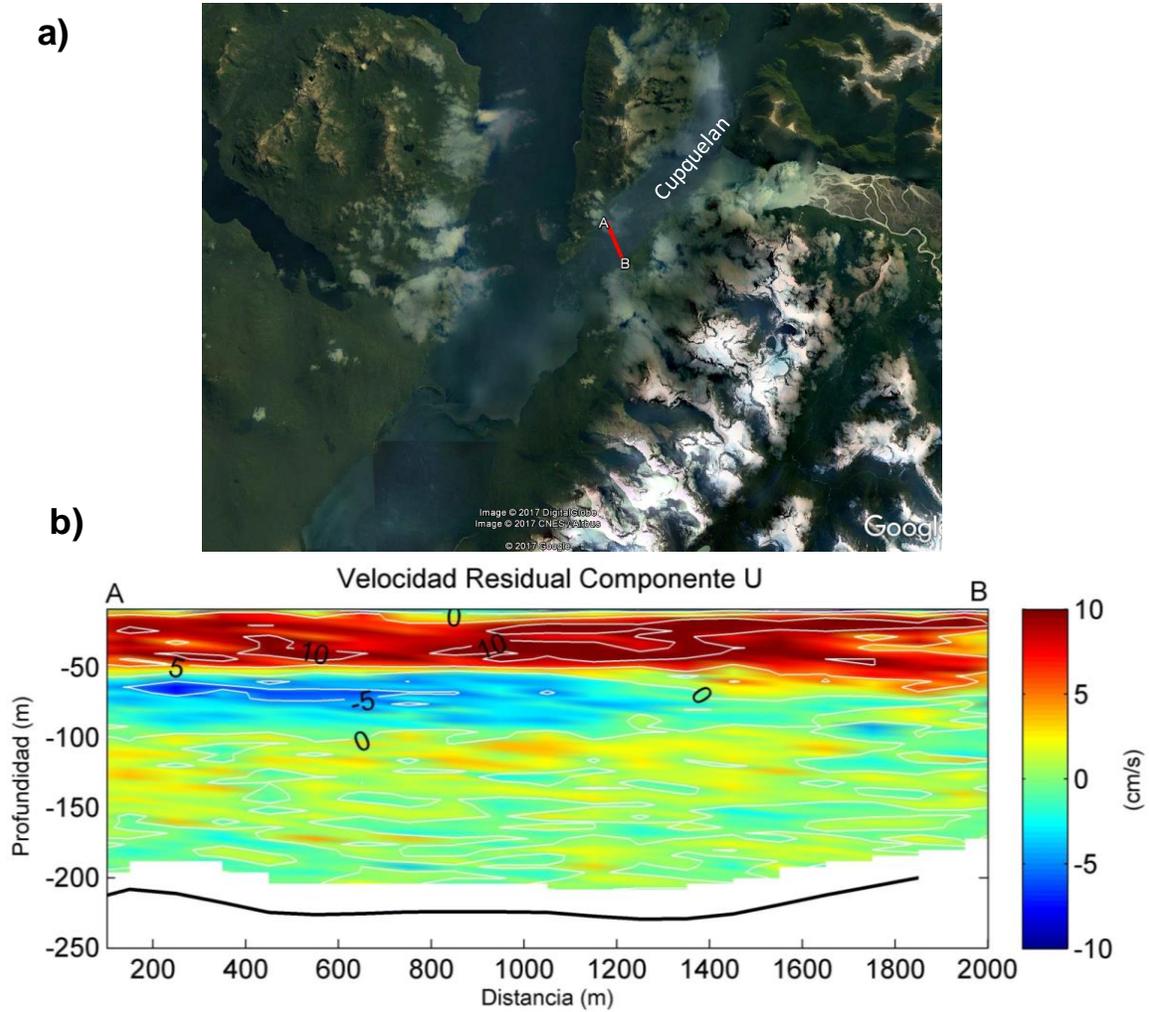


Figura 34. a) transecto efectuado en Cupquellan transversal, a través de ADCP remolcado. (b) flujo residual (componente U) en estero cupquellan durante la campaña de E. Elefantes en marzo de 2017.

ADCP ANCLADO periodo noviembre 2016-marzo 2017

Paso Tres Cruces /canal Costa.

Las componentes residuales (**figura 35d y 35e**) evidenciaron una mayor intensidad en la componente V (norte-sur), donde se observó una capa superior en dirección sur atribuida al efecto del viento (**figura 35c**), una segunda capa de mayor grosor en dirección norte y una tercera capa asociada al fondo con direcciones negativas. Cabe destacar cierta asociación entre la profundización de la segunda capa y eventos de sicigia (**figura 35a**).

El perfil vertical de la magnitud promedio presento valores cercanos a 20 cm s^{-1} , en tanto los máximos observados estuvieron entre 70 y 100 cm s^{-1} (**figura 36a**). El promedio vertical de las componentes ortogonales (**figura 36b**) percibió un flujo en dirección sur-oeste en la capa superior, mientras que a los 10 metros se dirigió al norte-oeste, para luego cambiar de dirección a los 50 metros hacia el sur.

Las elipses de máxima varianza (**figura 37**) mostraron una dirección preferente norte-sur atribuido a la línea de costa.

La densidad espectral (**figura 37**) reveló importantes peaks en las frecuencias de 12h y 6h en la componente U y en las de 24h, 12h y 6h en la componente V.

El análisis armónico efectuado a la corriente reveló una influencia mareal de 53.9% a 10m; 59,2% a 20m; 54.9 % a 30m; 54.0 % a 40m; 58.2 % a 50m; 61.4 % a 60m; 62.2 % a 70m; 65.2 % a 80m.

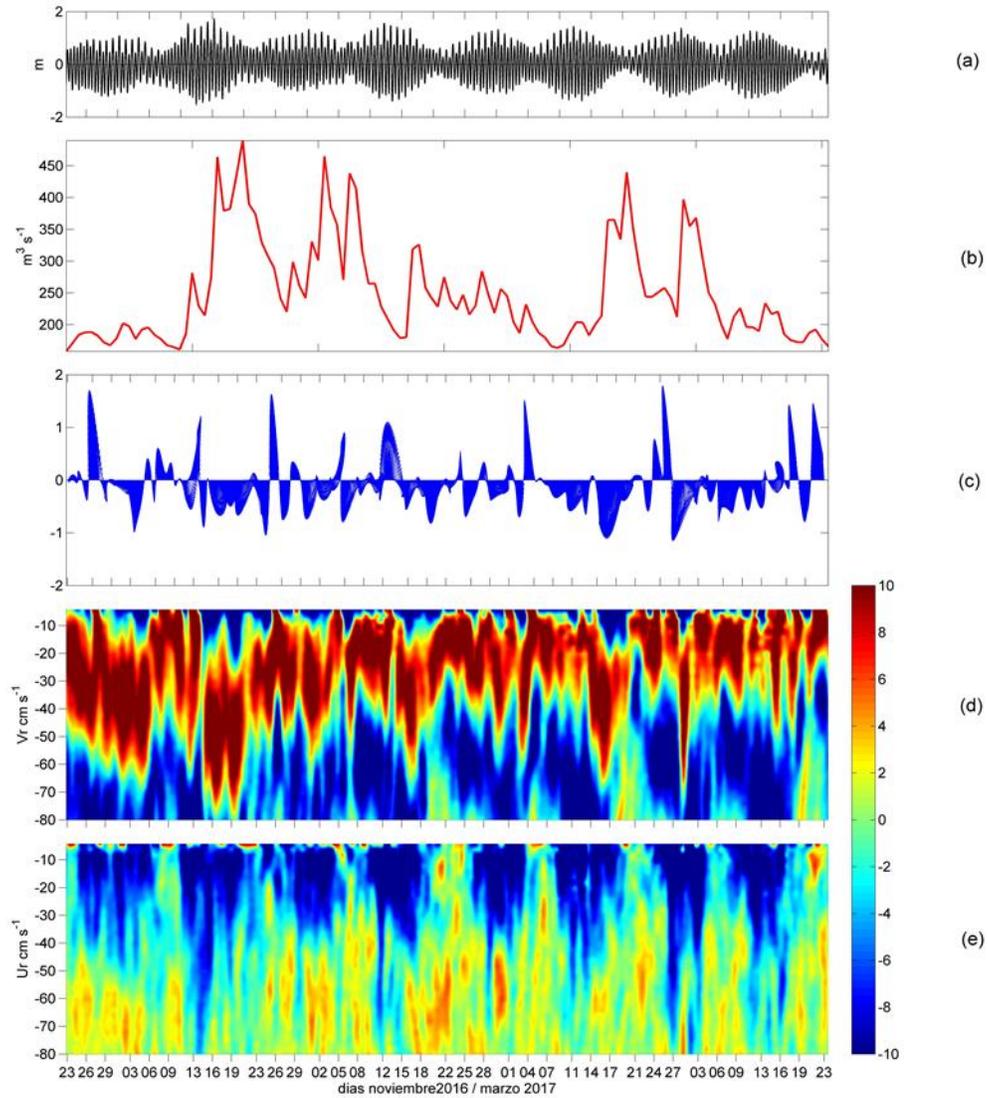


Figura 35. Adcp anclado paso Tres Cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.

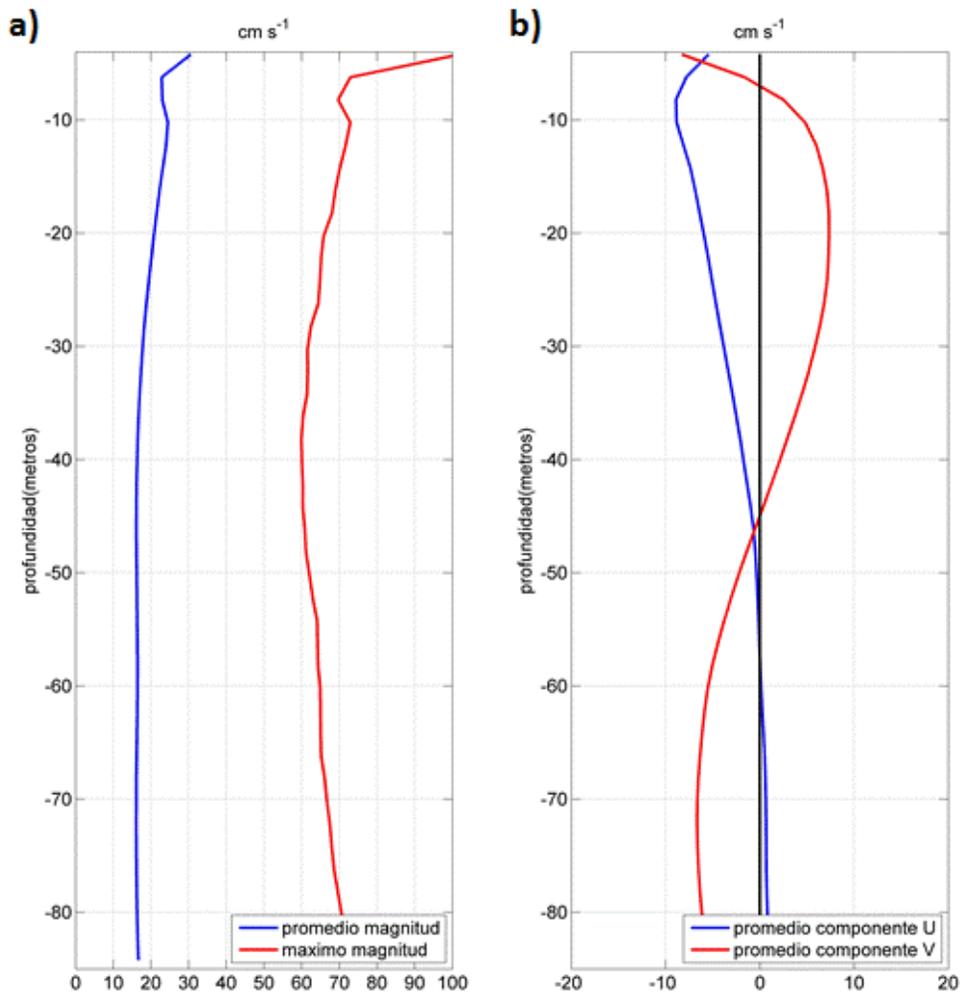


Figura 36. a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En Paso tres cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017.

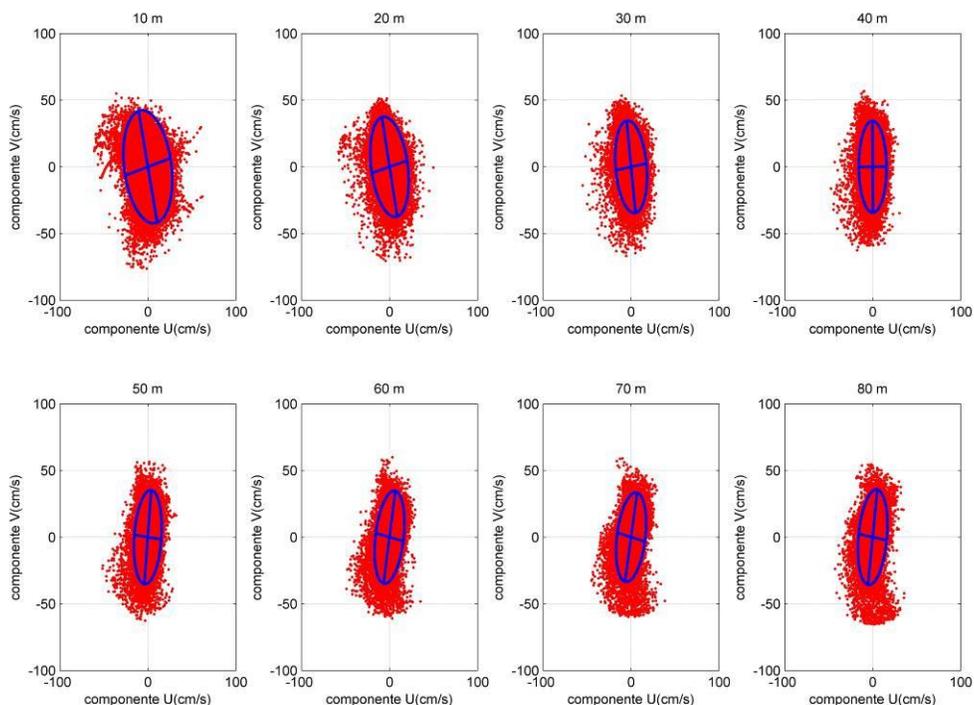


Figura 37. Elipses de máxima varianza en las capas de 10-20-30-40-50-60-70-80m en Paso Tres Cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017.

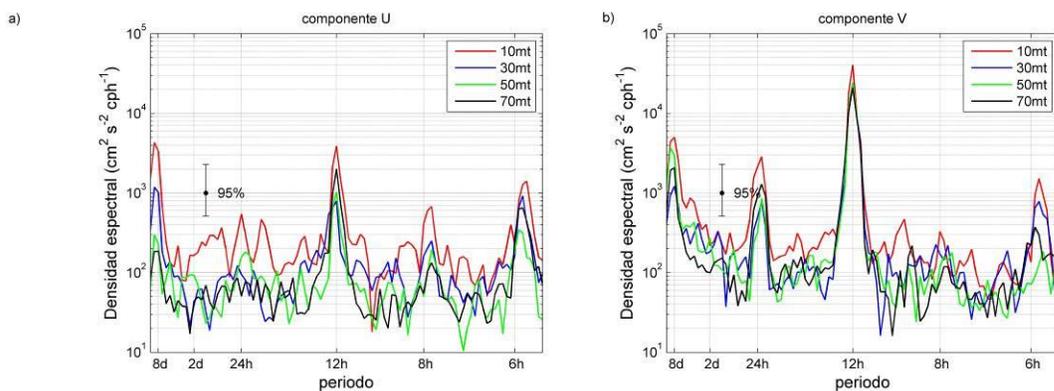


Figura 38. Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V en Paso Tres Cruces entre noviembre 2016 y marzo 2017.

Estero Quitralco

Las componentes ortogonales residuales (**figura 39d y 39e**) mostraron variabilidad en la dirección del flujo, junto con una configuración en capas. Los perfiles verticales identificaron máximos superficiales cercanos a los 130cm s^{-1} , en tanto a lo largo de la columna de agua se observaron máximos cercanos a los 30cm s^{-1} , mientras que la intensidad promedio fue menor a 10cm s^{-1} (**figura 40a**). Los perfiles verticales de las componentes ortogonales (**figura 40b**) presentaron una capa superficial en sentido sureste, que luego vario a los pocos metros al noreste, mientras que luego a partir de los 15 metros variaría entre el sureste-suroeste de baja intensidad.

Las elipses de máxima varianza identificaron una dirección predominante en sentido noreste-suroeste (**figura 41**).

La densidad espectral (**figura 42**) mostro peaks en las frecuencias 24h 12h y 6h, con menos energía en las capas más profundas.

El análisis armónico efectuado a la corriente revelo una alta influencia mareal presentando 52.9 % a 5m; 60.3 % a 10m; 60.4 % a 20m; 47.8 % a 30m; 35.8 % a 40m; 31.9 % a 50m; 57.9 % a 60m; 64.6 % a 70m; 67.3% a 80m.

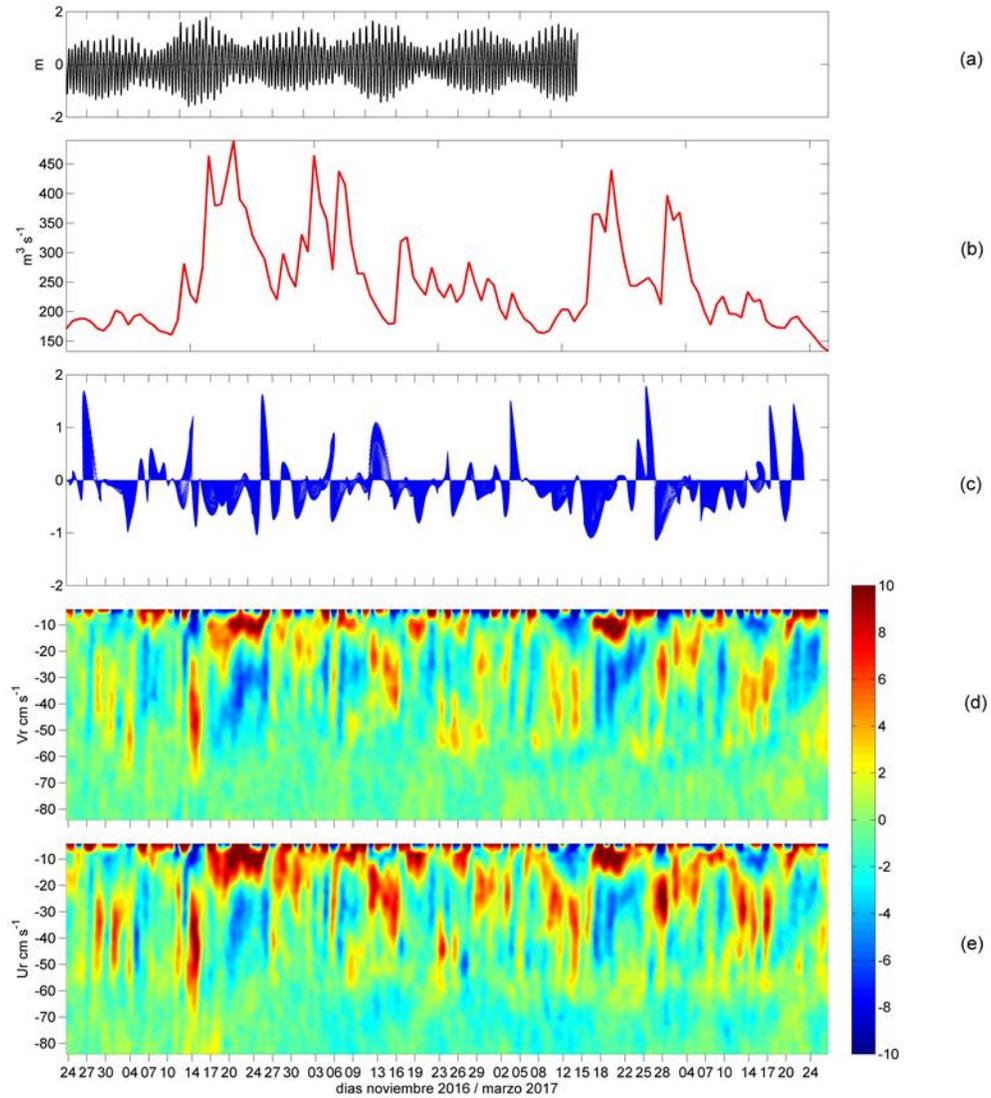


Figura 39. Adcp anclado estero Quitralco entre noviembre 2016 y marzo 2017. (a) anomalía de nivel del mar. (b) caudal río exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.

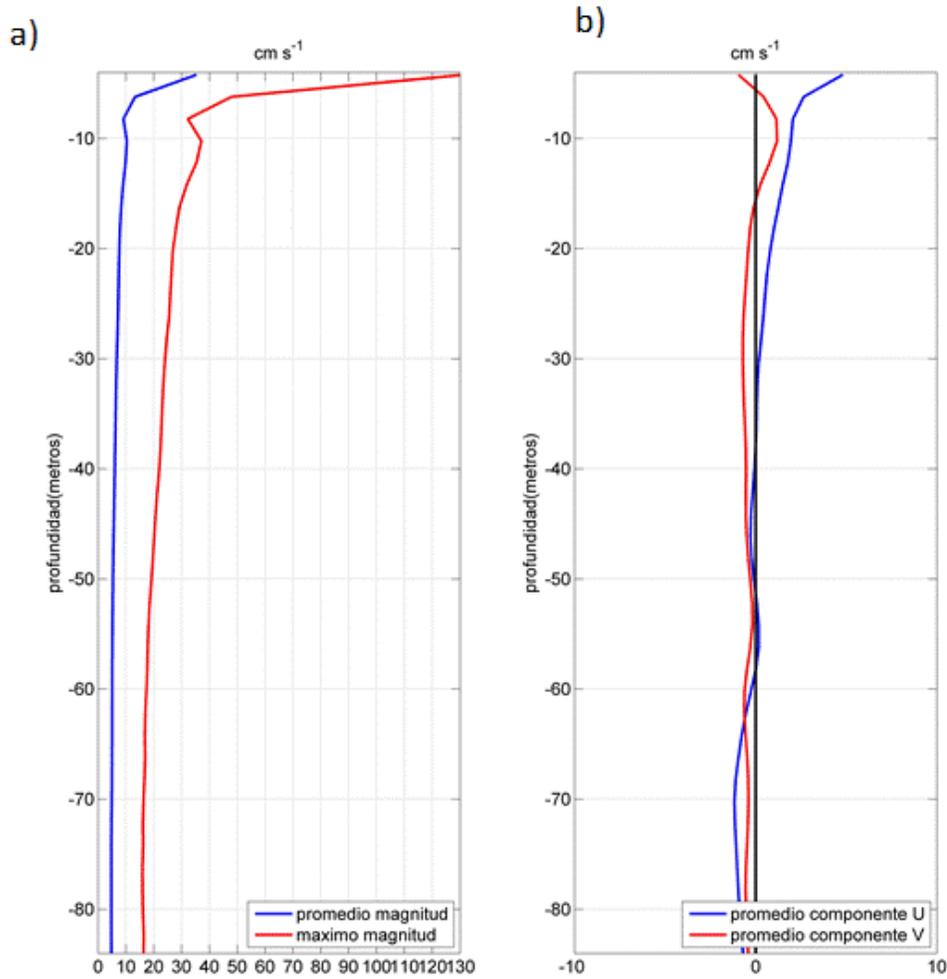


Figura 40. a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Quitralko entre noviembre 2016 y marzo 2017.

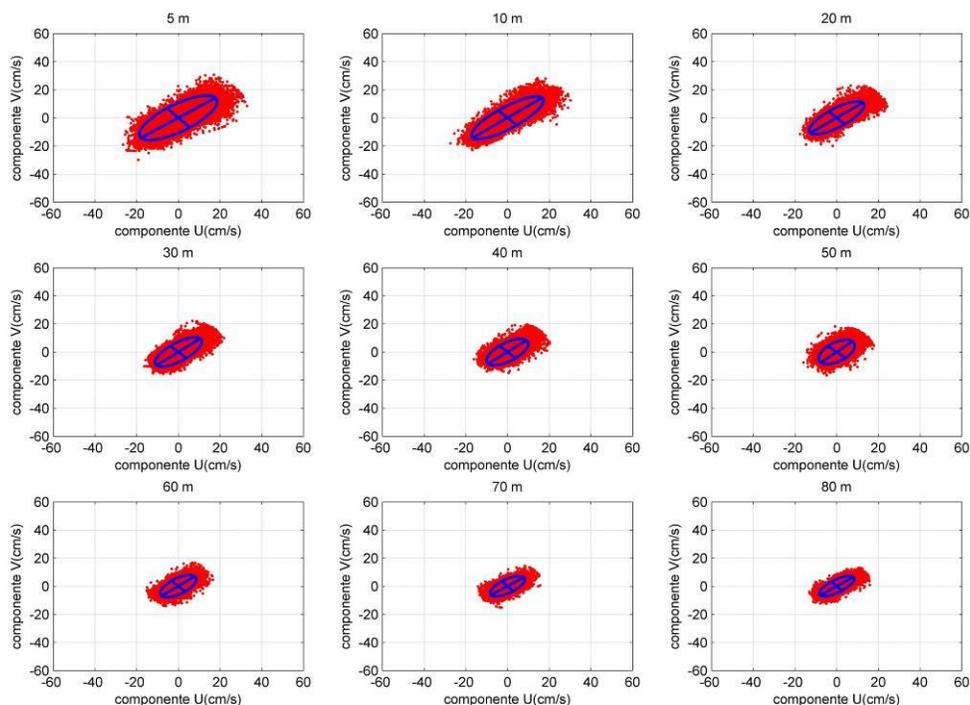


Figura 41. Elipses de máxima varianza en las capas de 5-10-20-30-40-50-60-70-80m en estero Quitralco entre noviembre 2016 y marzo 2017.

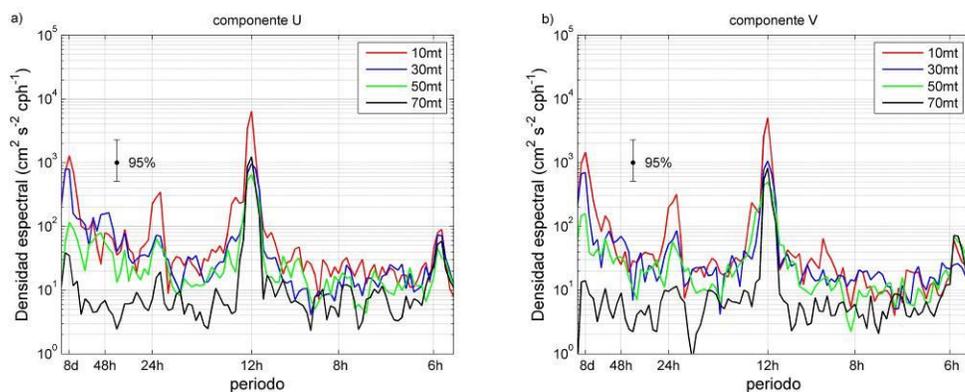


Figura 42. Densidad espectral de la corriente. (a) Espectro de la componente U; (b) espectro de la componente V en estero Quitralco entre noviembre 2016 y marzo 2017.

Estero Cupquelan

Las componentes ortogonales residuales (**figura 43d y 43e**) mostraron una alta variabilidad en la dirección del flujo junto con una configuración de este en capas.

Los perfiles verticales de la magnitud evidencio máximos superficiales de 50 cm s^{-1} disminuyendo paulatinamente a 20 cm s^{-1} , en tanto el promedio se mantuvo en los 10 cm s^{-1} (**figura 44a**).

El perfil promedio vertical de las componentes ortogonales presento una dirección noreste en superficie para luego ir en dirección oeste-norte, de bajas intensidad ($<5 \text{ cm s}^{-1}$) (**figura 45b**). Las elipses de máxima varianza revelaron una dirección noreste-suroeste, concordante con el eje del canal (**figura 45**).

La densidad espectral evidencio importantes peaks en las componentes de 24h, 12h y 6h (**figura 46**).

El análisis armónico efectuado a la corriente en estero Cupquelan reveló una influencia mareal de 60.6 % a 5m; 59.9 % a 10m; 60.4 % a 20m; 62.0 % a 30m; 64.9 % a 40m; 62.9 % a 50m; 58.8 % a 60m.

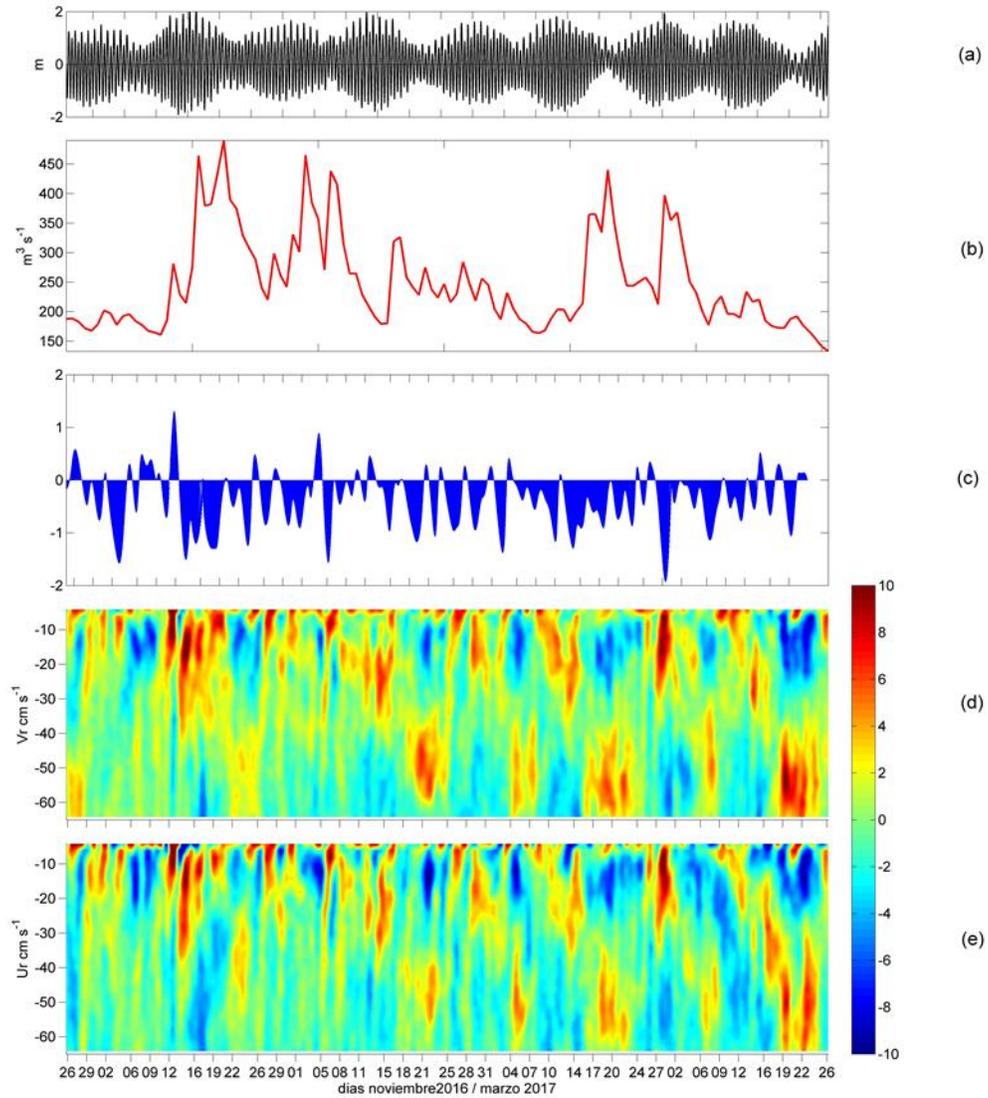


Figura 43. Adcp anclado estero Cupquellan entre noviembre 2016 y marzo2017. (a) anomalia de nivel del mar. (b) caudal rio exploradores. (c) vector de vientos. (d) componente V residual. (e) componente U residual.

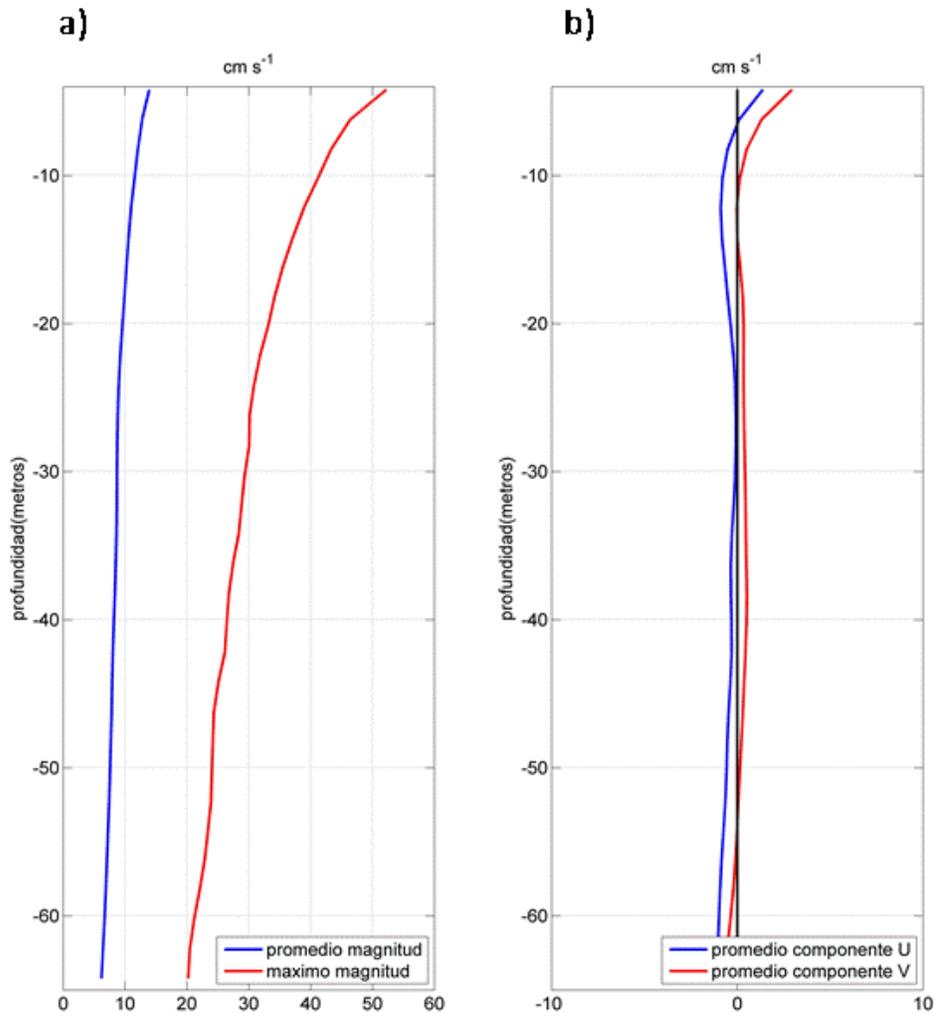


Figura 44. a) Perfiles promedio y máximo de la magnitud de la corriente. (b) perfiles promedio de las componentes ortogonales este (U-azul) y norte (V-rojo). En estero Cupquellan entre noviembre 2016 y marzo 2017.

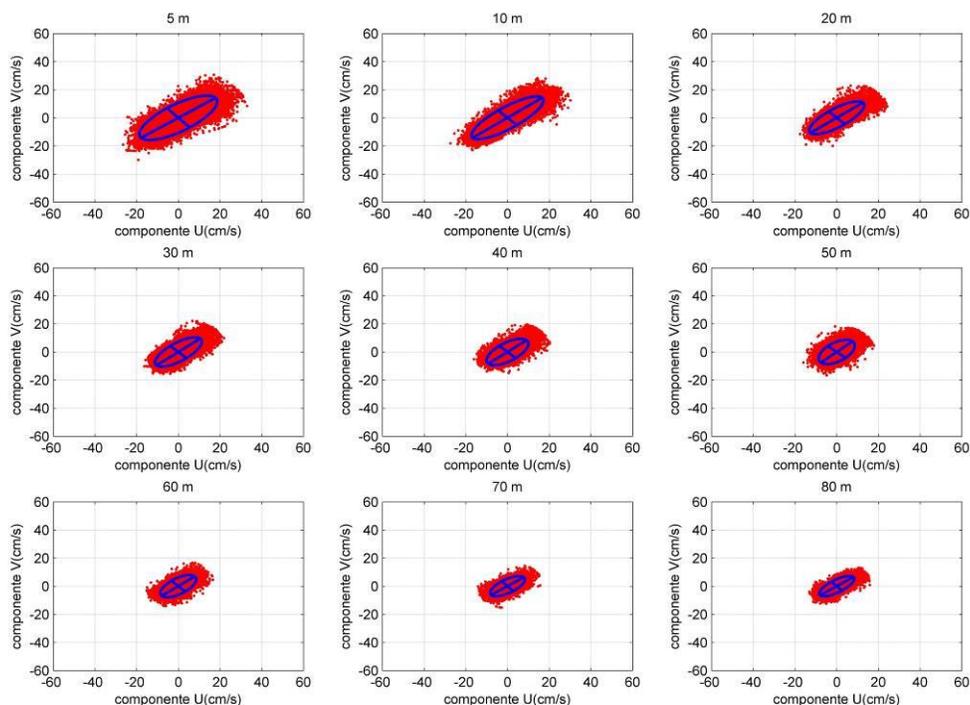


Figura 45. Elipses de máxima varianza en las capas de 5-10-20-30-40-50-60-70-80m en estero Cupquelan entre noviembre 2016 y marzo 2017.

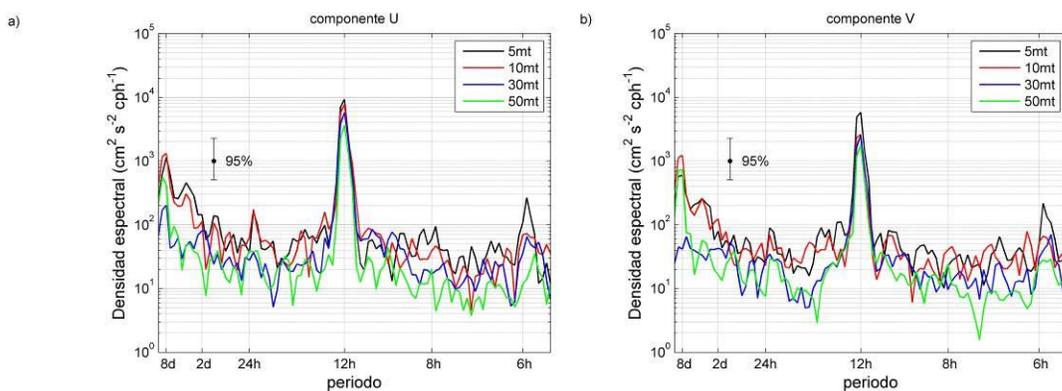


Figura 46. Densidad espectral de la corriente. **(a)** Espectro de la componente U; **(b)** espectro de la componente V estero Cupquelan entre noviembre 2016 y marzo 2017.

5.3 Objetivo 2.2.3. Realizar una caracterización hidrográfica con registros de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químico-biológicas, con la hidrodinámica del sistema.

Conformación batimétrica (figura 47)

En general la batimetría de la zona de estudio fue irregular, en la conexión del sistema Elefante con la zona exterior destaca la entrada de canal Costa con profundidades mayores a 230m, la entrada del paso Tres Cruces registró una profundidad ~ 50 m y la entrada del Estero Elefante presentó una profundidad media de 125m, disminuyendo abruptamente hasta estrecharse en Pta. Celtu con profundidad < 25 m. Dentro del golfo Elefante aumenta ≈ 100 m, estrechándose nuevamente en río Tempano > 20 m llegando en laguna San Rafael hasta los 100m. El fiordo Cupuelan presentó una batimetría con un sil en la boca, generando una constricción batimétrica hacia la cabeza, donde se hace más regular con profundidades ≈ 230 . El fiordo Quitralco también mostró un sil en la entrada con una profundidad ≈ 50 m hasta la cabeza, con una batimetría irregular donde se observa un segundo sil hacia el interior, junto a una depresión hacia la cabeza de ≈ 250 .

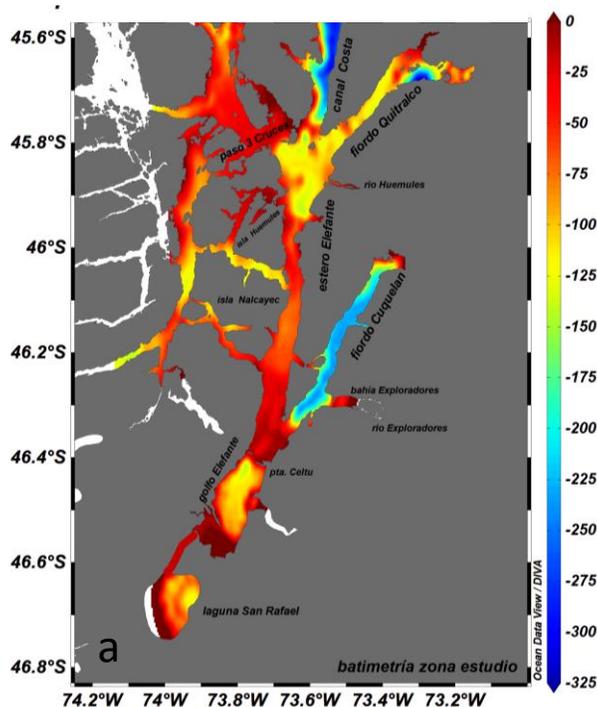


Figura 47. Batimetría zona de estudios

Estructura termo-halina (figura 48, 49, 50 y 51).

La salinidad mostró diferencias espaciales en su estructura vertical, las cuales se encuentran en cierta medida relacionadas con la batimetría. La distribución vertical de las mediciones localizadas desde canal Costa, estero Elefante, golfo Elefante hasta Laguna San Rafael, se mostraron mayoritariamente homogéneas, exceptuando algunas estaciones en canal Costa y paso Tres Cruces y la boca estero Elefante donde la salinidad superficial fue menor, con un gradiente medio $\approx 0,05$

psu/m. Es importante mencionar que la salinidad reveló una manifiesta disminución desde la entrada del canal Costa hacia la laguna San Rafael exhibiendo un marcado frente halino (gradiente de 0,1 psu/Km para todos los periodos medidos), de esta manera las estaciones de la parte norte (canal Costa y paso Tres Cruces y boca estero Elefante) registraron una salinidad ≈ 30 psu mientras que las estaciones de más al sur (entre golfo Elefante y laguna San Rafael) exhiben salinidades menores a 27 psu. La temperatura exhibió un comportamiento similar al de la salinidad: los perfiles evidencian una distribución vertical mayoritariamente homogénea, exceptuando las capas más superficiales, las cuales muestran temperaturas más elevadas en noviembre y marzo. No obstante no se observó presencia de termoclina en ningún periodo con gradiente medio 0,01 °C/m, además la temperatura también experimenta una marcada disminución desde canal Costa hacia la laguna San Rafael (-0,01°C/km). Las estaciones de más al sur registraron temperaturas medias mayores a 10°C, en contraste a las estaciones más hacia sur donde las temperaturas fueron menores a ≤ 9 °C.

La estructura termo-halina de los fiordos Cupquelan y Quitralco dejaron ver una estructura de 2 capas, una superficial sobre 25m, en la cual se registró la mayor variabilidad del sistema (10-25 psu fiordo Cupquelan; 20-28 psu fiordo Quitralco) y una más profunda por debajo de los 50 metros, con una tendencia a la uniformidad (~ 28 psu y ~ 10 °C para fiordo Cupquelan. ~ 30 psu y $10 - 11$ °C para el Fiordo Quitralco), donde se registraron marcadas haloclina y termoclina, con gradientes medios de 0,2 psu/m para el fiordo Quitralco y 0,3 psu/m para el fiordo Cupquelan. La temperatura registró gradientes medios -0,1°C/m fiordo Quitralco y -0,2 fiordo Cupquelan con diferencias estacionales características de la zona estuarina de fiordos y canales australes: en invierno se presenta una inversión térmica, mientras que en el periodo estival las mayores temperaturas están delimitadas a la superficie.

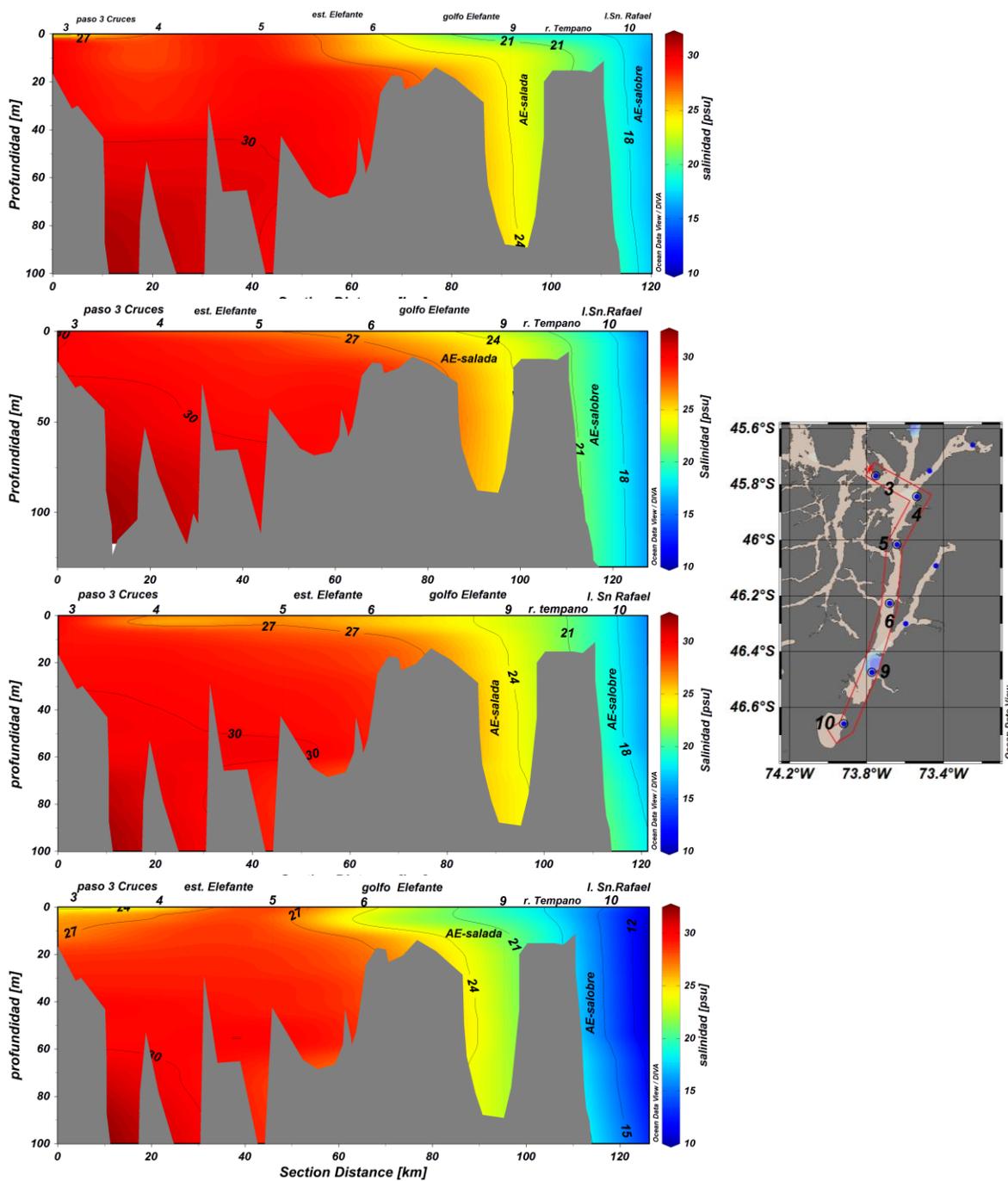


Figura 48. Distribuci3n vertical de salinidad entre paso Tres Cruces y Laguna San Rafael.

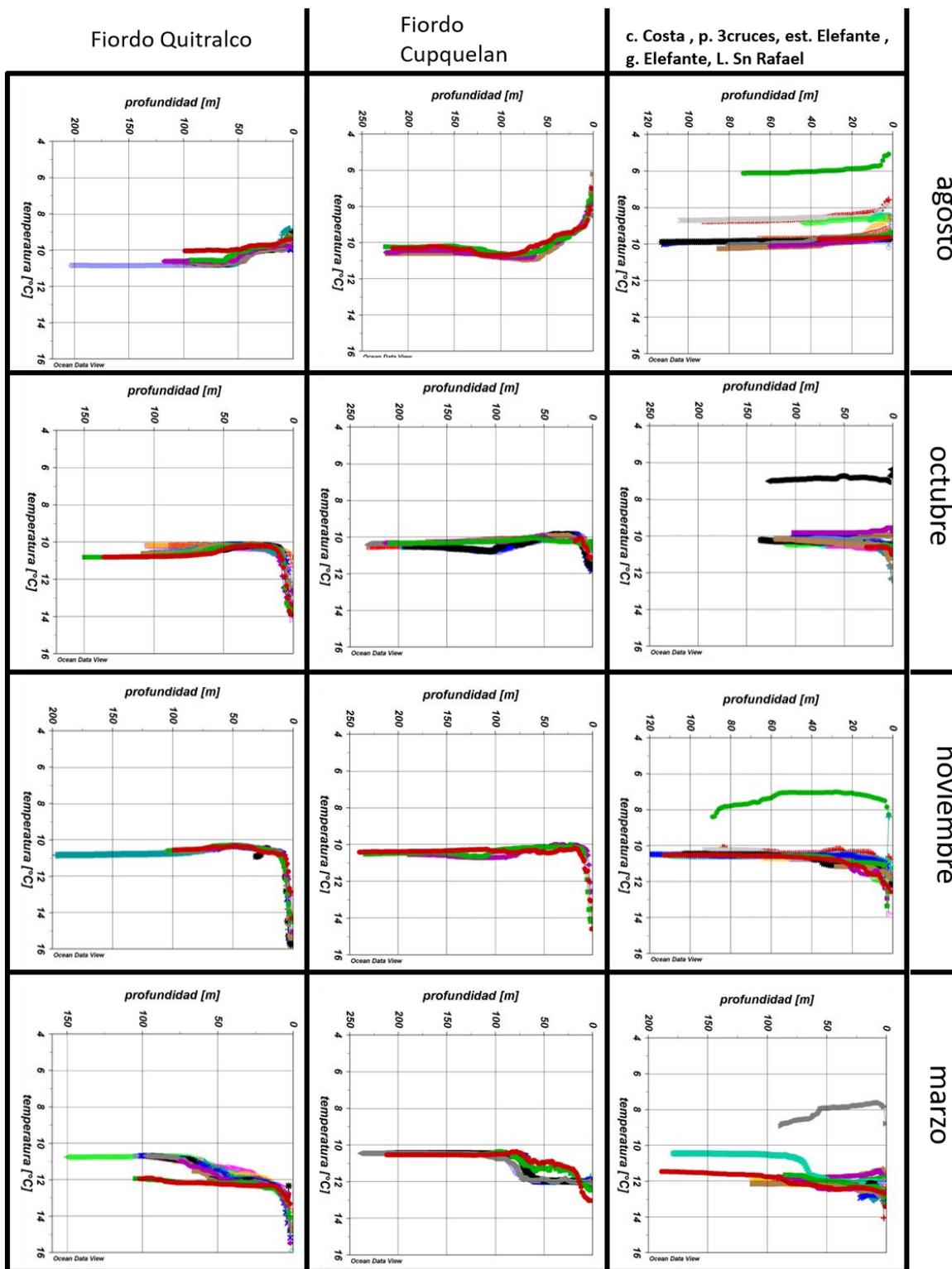


Figura 49. Perfiles de temperatura por sectores.

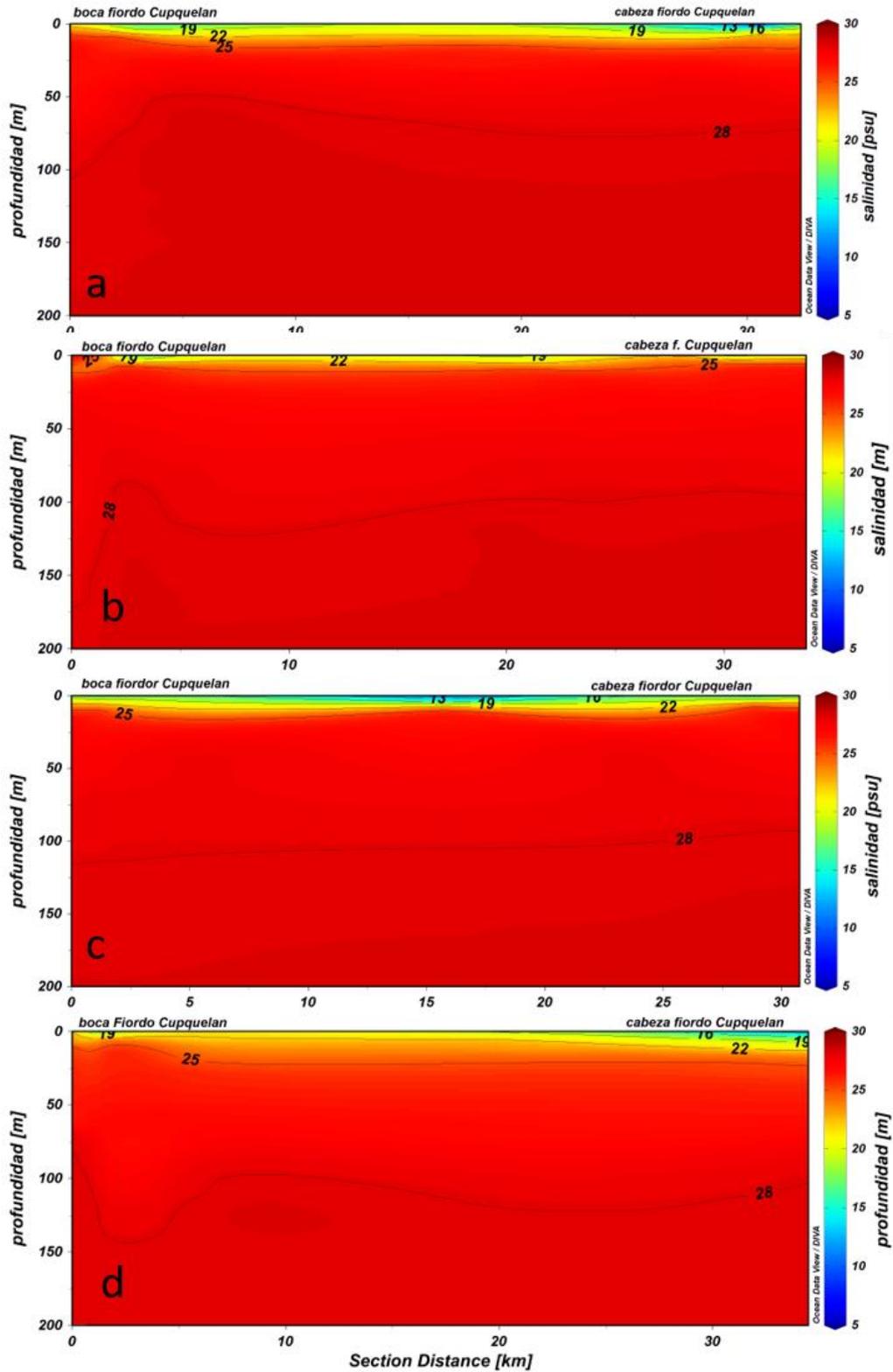


Figura 50. Distribución vertical de salinidad en Fierdo Cupuelan

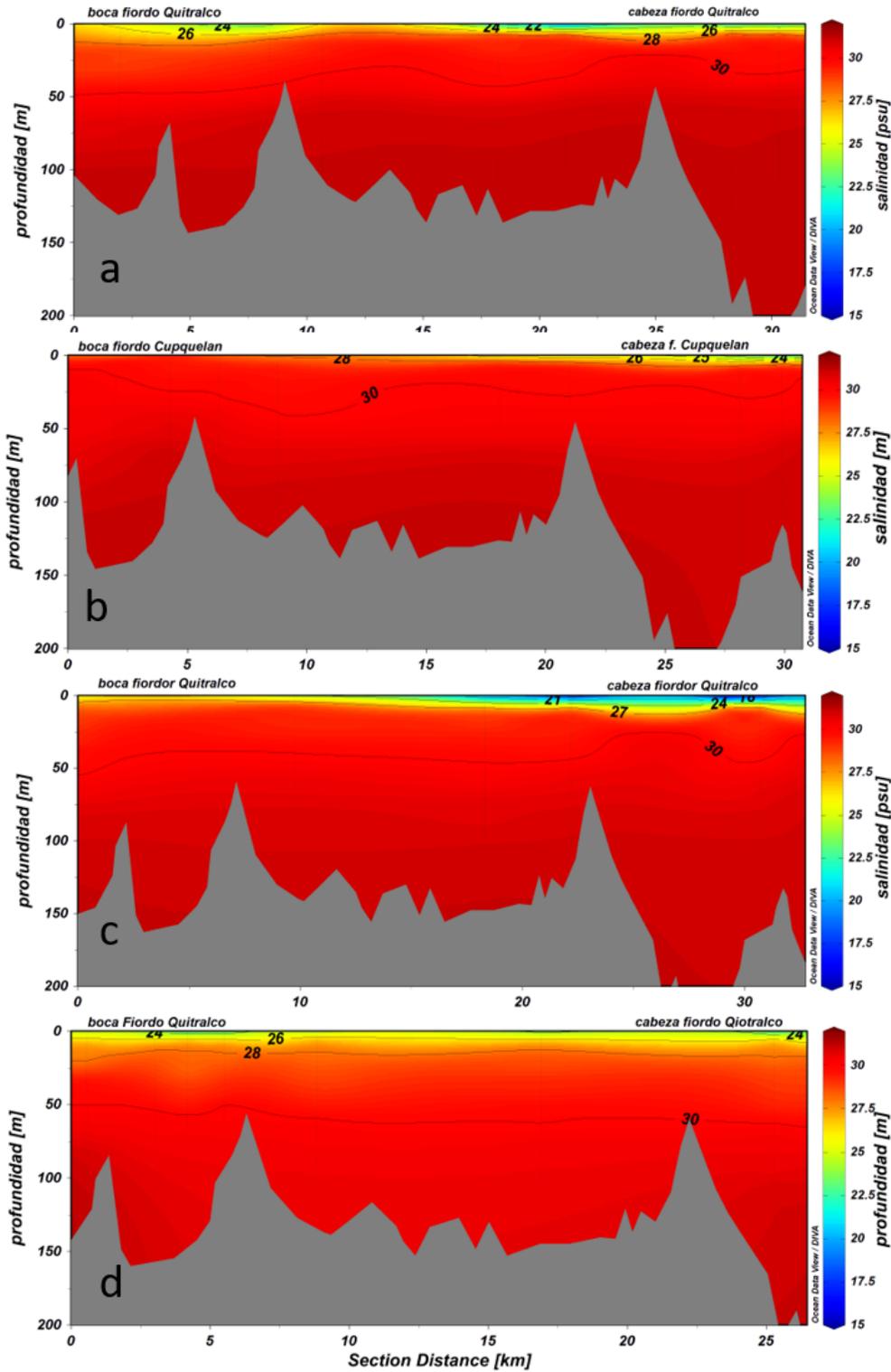


Figura 51. Distribución vertical de salinidad en fiordo Quitrалco

El análisis mediante diagramas T-S (**figura 52**) señala que no se encontró presencia de ninguna de las masas de agua de la zona sur Austral, principalmente ASAA (Agua Sub-Antártica), evidenciando que toda la cuenca del sistema denominado Elefante está compuesta por agua estuarina (AE), cuya mezcla es básicamente el resultado de dos cuerpos de agua: Agua estuarina Salobre (AE-salobre) y agua estuarina salada (AE-salada), siendo el AE-salobre predominantemente en la capa superficial de los fiordos Quitrалco, Cupquellan y toda la columna de agua en laguna San Rafael, mientras que el AE-salada se localizó bajo la superficie en fiordo Quitrалco, Cupquellan y en toda la columna de agua y en toda la columna de agua del golfo Elefante y estero Elefante. Se observaron algunas diferencias en las temperaturas, con incrementos importantes en octubre, noviembre y marzo, como así también algunos incrementos en la concentración de oxígeno disuelto.

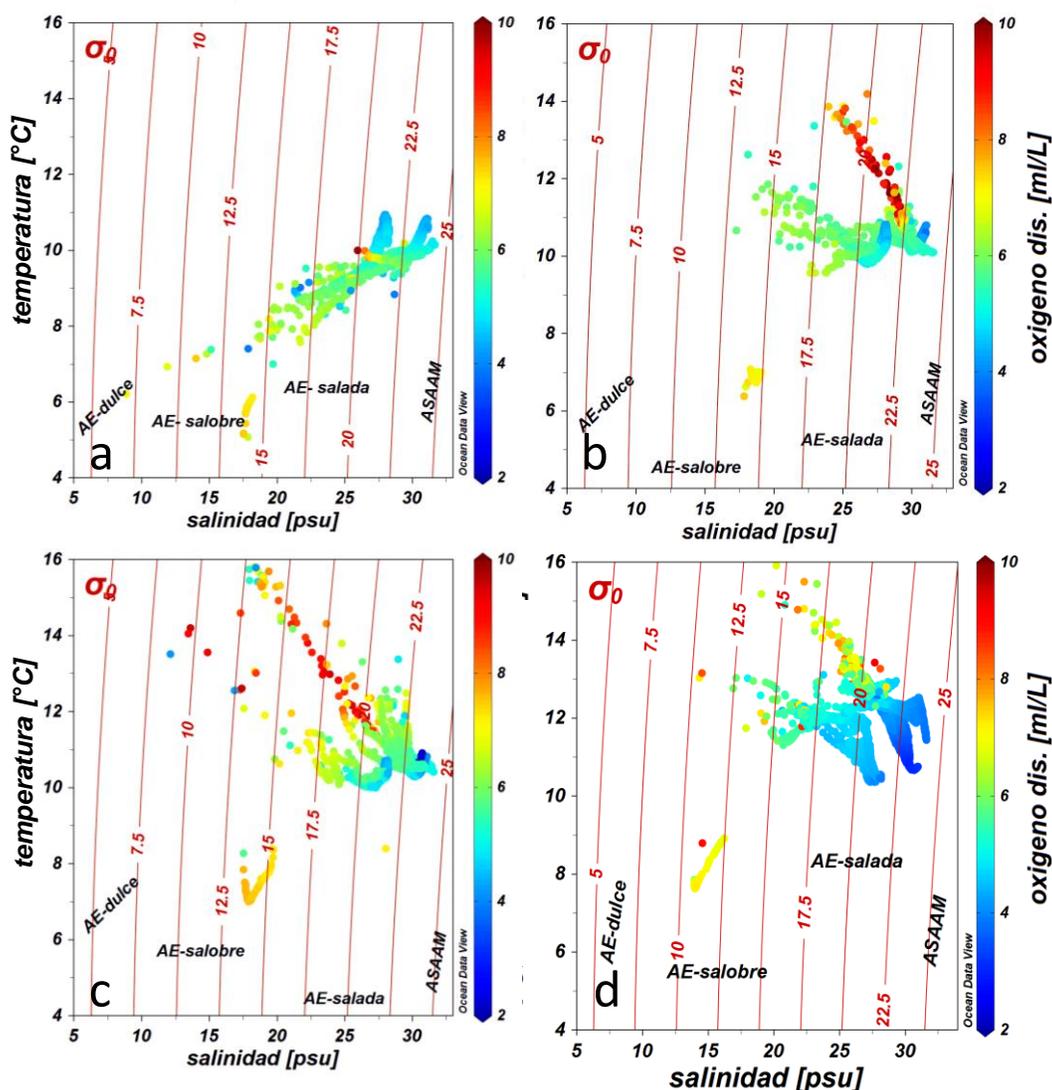


Figura 52. Diagrama Temperatura Salinidad (T-S) señalando el cuerpo de agua característico para: a) agosto b) octubre c) noviembre, d) marzo.

Los grados de estratificación mediante el parámetro de mezcla, revelaron diferencias espaciales y temporales en las micro-cuencas conformadas por estero Elefante y golfo Elefante, donde se presentaron los valores más bajos de todo el periodo de estudio, infiriendo que se encontró mayormente mezclado. Las micro-cuencas de Quitralco y Cupquelan presentaron valores elevados indicando estratificación en todos los periodos medidos, destacando que los mayores grados de estratificación se registraron en el Fiordo Cupquelan (**figura 53**).

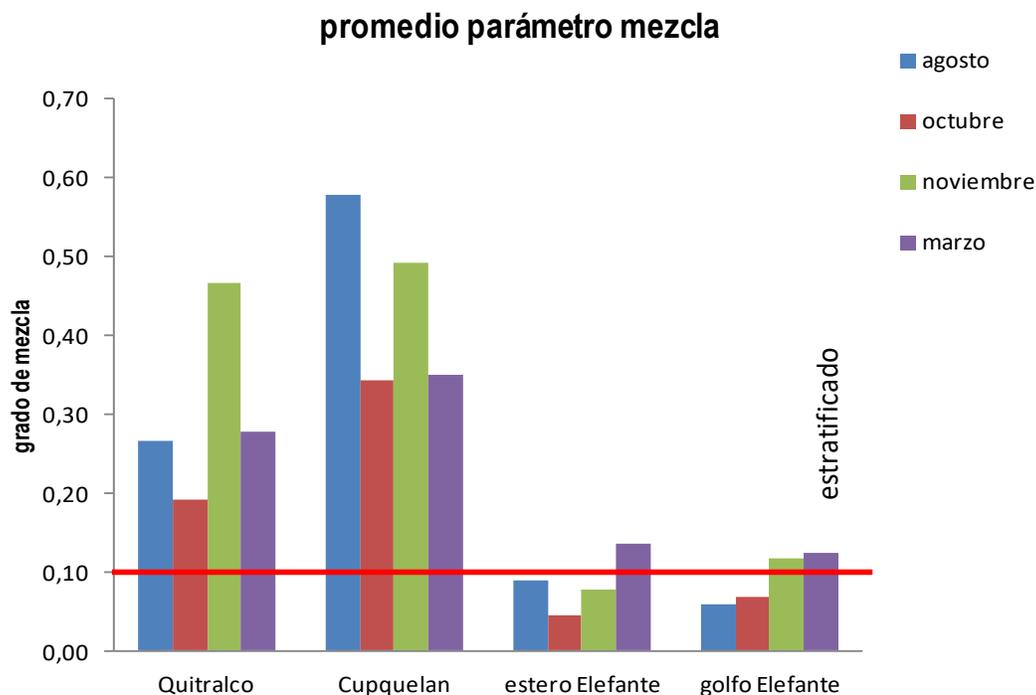


Figura 53. Parámetro de mezcla promedio para las diferentes micro-cuencas de la zona de estudio y para cada periodo.

Series de tiempo temperatura

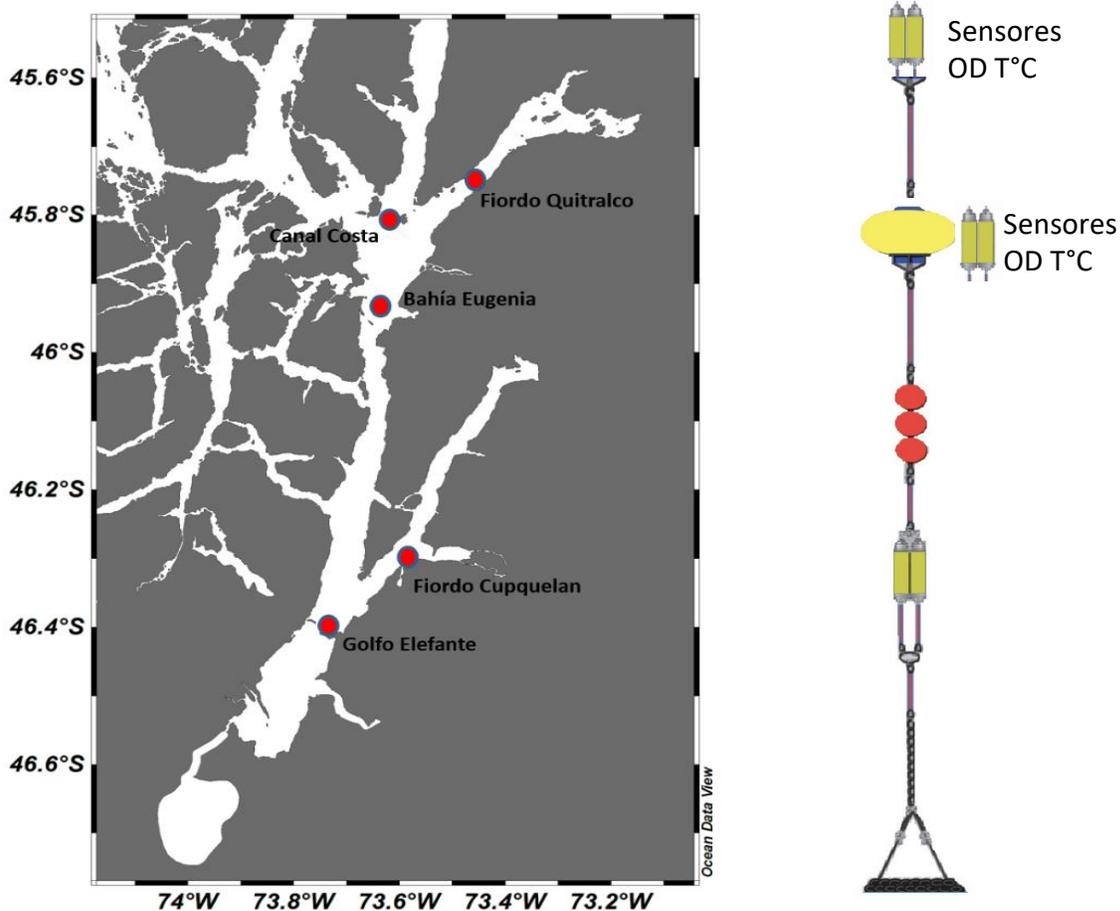


Figura 54. Posición geográfica de instalación sensores de temperatura y oxígeno disuelto, esquema de anclaje.

canal Costa (Figura 55)

Los registros de temperatura en el sensor localizado a 15 metros, tuvieron un valor medio de 11,18°C, entre agosto y noviembre la temperatura se mantuvo estable, entre 9,5-10°C, a partir de noviembre se observó un aumento sostenido de la temperatura, señalando que a finales de diciembre esta se elevaba por encima de los 11,5°C, alcanzando los máximos en marzo ≈12°C.

La temperatura media durante el periodo de medición fue de 10,95°C, entre agosto y octubre la temperatura se mantuvo estable ~10°C. a partir de noviembre se registró un aumento constante hasta alcanzar los máximos en marzo ≈12°C.

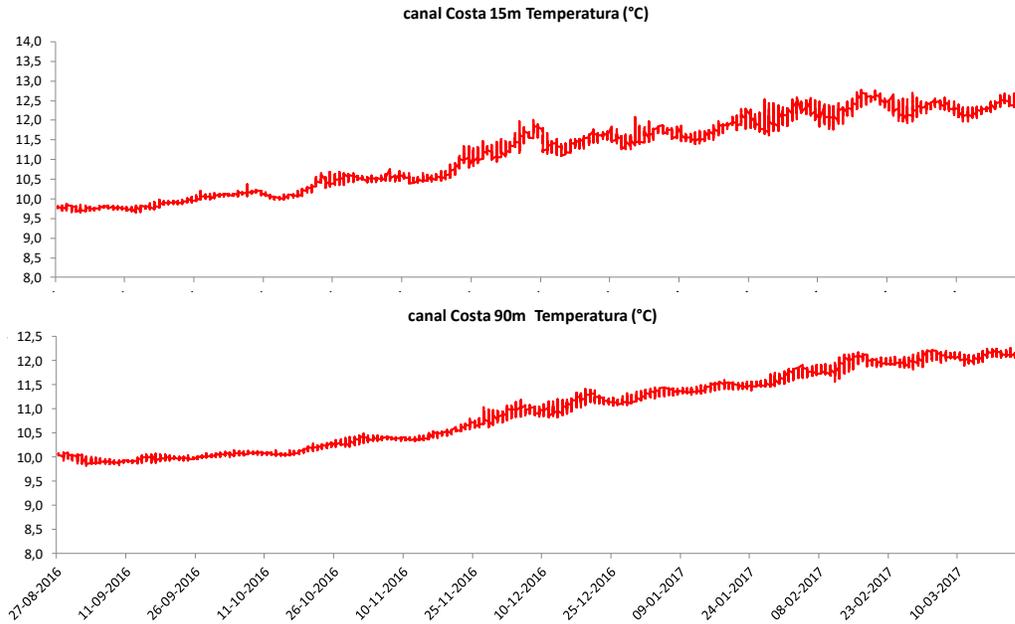


Figura 55. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados en canal Costa a 15 y 90 metros.

Bahía Eugenia Figura 56

La temperatura media en el sensor de 15 metros, localizado en bahía Eugenia, fue de 10,14°C. se observó un aumento sostenido desde agosto con registros de ~9,5 hasta noviembre alcanzando los máximos registrados (~11°C).

El sensor de temperatura en bahía Eugenia instalado a 90m, registró una media de 10,97°C. la temperatura no presentó grandes fluctuaciones, destaca el aumento sostenido desde agosto ≈10°C hasta alcanzar los máximos registros térmicos ≈12°.

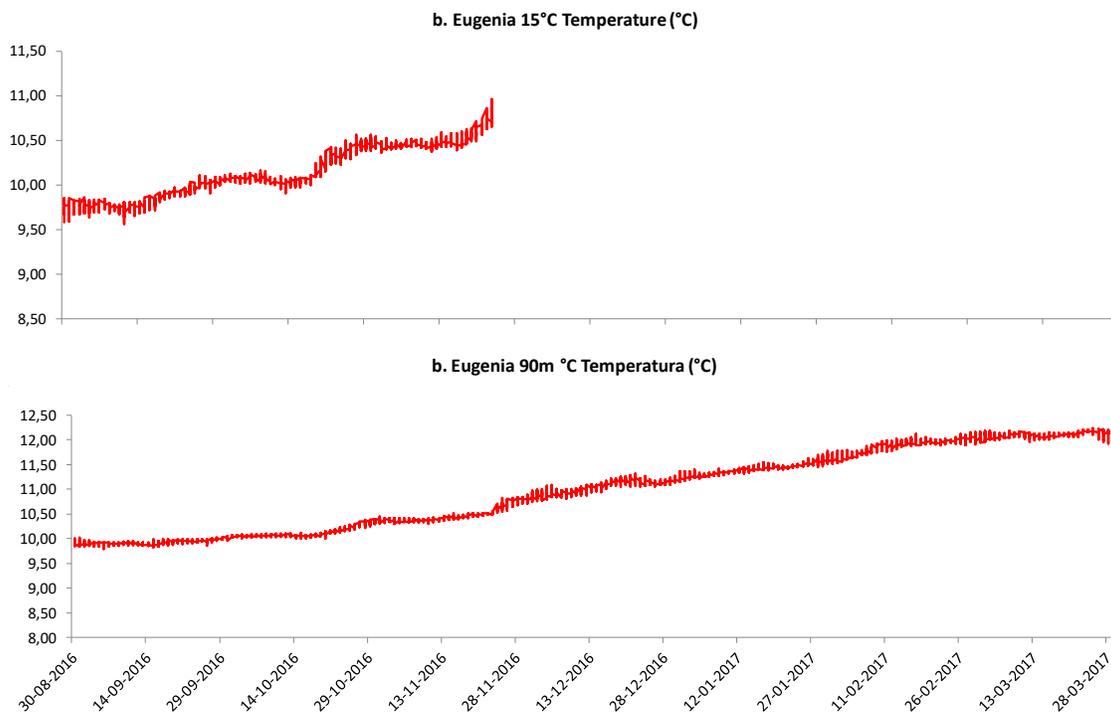


Figura 56. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados en bahía Eugenia a 15 y 90 metros.

Golfo Elefante Figura 57

Los registros de temperatura en golfo Elefante, presentaron el mismo patr3n de distribuci3n temporal y rangos de valores, dado lo cercano a la profundidad de instalaci3n (3 y 8 metros respectivamente). Para ambos sensores la concentraci3n promedio fue de 10,97°C. Los registros de temperatura exhibieron una baja fluctuaci3n, pero si una tendencia a incrementarse con el tiempo sostenidamente, desde agosto con los menores valores de temperatura (~9°C) hasta alcanzar los mayores registros t3rmicos 12°C en marzo.

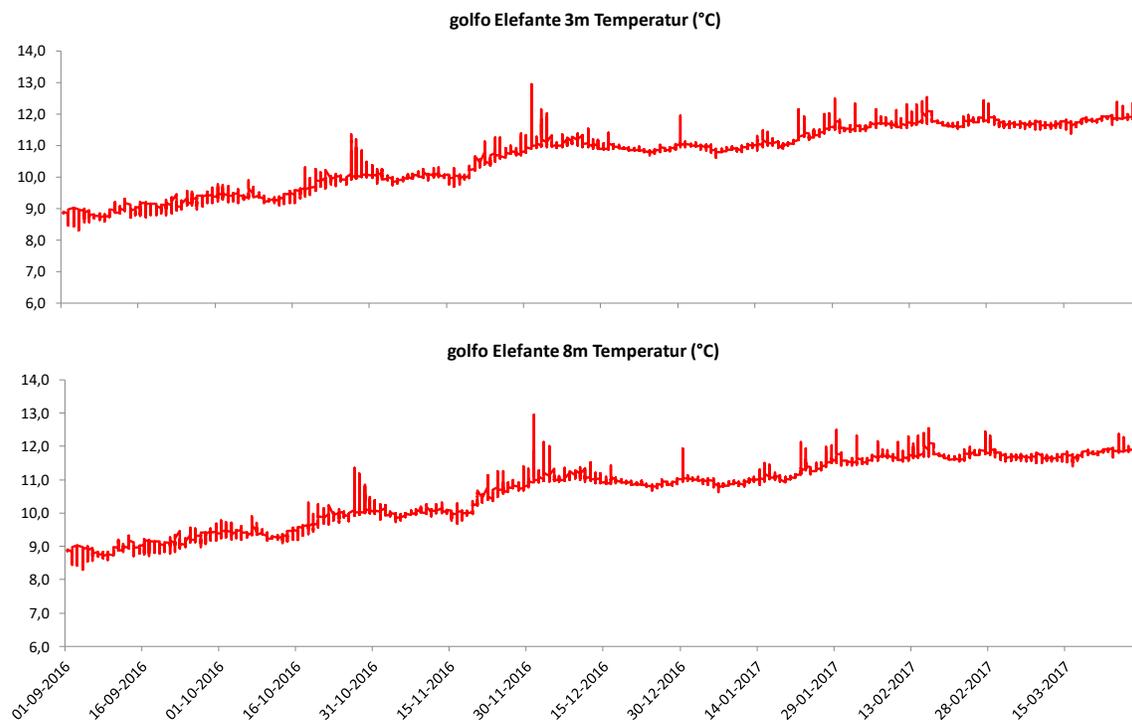


Figura 57. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados en golfo Elefante a 3 y 8 metros.

Cupquellan Figura 58

La temperatura del sensor en fiordo Cupquellan instalado a 10m, presentó una media de 9,77°C. la temperatura fluctuó entre ~9-10°C, se exhibió un incremento constante desde septiembre hasta noviembre.

En el fiordo Cupquellan, el sensor de temperatura, instalado a 90 metros, presentó una media de 10,51 ml/L. Entre septiembre se observó mayor fluctuación en la temperatura 9,5-10,5 °C, entre octubre-noviembre la temperatura, se estabiliza ~10°C. Entre diciembre y enero la temperatura se incrementa a ≈10,5°C, desde enero a febrero aumenta la fluctuación térmica 10,5-12°C.

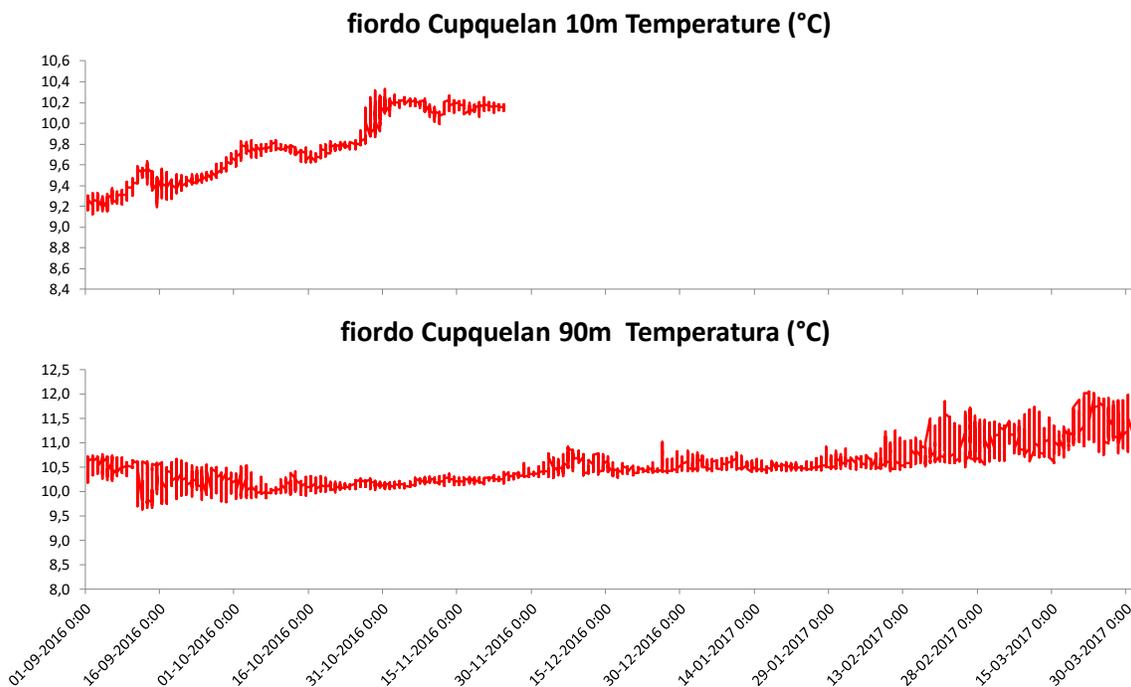


Figura 58. Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados fiordo Cupquellan a 10 y 90 metros.

Quitralco Figura 59

El sensor de temperatura en fiordo Quitralco a 15m, tuvo una temperatura de 11,27°C, se observó un aumento continuo de los registros térmicos en el tiempo con las mínimas en agostos (10°C), hasta alcanzar las máximas temperaturas en marzo (≈12°C). En contraste la temperatura media fue de 10,6, si bien la temperatura se mantiene estable entre 10,5-10,8°C, se observa una tendencia de aumento en el tiempo, siendo está más consistente entre diciembre y marzo, siendo este último mes el de mayor temperatura.

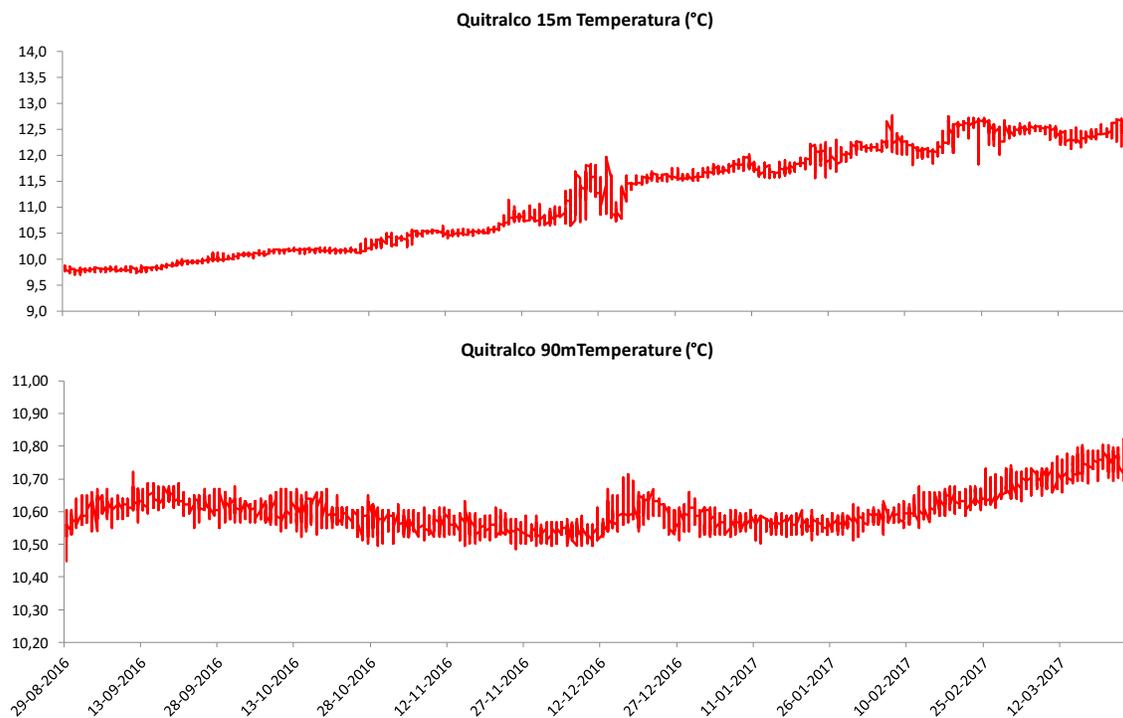


Figura 59 Series de tiempo de temperatura, de los sensores instalados fiordo Quitralco a 15 y 90 metros.

Oxígeno disuelto

En agosto el oxígeno disuelto tuvo una mínima de 3,82 y una máxima de 9,83 ml/L con una concentración media de $5,15 \pm 0,7$. En octubre la concentración mínima fue 3,87 y la máxima de 10,5 ml/L, con una concentración media de $5,24 \pm 0,8$ ml/L. En noviembre el Oxígeno osciló entre un mínimo de 2,09 y una máxima de 9,56 ml/L, con una concentración media de $5,27 \pm 0,9$ ml/L, mientras que en marzo estuvo entre un mínimo de 2,62 y una máxima de 9,24 ml/L, con una concentración media de $4,32 \pm 0,8$ ml/L.

La distribución vertical de oxígeno disuelto en general, registró los valores más elevados en la capa superficial 0-20m disminuyendo paulatinamente con la profundidad hasta alcanzar los valores mínimos (**figura 60**). Particularmente en las estaciones dentro del Estero Elefante, golfo Elefante y laguna San Rafael, la distribución vertical exhibió algunos máximos superficiales con un descenso discreto, presentándose una columna de agua homogénea, es importante señalar que se exhibieron algunas diferencias relacionadas con la conformación de la batimetría entre las estaciones del eje norte-sur; así las estaciones de más al sur presentaron aguas más oxigenadas (>6 ml/L), en comparación a las estaciones de más al norte. La distribución vertical de oxígeno en los fiordos Quitralco y Cupquellan, tiende a mostrar una columna de agua dividida en 2 capas, en la capa superficial se observaron los valores más elevados, específicamente en f. Quitralco se detectaron las mayores concentraciones de todos los periodos, con un incremento de los valores desde octubre hasta marzo. No obstante, también fueron registrados los valores más bajos (≈ 2 ml/L). En cambio f. Cupquellan exhibió valores más homogéneos, bajo los 50 metros con concentraciones $\approx 4-5$ ml/L.

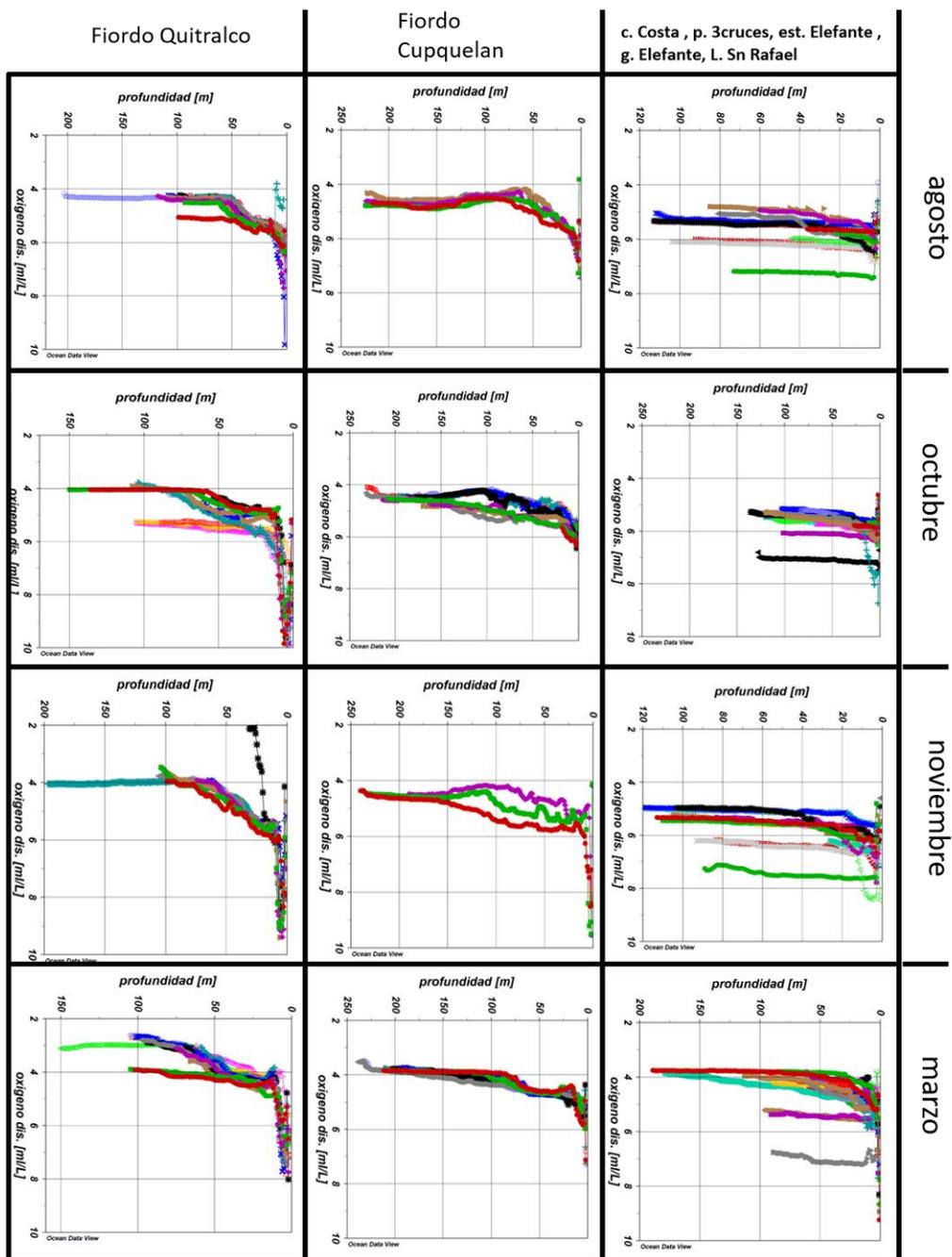


Figura 60. Distribución vertical de oxígeno disuelto por sectores.

Series de tiempo sensor oxígeno disuelto.

Canal Costa figura 61

En la capa de los 15 metros, el oxígeno tuvo una concentración media de 5,66 ml/L, se observó que entre agosto y diciembre, mantiene fluctuaciones entre 5,5-7 5,66 ml/L, con máximos en septiembre

y noviembre, a partir de diciembre la concentración se mantiene fluctuante, pero con tendencia a disminuir sostenidamente hasta marzo, destacando las mínimas de febrero y marzo con valores de hasta 4-5 ml/L.

La concentración media de oxígeno en el sensor de 90metros fue de 5,12ml/L. Entre agosto y diciembre los registros fluctuaron entre 5-6 ml/L. a finales de diciembre se registró una baja del orden 3,5 ml/L, a partir de enero se observó una tendencia a la baja en la concentración con valores ~4ml/L.

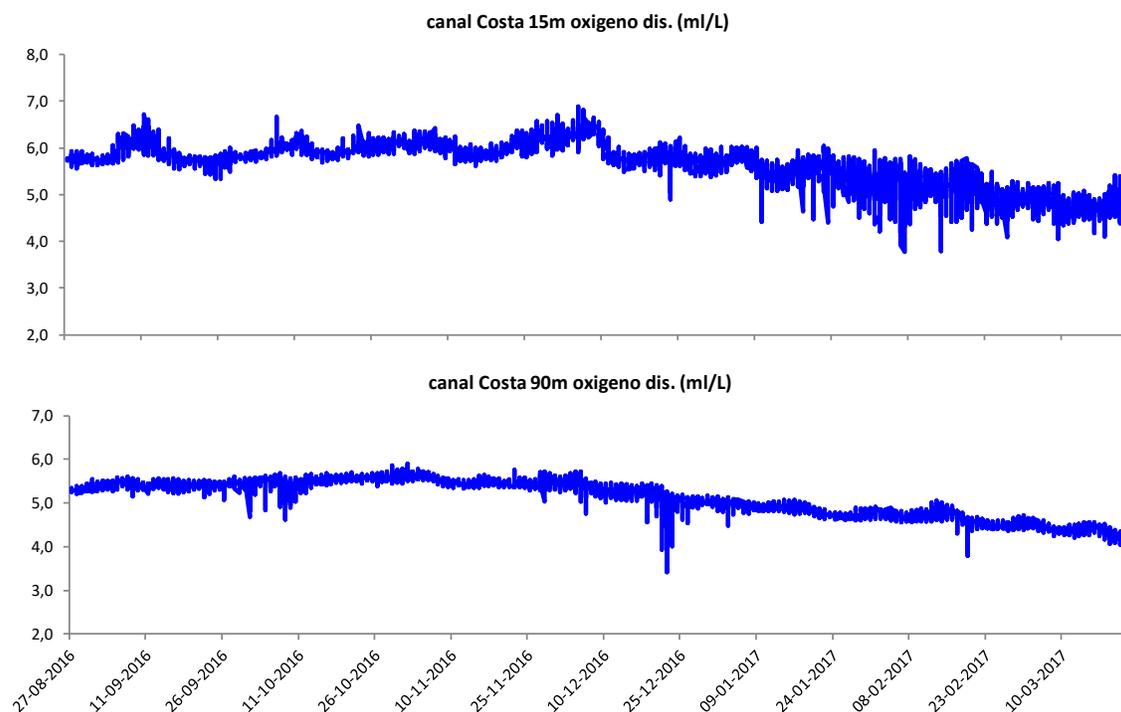


Figura 61. Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados en canal Costa a 15 y 90 metros.

Bahía Eugenia figura 62

El oxígeno en bahía Eugenia a 15 metros tuvo una concentración media de 5,7 ml/L, fluctuando entre los 5,5 a 6,4 ml/L, desatancando las máximas de septiembre y octubre.

El sensor de oxigeno instalado a 90m en bahía Eugenia, tuvo una concentración media de 5,02 ml/L. Entre agosto y octubre, la concentración se mantiene con baja fluctuación (5-5,5 ml/L), en diciembre comienza una disminución sostenida, hasta marzo destacando lo mínimos detectados ~3ml/L.

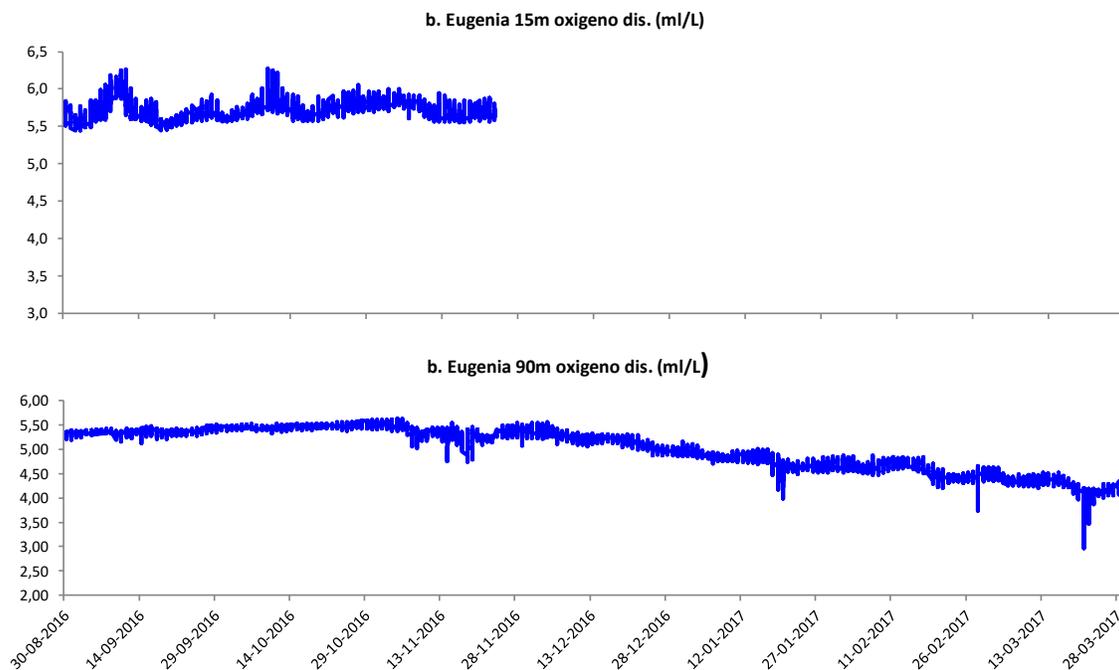


Figura 62. Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados en bahía Eugenia a 15 y 90 metros.

Golfo Elefante figura 63

Los registros de oxígeno disuelto, presentaron el mismo patrón de fluctuación y rangos de oxígeno, dado lo cercano a la profundidad de instalación (3 y 8 metros respectivamente) se describen en conjunto ambos sensores. La concentración promedio fue de 5,02 ml/L. entre agosto y principio de octubre se observó una fluctuación baja 6ml/L, a mediados de octubre se registró las concentraciones más bajas ~3 ml/L. La concentración se mantiene estable en noviembre y nuevamente baja (principio de diciembre) pero solo hasta los 4ml/L, posteriormente entre diciembre y febrero se mantiene estable con valores en torno a 6ml/L, entre febrero y marzo la concentración decae, fluctuando entre 5 y 6 ml/L.

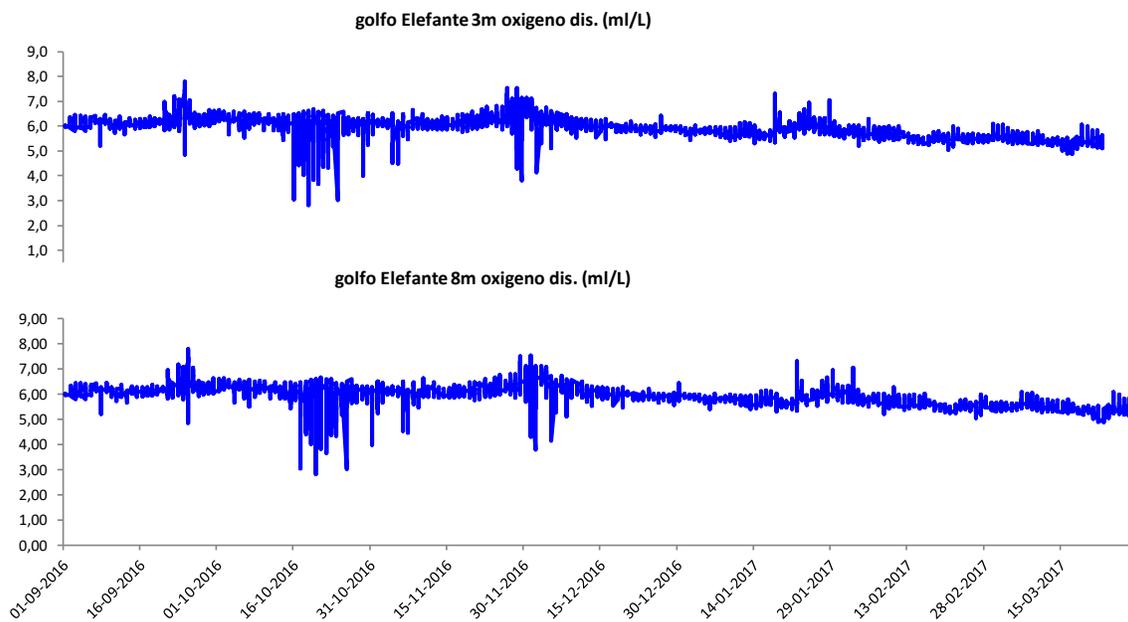


Figura 63. Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados en golfo Elefante a 3 y 8 metros.

Cupquelan figura 64.

El sensor instalado a 10m, tuvo una temperatura media de 5,65°C, exhibiendo una fluctuación entre 4-6ml/L, siendo octubre el mes con los menores registros.

En el fiordo Cupquelan, el sensor de oxígeno, instalado a 90 metros, presentó una concentración media de oxígeno disuelto de 5,01 ml/L. La concentración registró una alta fluctuación entre septiembre y noviembre, con valores entre 4-5,5 ml/L, siendo octubre el mes con los valores más bajos y noviembre los más altos. Entre enero y marzo, disminuye la fluctuación y se observa una tendencia a disminuir, situando la concentración de oxígeno por debajo de lo 5ml/L.

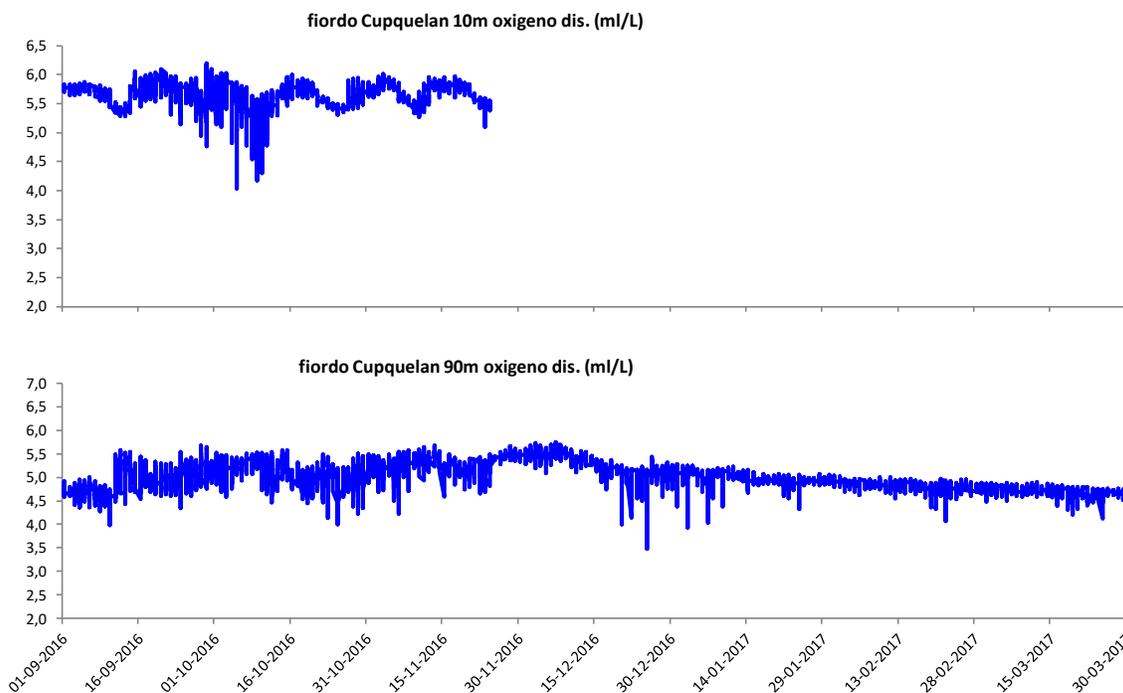


Figura 64. Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados fiordo Cupquelan a 10 y 90 metros.

Quitralco figura 65

Los registros de oxígeno a 15 metros en Fiordo Quitralco, tuvieron una concentración media de 5,23 ml/L, es importante mencionar que no registraron valores por debajo de la hipoxia, la concentración baja en octubre y aumenta en noviembre. Las mayores bajas se observaron en octubre, febrero y marzo, en contraste los mayores valores se observaron en diciembre.

La concentración media fue de 3,40 ml/L. agosto-Septiembre registraron los mayores valores, en octubre decaen lo niveles de oxigeno hasta alcanza niveles de hipoxia, noviembre y diciembre registran concentraciones mayores a la media, a partir de enero se registra una alta variabilidad, aunque la tendencia de la concentración es a disminuir por valores bajo los 3ml/L, exhibiendo valores bajo la hipoxia, con ciclos de 15 aprox.

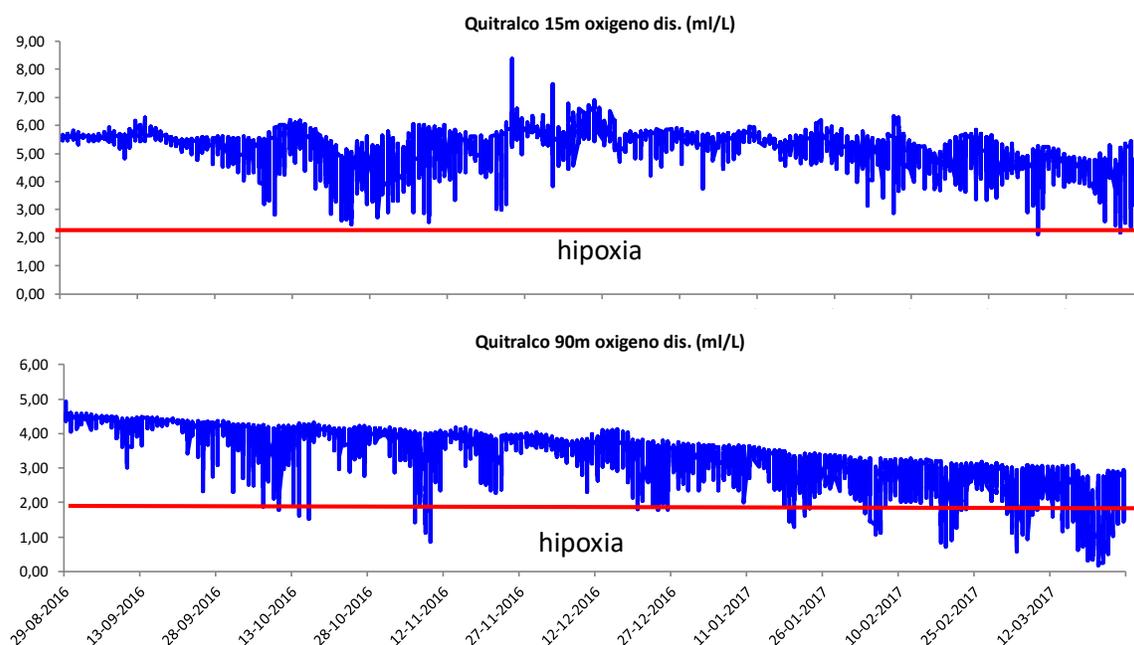


Figura 65 Series de tiempo de oxígeno disuelto, de los sensores instalados fiordo Quitralco a 15 y 90 metros.

Biomasa fitoplanctónica y nutrientes agosto 2016 (figura 66)

La clorofila fluctuó entre 0,13 y 11,34 mg/m^3 con una media de $1,7 \pm 2,3 \text{ mg}/\text{m}^3$. los mayores valores de clorofila se registraron en superficie ~5m, hacia la cabeza del fiordo Quitralco, siendo también la concentración media de este fiordo la más levada 4,12 mg/m^3 , de este periodo ya que el fiordo Cupquellan presentó una concentración media de 0,6 mg/m^3 . Estero Elefante y golfo Elefante 1,2 mg/m^3 (tabla V)

El nitrato registró un mínimo de 1,47 y máximo de 19,52 $\mu\text{mol}/\text{L}$, con una media de $14,55 \pm 3,9 \mu\text{mol}/\text{L}$. El fosfato tuvo una concentración mínima de 0,14 y una máxima de 1,91 $\mu\text{mol}/\text{L}$, con una media de $1,3 \pm 0,4 \mu\text{mol}/\text{L}$. La concentración de silicatos, tuvo rangos entre 6,83 y 43,13 $\mu\text{mol}/\text{L}$ con una media de $16,42 \pm 7,3 \mu\text{mol}/\text{L}$.

La distribución vertical de nutrientes entre paso 3 Cruces y laguna San Rafael, exhibió una columna con tendencia a la uniformidad. El nitrato y el fosfato exhibieron una disminución sostenida desde la entrada del estero Elefante (norte) hacia laguna San Rafael (sur), de esta forma las estaciones de más al norte registraron concentraciones mayores de nutrientes que las estaciones de más al sur. En Contraste en fiordo Cupquellan y Quitralco, los nutrientes exhibieron una estructura de 2 capas, lo menores valores de nitrato y fosfato en superficie (0-20m). bajo la capa superficial la concentración aumenta con registros más elevados hacia la Cabeza del fiordo Quitralco ($\approx 20 \mu\text{mol}/\text{L}$) nitrato y $\approx 1,5 \mu\text{mol}/\text{L}$ fosfato, en cambio en fiordo Cupquellan, el nitrato aumenta, pero solo hasta $\approx 15 \mu\text{mol}/\text{L}$, y el fosfato aumenta a $\approx 2 \mu\text{mol}/\text{L}$.

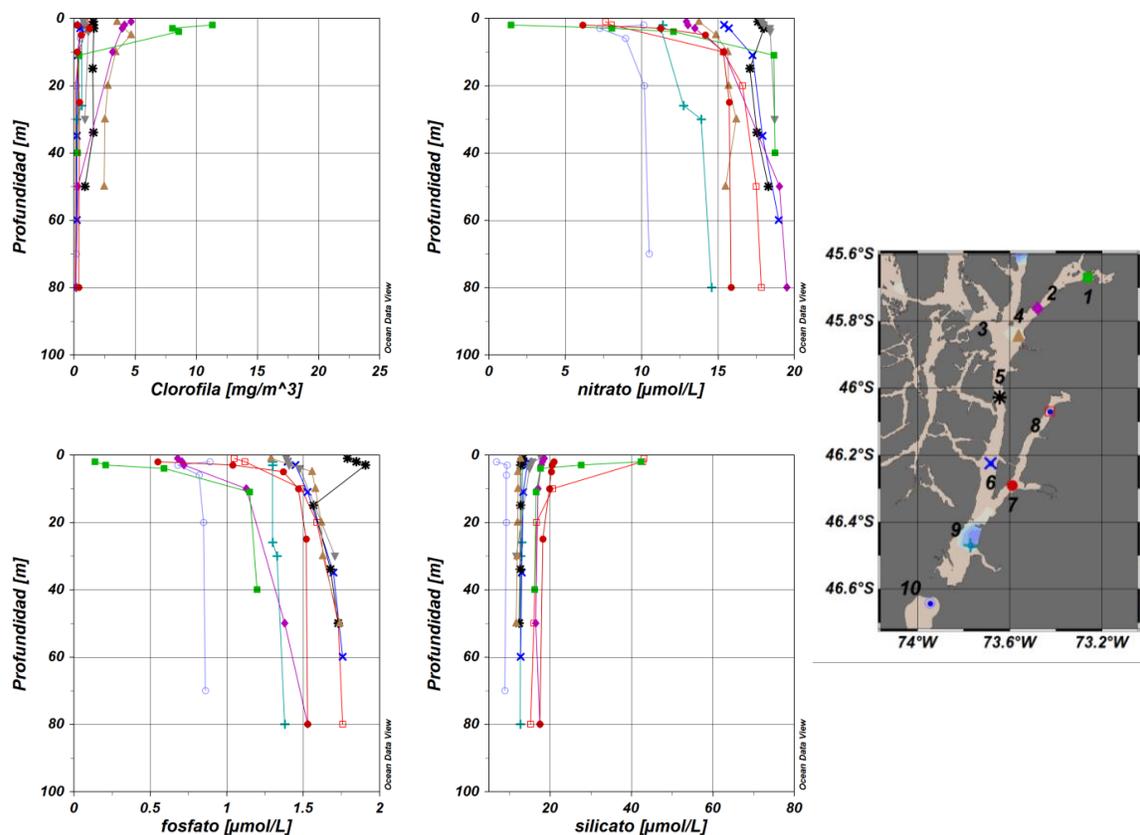


Figura 66: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes: nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol}/\text{L}$) registrados en agosto.

Biomasa fitoplanctónica y nutrientes octubre 2016 (figura 67)

La biomasa fluctuó entre 0,4 y 22,9 con una media de $3,99 \pm 6 \text{ mg}/\text{m}^3$. Al igual que en agosto los mayores valores se localizaron en fiordo Quitralco $\approx 11 \text{ mg}/\text{m}^3$, seguidos de estero Elefante y golfo Elefante $\approx 3 \text{ mg}/\text{m}^3$ y fiordo Cupquellan $0,9 \text{ mg}/\text{m}^3$ (tabla V).

Los mínimos registraron en la concentración de nitrato fueron de $0,38 \mu\text{mol}/\text{L}$ mientras que los máximos llegaron $18,51 \mu\text{mol}/\text{L}$, con una media de $11,29 \pm 5,12 \mu\text{mol}/\text{L}$. La concentración mínima de fosfato fue 0,1 y la máxima de $1,9 \mu\text{mol}/\text{L}$, con una concentración media de $1,17 \pm 0,5 \mu\text{mol}/\text{L}$. los silicatos oscilaron entre un mínimo de 1,38 y $71,67 \mu\text{mol}/\text{L}$ con una concentración media de $12,53 \pm 10,06 \mu\text{mol}/\text{L}$. El nitrato y el fosfato, registraron una estructura vertical de 2 capas (exceptuando laguna San Rafael que registró una distribución uniforme). La primera capa corresponde a la superficial con registros mínimos (0-30m) y una segunda capa con valores más estables y elevados. Para el caso de las estaciones en paso 3 cruces y entrada de estero Elefante el nitrato estuvo en torno a $15 \mu\text{mol}/\text{L}$ y el fosfato $>1,5 \mu\text{mol}/\text{L}$ Fiordo Quitralco ≈ 18 nitrato y $\sim 1,5$ fosfato, fiordo Cupquellan con $20 \mu\text{mol}/\text{L}$ de nitrato y fosfato $<1,5 \mu\text{mol}/\text{L}$. En contraste el silicato entre estero Elefante y golfo Elefante fueron homogéneas $\sim 10-15 \mu\text{mol}/\text{L}$. en fiordo Quitralco el silicato desciende de manera constante hasta alcanzar su valor mínimo ($\sim 10-15 \mu\text{mol}/\text{L}$), en fiordo

Cupquelan se observa la máxima concentración en superficie $\approx 30 \mu\text{mol/L}$, debajo de la capa superficial la concentración se mantiene estable $\sim 15\text{-}20 \mu\text{mol/L}$.

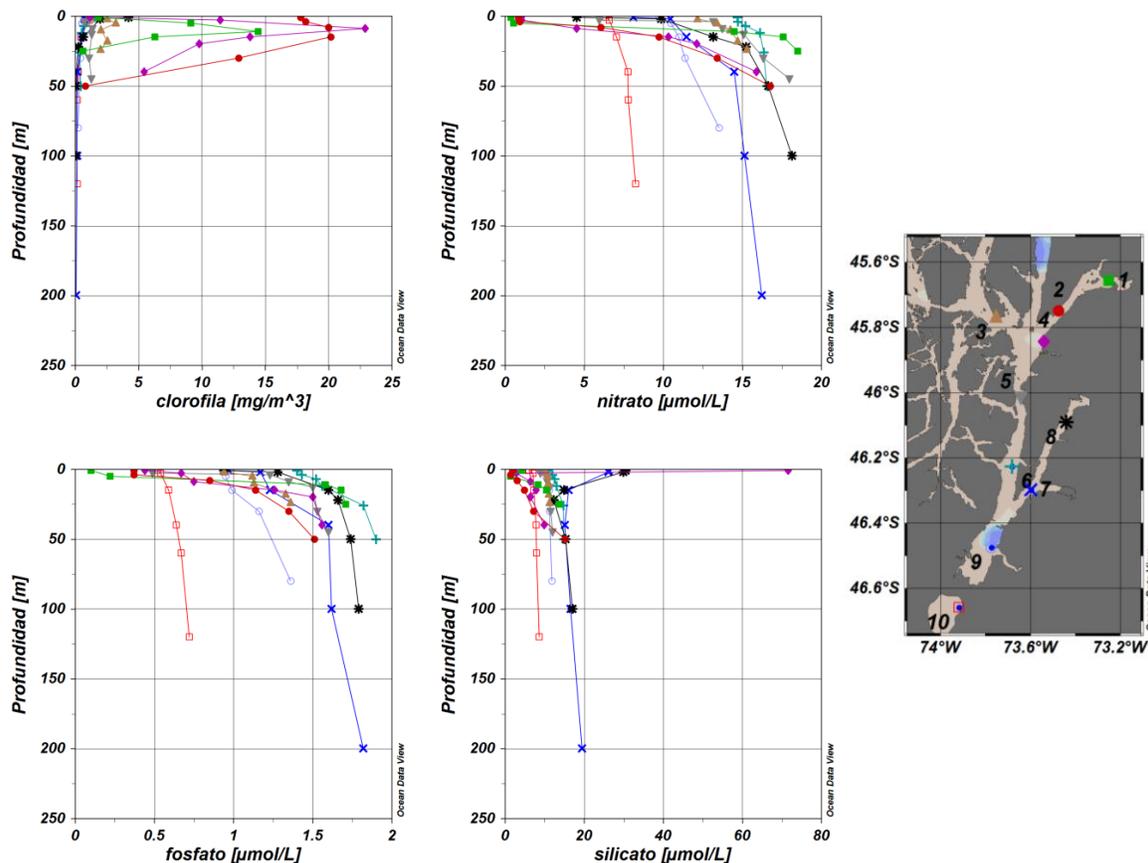


Figura 67: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol/L}$) registrados en octubre.

Biomasa fitoplanctónica y nutrientes noviembre 2016 (figura 68)

La variación de la biomasa fluctuó entre un mínimo de $0,29$ y un máximo de $17,43$ con una media de $5,13 \pm 4,6 \text{ mg/m}^3$. En término medio la concentración fue más elevada en fiordo Quitalco $11,6 \text{ mg/m}^3$ estero Elefante y golfo elefante con $3,28 \text{ mg/m}^3$ y Fiordo Cupquelan con $0,9 \text{ mg/m}^3$.

La concentración de nitrato registró un mínimo de $0,12$ y un máximo de $18,66 \mu\text{mol/L}$, con una concentración media de $9,35 \pm 5,7 \mu\text{mol/L}$. El fosfato osciló entre un mínimo de $0,08$ y un máximo de $1,89 \mu\text{mol/L}$ con una concentración media de $1,1 \pm 0,5$. La concentración de silicato tuvo rangos entre $0,5$ y $25,06 \mu\text{mol/L}$ con una concentración media de $10,9 \pm 5,03 \mu\text{mol/L}$.

Las concentraciones mínimas de nitrato y fosfato fueron registradas en estero Elefante, ambos nutrientes presentan una estructura vertical similar, estaciones de más al norte en Estero Elefante, registraron menores concentraciones en superficie, aumentando sostenido con la profundidad, estaciones de más sur en golfo Elefante y laguna San Rafael, perfiles más homogéneos. Bajo los 20 metros, desde el estero Elefante (norte) hacia laguna San Rafael (sur), las concentraciones disminuyen de manera sistemática. La distribución vertical de nitrato y fosfato en fiordo Cupquelan y Quitalco, se comportan verticalmente de manera similar: mínimos registros en superficie ($\approx 0,5$

$\mu\text{mol/L}$ de nitrato y $\approx 0,3 \mu\text{mol/L}$ fosfato), aumentando constantemente hasta alcanzar sus máximos registros 15-20 $\mu\text{mol/L}$ nitrato y 1,5 $\mu\text{mol/L}$, respectivamente. Los silicatos en estero Elefante y golfo Elefante, exhibieron perfiles homogéneos $\sim 10\text{-}17 \mu\text{mol/L}$, correspondiendo los mayores registros hacia entrada de estero Elefante mientras que los menores se observaron hacia Laguna San Rafael (sur). En fiordo Cupquelan y Quitralco, la concentración fue mínima en superficie, señalando que las mínimas de Quitralco fueron más marcadas (2 $\mu\text{mol/L}$) que las de f. Cupquelan (12 $\mu\text{mol/L}$). a partir de estos valores mínimos, la concentración aumenta con la profundidad hasta alcanzar los valores máximos: 40 $\mu\text{mol/L}$ para el f. Cupquelan y 20 $\mu\text{mol/L}$, en f Quitralco.

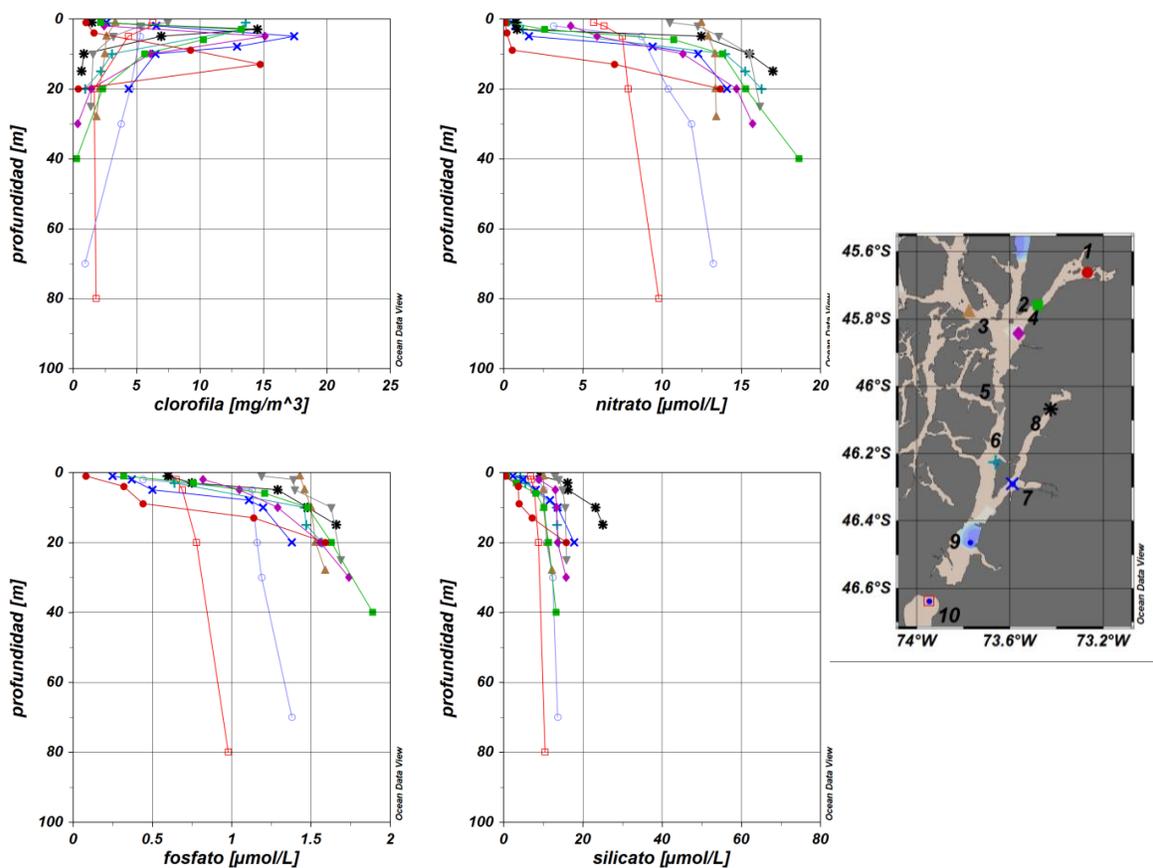


Figura 68: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol/L}$) registrados en noviembre.

Biomasa fitoplanctónica y nutrientes marzo 2017 (figura 69)

La clorofila fluctuó entre 0,28 y 22,26 mg/m^3 con una media de $3,68 \pm 4,4 \text{ mg/m}^3$. Los mayores valores promedios de clorofila fueron detectados en fiordo Quitralco, mientras que los menores en fiordo Cupquelan.

El nitrato registró un mínimo de 0,44 y máximo de 15,01 $\mu\text{mol/L}$, con una media de $8,89 \pm 3,8 \mu\text{mol/L}$. El fosfato tuvo una concentración mínima de 0,08 y una máxima de 1,81 $\mu\text{mol/L}$, con una concentración media de $1,1 \pm 0,4 \mu\text{mol/L}$. La concentración de silicatos, tuvo rangos entre 2,67 y 41,11 $\mu\text{mol/L}$ con una concentración media de $13,25 \pm 6,7 \mu\text{mol/L}$.

Entre el estero Elefante y golfo Elefante, el nitrato, fosfato y silicato tuvieron una distribución vertical uniforme, además la concentración de cada uno disminuyó hacia el interior del estero Elefante (norte), detectando los menores valores en Laguna San Rafael (sur).

En fiordo Quitralco se observó una distribución vertical estratificada de nitrato y fosfato, con los menores registros en superficie, aumentando hasta alcanzar debajo de los 20 metros valores de 13 $\mu\text{mol/L}$ nitrato y 1,5 de fosfato, en cambio en el fiordo Cupquelan la concentración de nitrato y fosfato disminuyó paulatinamente entre 5 $\mu\text{mol/L}$ superficie y 15 $\mu\text{mol/L}$ hacia los 20m.

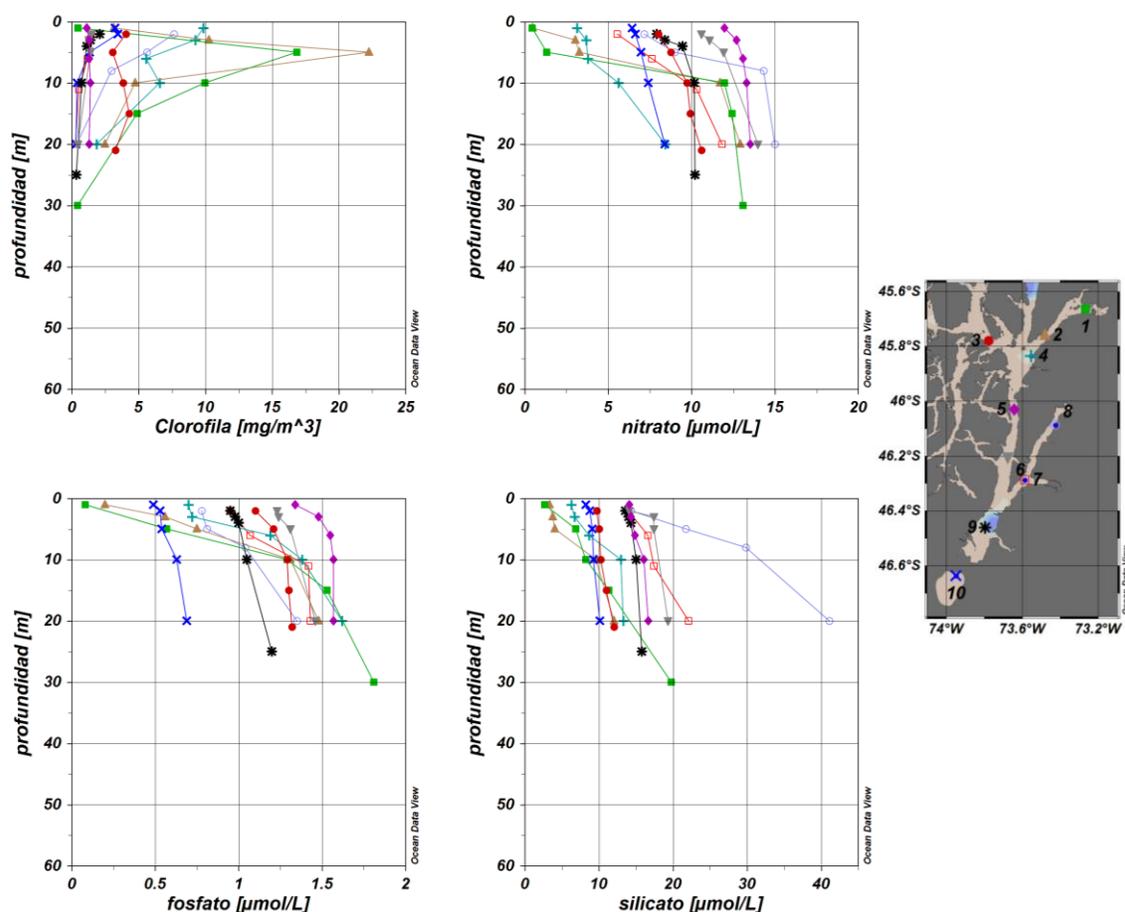


Figura 69: Distribución vertical de clorofila total (mg/m^3) y nutrientes nitrato, fosfato y silicato ($\mu\text{mol/L}$) registrados en marzo.

Los valores más elevados de clorofila se registraron entre 5-20m para los periodos de octubre y noviembre, destacando los registros del fiordo Quitralco, en contraste las menores concentraciones de clorofila se registraron en fiordo Cupquelan.

La distribución espacial y temporal en los nutrientes revelaron algunos patrones particulares, Nitratos, fosfatos y silicatos en el eje norte sur, exteriorizaron una columna de agua con tendencia a la uniformidad en las estaciones dentro del estero Elefante, Golfo Elefante y laguna San Rafael, siendo las concentraciones de las estaciones de más al sur menores en comparación a las estaciones de estero Elefante (norte). Solo en octubre y noviembre las estaciones próximas a paso 3

Cruces mostraron valores de nitratos y fosfatos mínimos en superficie y aumento constante con la profundidad. En contraste las estaciones de fiordo Cupquelan y Quitralco, exhibieron una columna de agua con registros mínimos en superficie, aumentando la concentración con la profundidad, exceptuando el silicato, nutriente que en agosto y octubre, registró elevada la concentración en superficie. En fiordo Cupquelan, se registraron los menores valores en superficie aumentando de manera abrupta y constantes con la profundidad. En cambio, los silicatos tendieron a mostrar cierta homogeneidad en la columna de agua. Con algunas máximas registradas en fiordo Quitralco. Es importante mencionar que las estaciones de más al sur dentro del golfo Elefante y Lagunas San Rafael, registraron una distribución uniforme de todos los nutrientes medidos en la columna de agua, con valores menores en comparación a las demás estaciones.

Tabla V. Concentración de clorofila (mg/m^3) promedio, para los distintos periodos analizados.

	Agosto	Octubre	noviembre	marzo
Estero Elefante, Golfo Elefante, laguna San Rafael	1,6	1,4	4,4	2,7
Fiordo Cupquelan	0,56	0,8	6,8	2,6
Fiordo Quitralco	4,12	11,11	5,6	7,6

Tabla VI. Medición de nutrientes ríos que desembocan en Bahía Exploradores.

diciembre	longitud	latitud	Fecha	nitrateo ($\mu\text{mol/L}$)	Fosfato ($\mu\text{mol/L}$)	Silicato ($\mu\text{mol/L}$)
Embarcadero (Explo)	- 73,414981	- 46,323026	12-12- 2016	0,87	0,65	21,96
Expora II	- 73,418271	- 46,327929	12-12- 2016	0,92	1,17	23,42
Sur	- 73,421049	- 46,328206	12-12- 2016	0,56	2,22	4,39
Expora I	- 73,321486	- 46,352132	12-12- 2016	1,22	2,04	23,85
Oscuro	- 73,319579	-46,35188	12-12- 2016	0,31	0,21	10,59
Teresa	- 73,321269	- 46,350454	12-12- 2016	0,80	0,40	26,95

promedio

0,78	1,26	16,84
-------------	-------------	--------------

abril	longitud	latitud	Fecha	nitrateo ($\mu\text{mol/L}$)	Fosfato ($\mu\text{mol/L}$)	Silicato ($\mu\text{mol/L}$)
Embarcadero	- 73,414981	- 46,323026	04-04- 2017	0,30	0,85	3,10
Explora II	- 73,418271	- 46,327929	04-04- 2017	0,47	0,71	6,02
Sur	- 73,421049	- 46,328206	04-04- 2017	0,21	0,11	0,86
Explora I	- 73,321486	- 46,352132	04-04- 2017	0,89	0,83	7,14
Oscuro	- 73,319579	-46,35188	04-04- 2017	0,21	0,17	2,67
Teresa	- 73,321269	- 46,350454	04-04- 2017	0,23	0,34	4,47

promedio

0,39	0,50	4,04
-------------	-------------	-------------

5.4 Objetivo 2.2.4. *Desarrollar modelos hidrodinámicos de alta resolución con el fin de generar una herramienta que permita estimar la capacidad del transporte del sistema.*

Evaluación modelo atmosférico:

Los resultados logrados tras la modelación con WRF fueron evaluados con información obtenida de dos estaciones meteorológicas generadas en este proyecto y detallados en el **Objetivo 2**. La **Figura 70**. muestra un mapa esquemático con la ubicación de las estaciones instaladas.

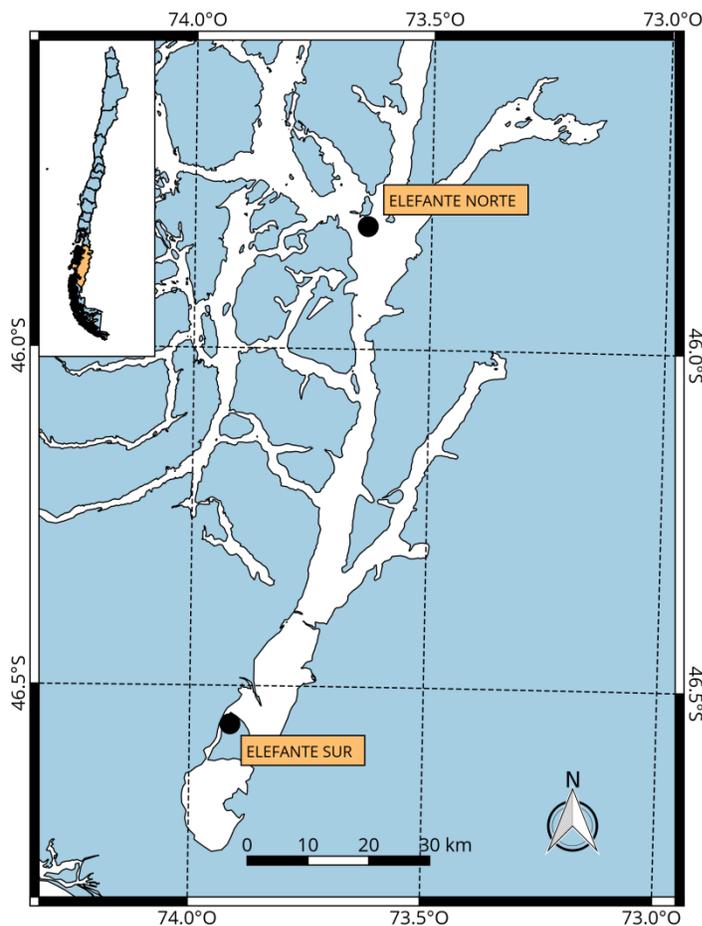


Figura 70: Mapa esquemático con la ubicación de las estaciones meteorológicas instaladas.

A continuación se presentan las series de tiempo con los datos observados y simulados para ambas estaciones, junto a los valores estadísticos utilizados para la evaluación. Para este caso se consideraron las variables **Presión atmosférica en superficie (Fig. 71)**, **Componente U del viento (Fig.72)**, **Componente V del viento (Fig. 73)** e **Intensidad del viento (Fig. 74)**.

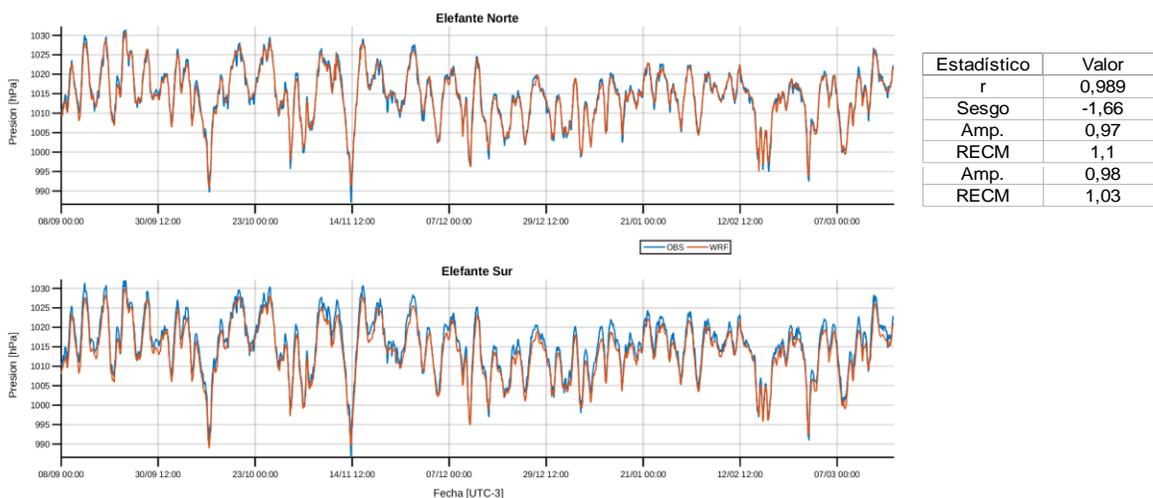


Figura 71: Serie de tiempo con valores modelados (rojo) y datos observados (azul) para la presión atmosférica en superficie entre el periodo 08/09/16 – 20/03/17. El panel superior corresponde a la estación Elefante Norte y el panel inferior a Elefante Sur. En la columna derecha se presentan los valores correspondientes a la evaluación estadística.

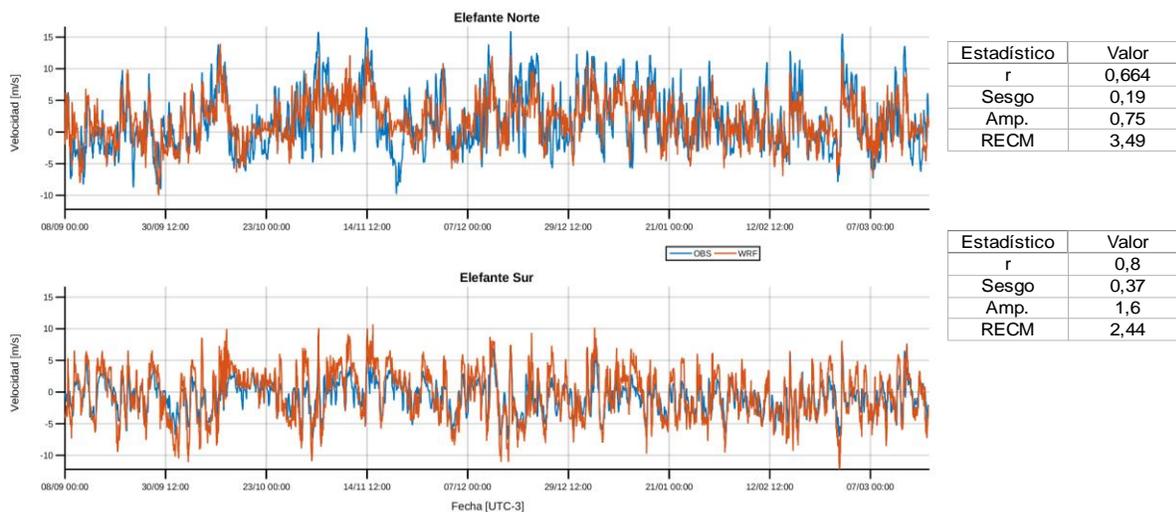


Figura 72: Serie de tiempo con valores modelados (rojo) y datos observados (azul) para la **componente U del viento** entre el periodo 08/09/16 – 20/03/17. El panel superior corresponde a la estación Elefante Norte y el panel inferior a Elefante Sur. En la columna derecha se presentan los valores correspondientes a la evaluación estadística.

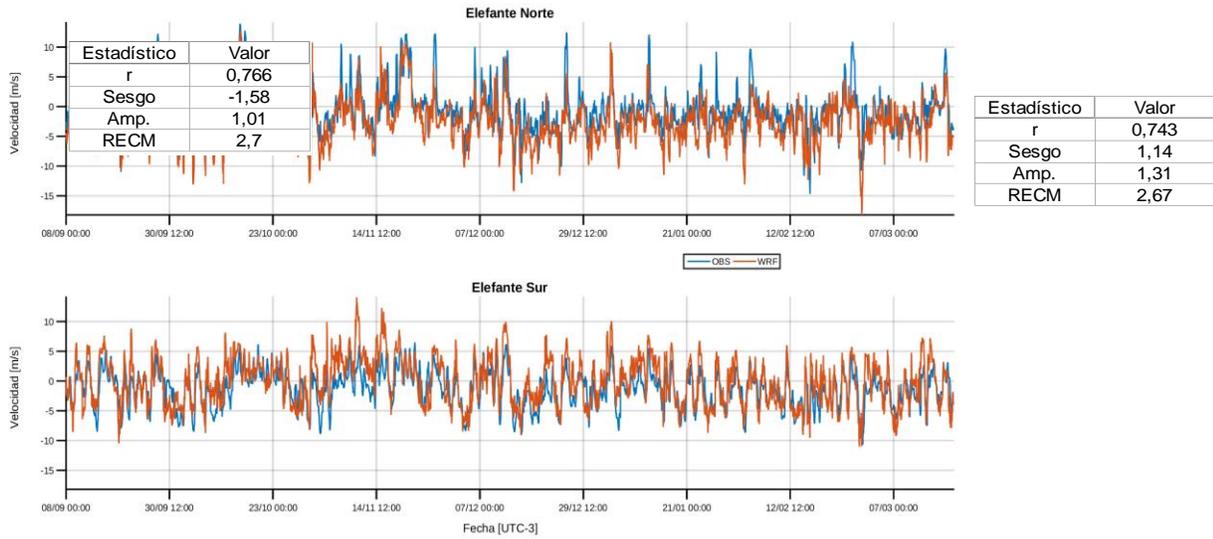


Figura 73: Serie de tiempo con valores modelados (rojo) y datos observados (azul) para la **componente V del viento** entre el periodo **08/09/16 – 20/03/17**. El panel superior corresponde a la estación Elefante Norte y el panel inferior a Elefante Sur. En la columna derecha se presentan los valores correspondientes a la evaluación estadística.

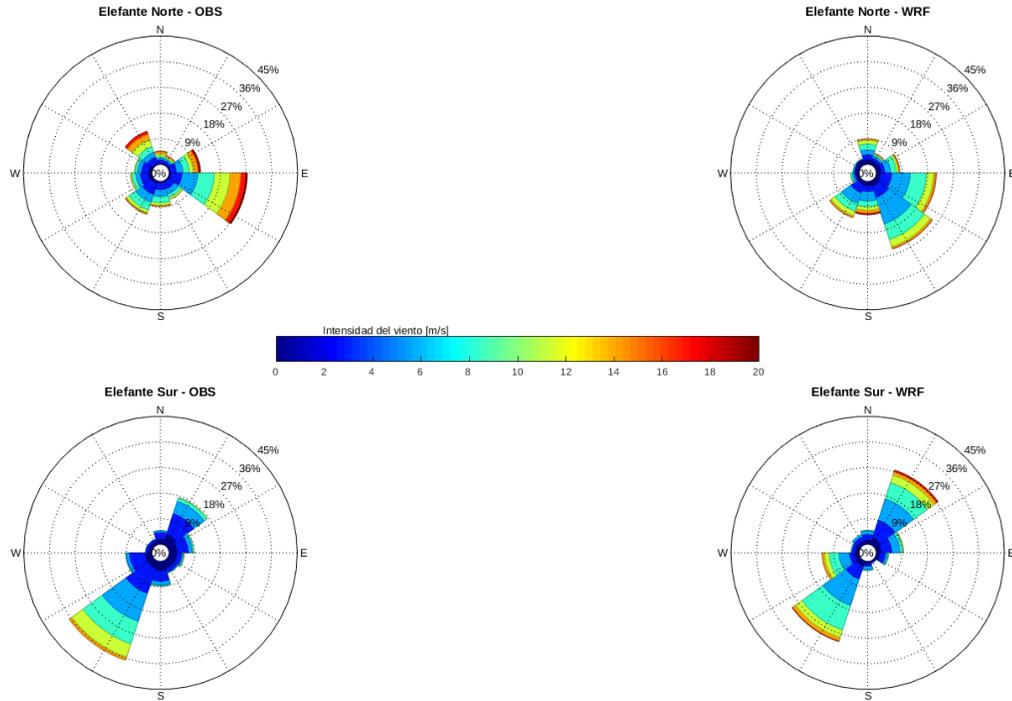


Figura 74: Rosas de viento para el periodo estudiado. Las observaciones se presentan en la columna izquierda y en la derecha lo simulado. Por otro lado la fila superior muestra el sector norte del Estero Elefante y la inferior el sector sur.

Evaluación modelo hidrodinámico

Nivel del mar

La evaluación se realizó en dos puntos, en los fiordos Quitraco y Cupquelán. Los resultados muestran una alta relación entre los valores simulados y los observados con valores de r sobre 0,97 para ambos sectores (**figura 75**).

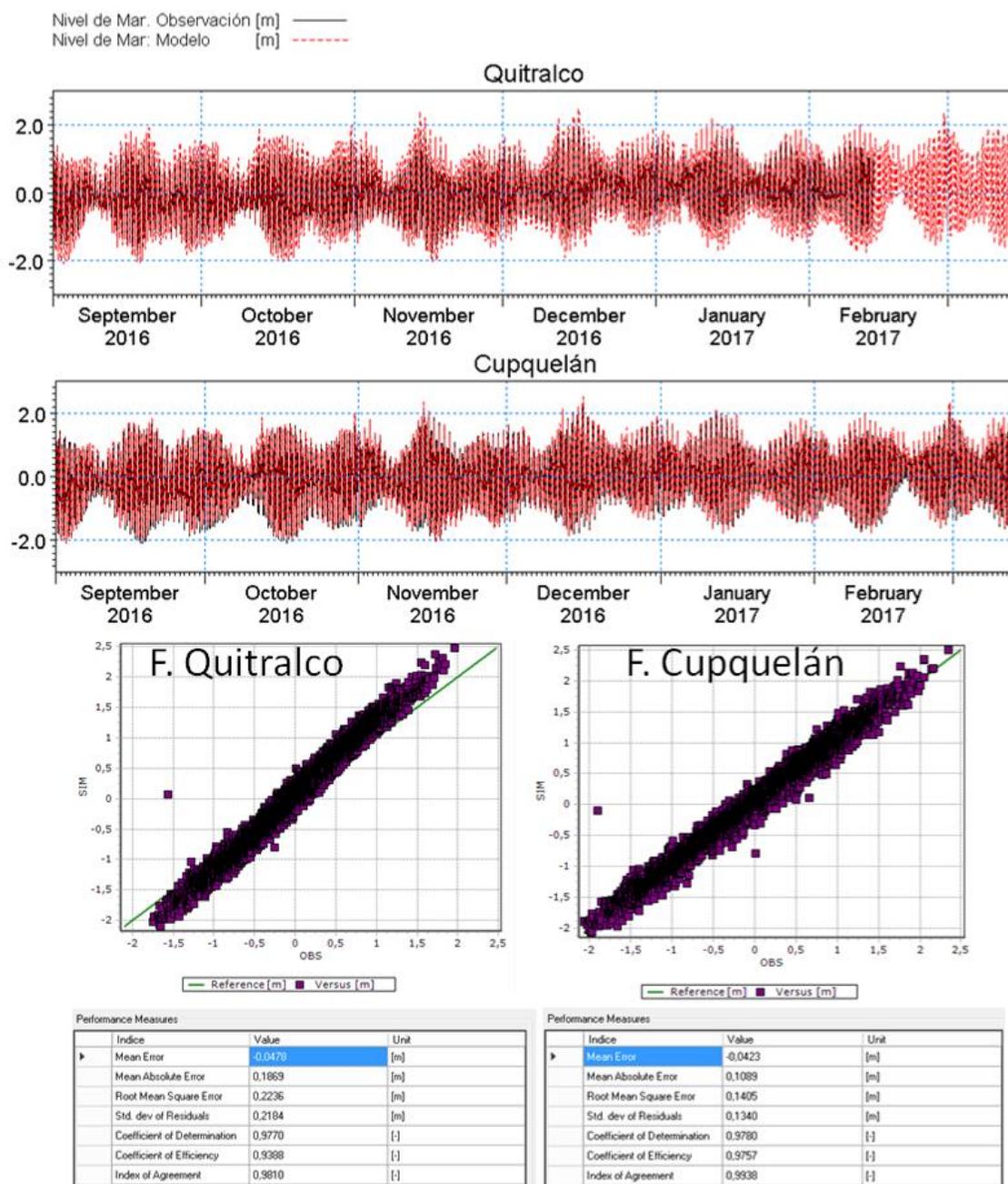


Figura 75: Comparación de las series de nivel del mar observadas y simuladas para el fiordo Quitralco y Cupquelán (arriba) y diagrama de dispersión con tabla de estadísticos (abajo).

Salinidad

Se tomaron perfiles de salinidad realizados en las principales cuencas del sistema a través de lances de CTD y se compararon con perfiles entregados por el modelo, con el fin de evaluar el patrón

espacial del comportamiento de la salinidad, variable asociada a la estructura del campo de masa. Basado en lo detallado en el objetivo 3, sobre características hidrográficas espaciales y la importancia de las constricciones, se definieron puntos de evaluación al norte de la constricción de canal Elefantes y al sur de esta (**Figura 76**).

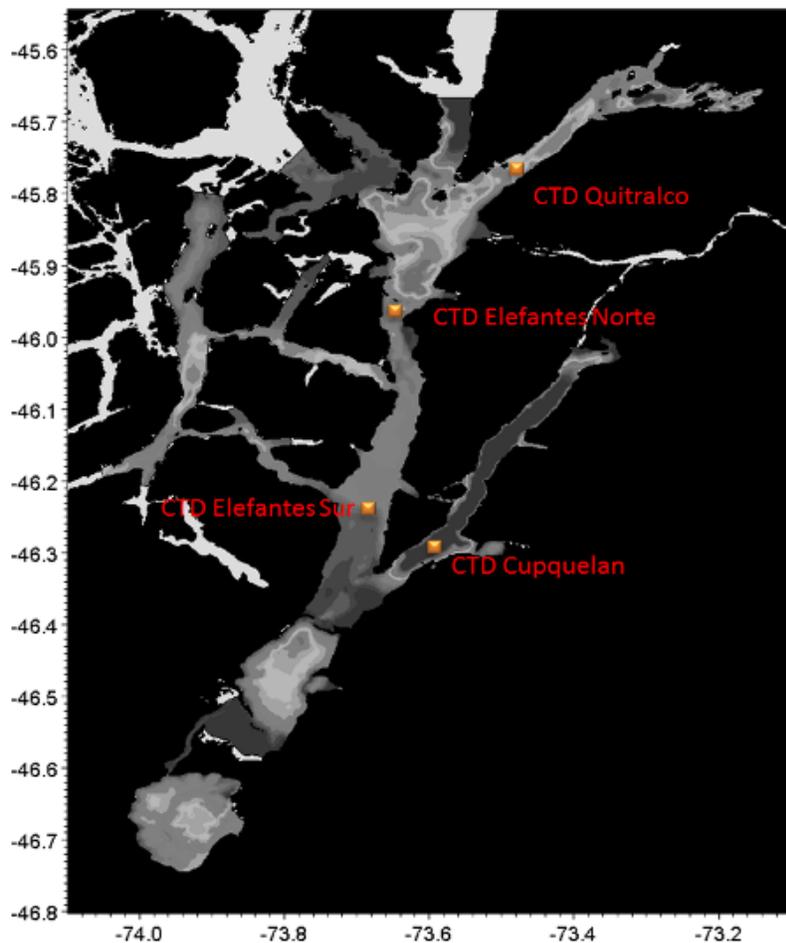


Figura 76: Posición de los perfiles de salinidad para evaluación del modelo.

Los resultados muestran que el modelo reproduce de manera correcta los patrones espaciales de salinidad, tanto en la cuenca norte de Elefantes como en la cuenca sur, además de obtener un apropiado perfil en el fiordo Cupquelan y Quitrалco (**Figura 77**).

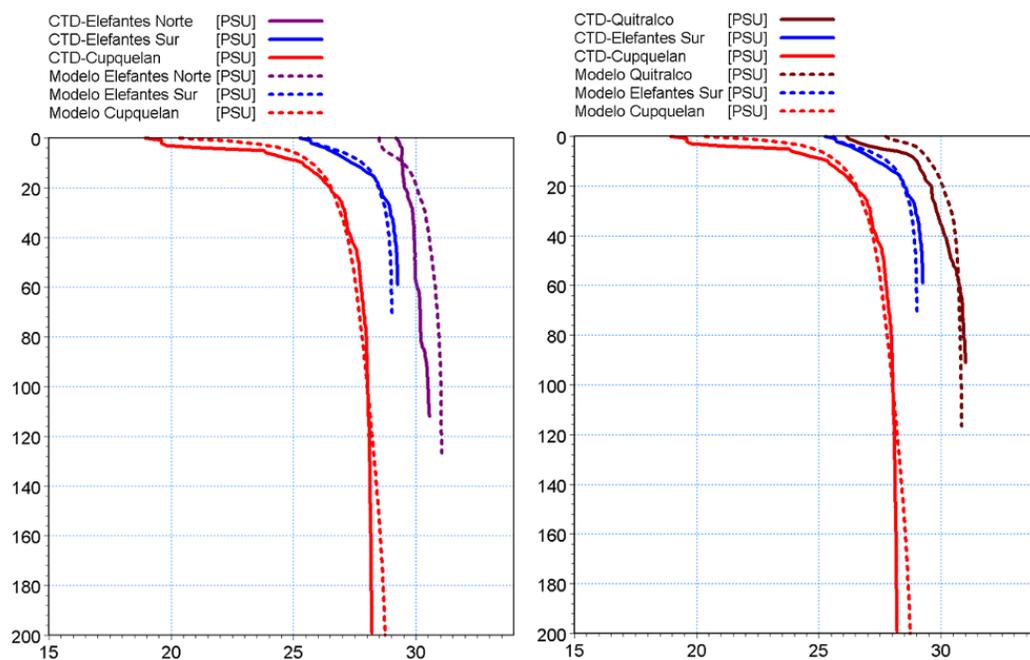


Figura 77: Perfiles de salinidad observados y modelados en las principales cuencas del sistema Elefantes.

Corrientes

El modelo ha sido evaluado contra observaciones realizadas en la campaña oceanográfica detallada en el Objetivo 2, para el periodo de septiembre a noviembre de 2016, tomando en cuenta distintas frecuencias en el transporte, por esta razón, se realizaron comparaciones en la escala mareal y submareal, con el fin de evaluar la capacidad del modelo de reproducir los patrones en distintas frecuencias. Las evaluaciones fueron realizadas con un carácter tanto, cualitativo como cuantitativo, este último resumido en índices estadísticos detallados en la metodología y que son presentados, por su extensión, en el Anexo IV.

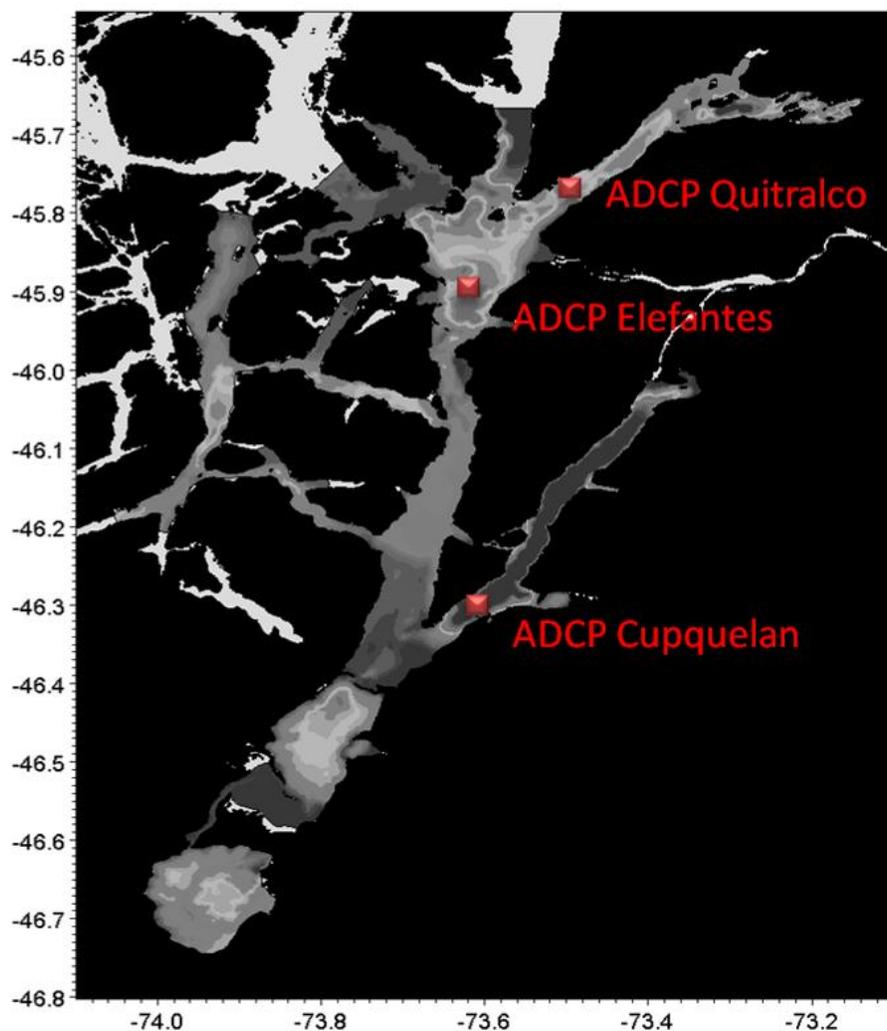


Figura 78: Posición de ADCP para evaluación del modelo.

Desde el punto de vista cualitativo la evaluación del modelo respecto de las observaciones, busca analizar las estructuras temporales a distintas profundidades y verificar si el modelo es capaz de reproducirlas. La **Figura 79**, muestra la componente principal de la corriente residual en el **canal Elefantes**, en esta es posible apreciar que le patrón obedece a una estructura de dos capas que varían en el tiempo, asociado principalmente a la señal quincenal de la marea, específicamente, en periodo de sicigias el flujo de salida hacia el norte, tiende a ocupar buena parte de la columna de agua medida, mientras que durante las cuadraturas se reestablece la circulación gravitacional típica con una capa superior de menor espesor que la de entrada, este rasgo principal es correctamente replicado por el modelo tanto en periodo de sicigias como en cuadratura. El efecto del viento soplando desde el norte (V-Norte del viento negativo), puede generar una pequeña capa superficial contraria al flujo de salida, mientras que un viento soplando desde el sur refuerza la salida superficial del flujo. Este efecto es posible notarlo tanto en la observación como en el modelo.

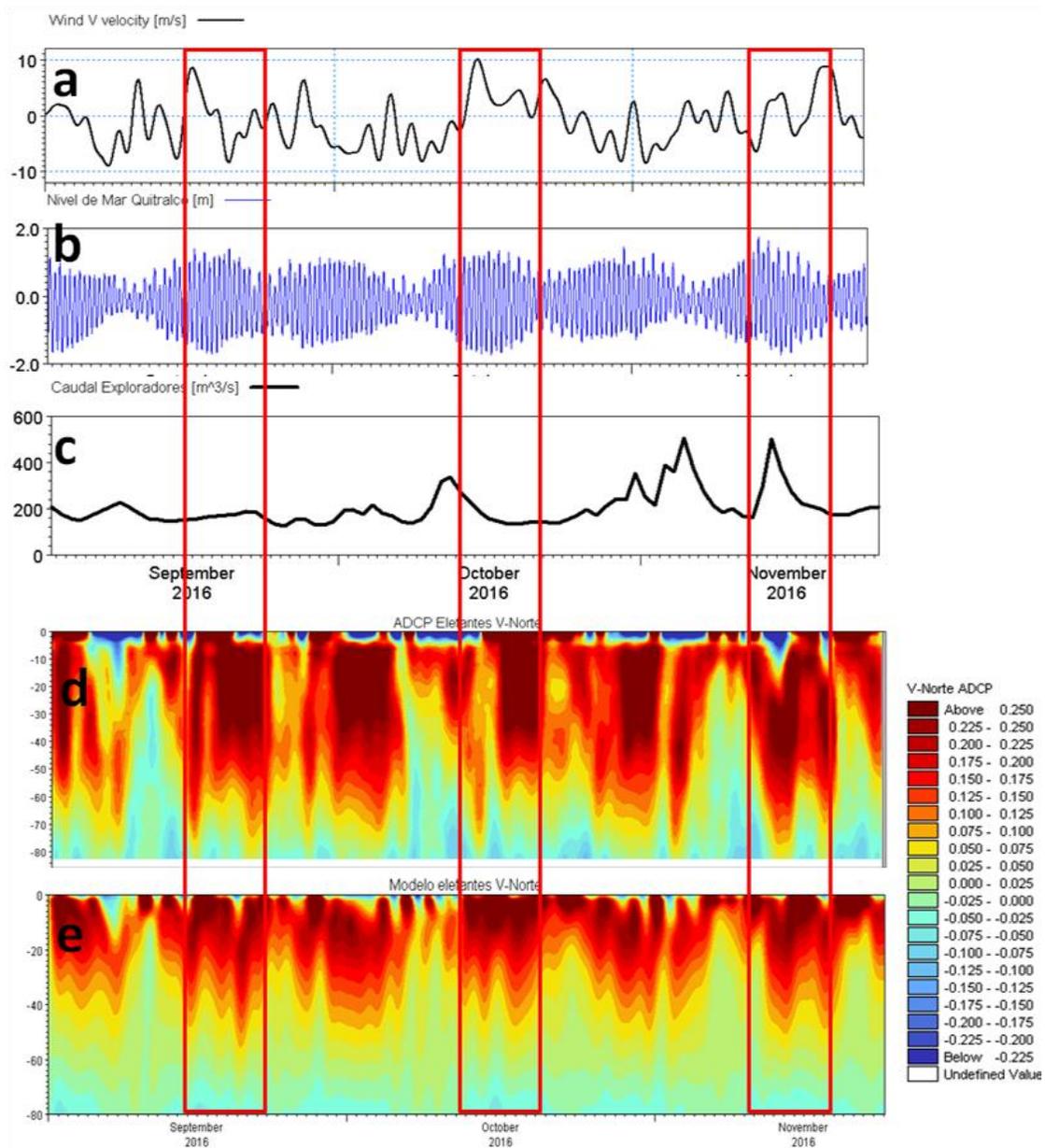


Figura 79: Componente V-Norte del viento (a), nivel del mar (b), caudal río Exploradores (c), componente V-Norte de la corriente del ADCP (d) y componente V-Norte de la corriente del modelo (e) en canal Elefantes.

Para el caso del **fiordo Quitralco (Figura 80)**, la estructura residual presenta intensificaciones, al igual que en elefantes, asociado a sicigias, sin embargo es mucho menos evidente, estos pulsos en sicigias están asociados a flujos hacia la cabeza del fiordo. El modelo logra reproducir esta intensificación durante estos periodos. Por otra parte, en la capa superficial se logra distinguir el

efecto del efecto del viento, cuando este sopla hacia la cabeza del fiordo, la capa superficial se mueve en ese mismo sentido y viceversa, este patrón es apropiadamente resuelto en el modelo.

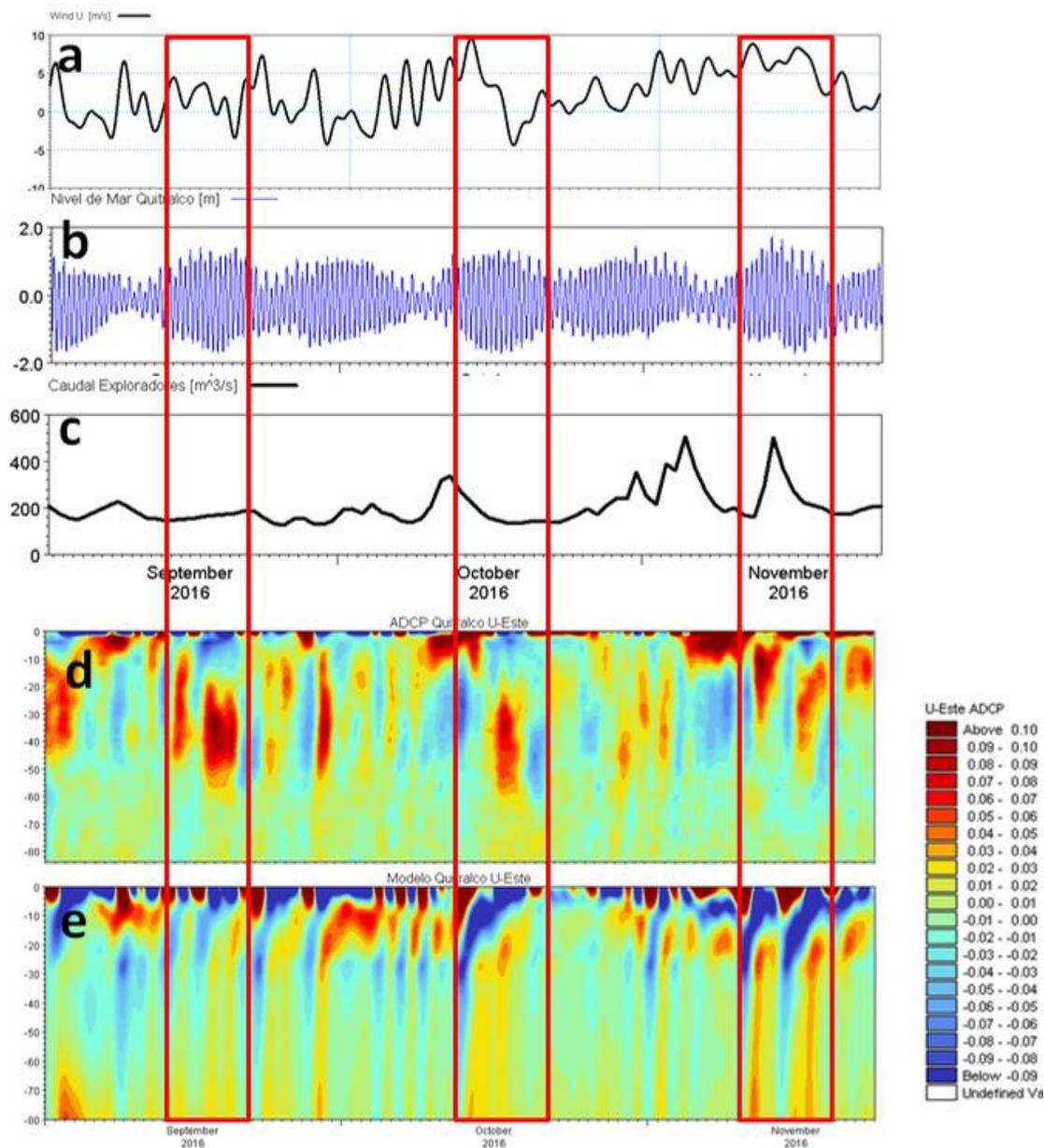


Figura 80: Componente U-Este del viento (a), nivel del mar (b), caudal río Exploradores (c), componente U-Este de la corriente del ADCP (d) y componente U-Este de la corriente del modelo (e) en fiordo Quitralko.

El fiordo Cupquelan (**Figura 81**) presenta similar condición, asociadas a las mareas quincenales de sicigias, generando flujos hacia la cabeza del fiordo, por el contrario, durante cuadraturas parece

haber movimiento hacia la boca del fiordo, esto es relativamente replicado por el modelo, sin embargo, en la parte más profunda, el modelo presenta un flujo hacia la cabeza más permanente.

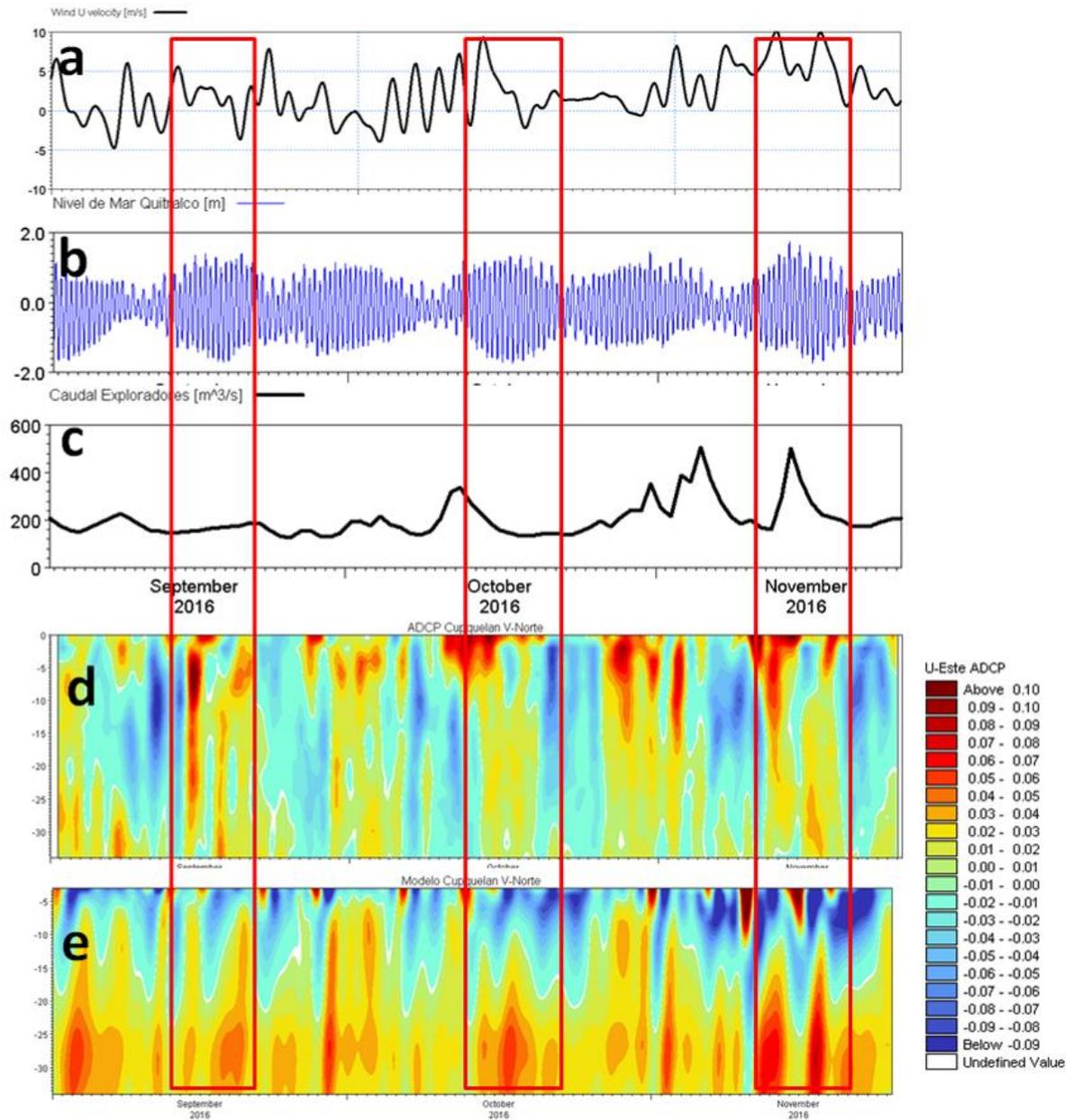


Figura 81: Componente V-Norte del viento (a), nivel del mar (b), caudal río Exploradores (c), componente V-Norte de la corriente del ADCP (d) y componente V-Norte de la corriente del modelo (e) en fiordo Cupuelán.

Patrones de circulaci3n:

Se estim3 la circulaci3n promedio durante todo el periodo de simulaci3n (**figura 82**), es decir, desde septiembre de 2016 a marzo de 2017. La circulaci3n promedio superficial se encuentra determinada en buena medida por la gran cantidad de agua dulce proveniente principalmente desde Campo de Hielo Norte. Esto genera una capa superficial de salida desde los fiordos y canales interiores hacia el norte, este flujo es acelerado en constricciones batim3tricas, pudiendo alcanzar velocidades promedio sobre 1 ms^{-1} como el caso del canal Elefantes, en los fiordos Cupquel3n y Quitraco las velocidades superficiales m3ximas est3n en el orden de 0.2 ms^{-1} .

La gran cantidad de agua dulce proveniente de los glaciares de campo Hielo Norte genera un intenso gradiente horizontal de salinidad, y por tanto de densidad, siendo la cuenca del r3o Exploradores y la laguna de San Rafael, las m3s importantes fuentes que aportan a este gradiente (**Figura 83**). Verticalmente la estructura de salinidad, se encuentra determinado por los distintos l3mites batim3tricos que limitan el libre transporte de aguas m3s saladas hacia el interior, esto provoca que el fiordo Cupquelan tenga, relativo a otros fiordos de la Patagonia Norte, un contenido de sal relativamente m3s bajo que otros fiordos (**Figura 84**).

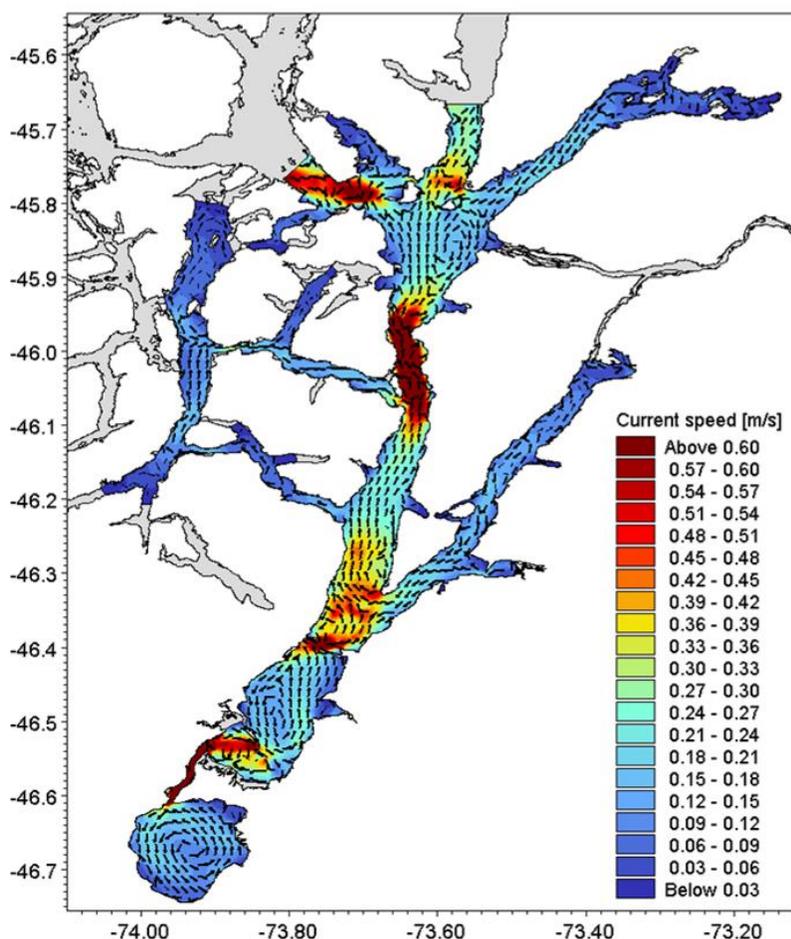


Figura 82: Campo de corrientes superficial promedio obtenido del modelo hidrodinámico

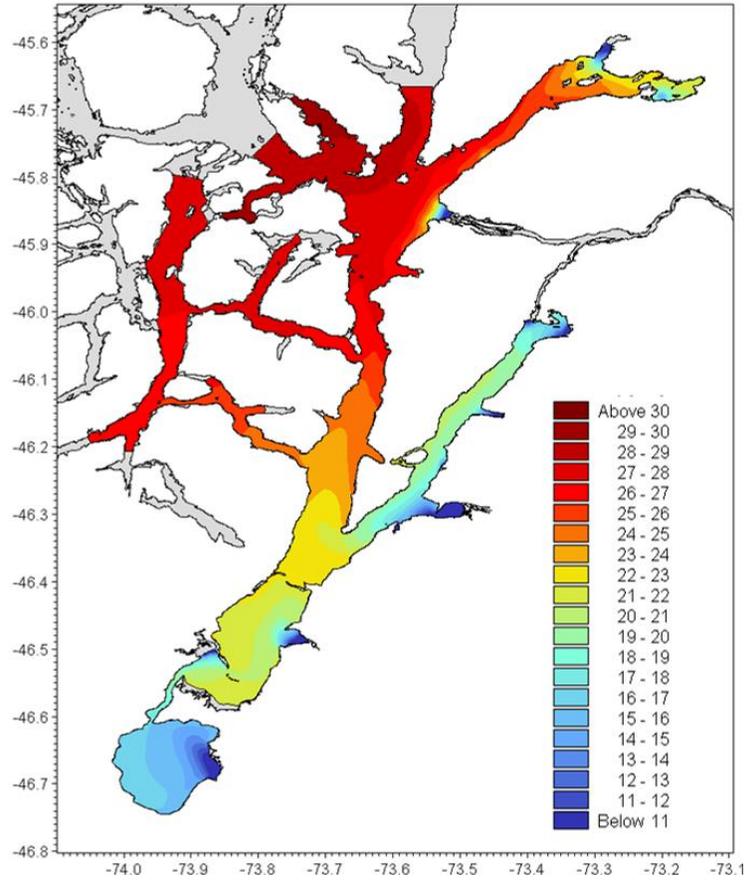


Figura 83: Campo de salinidad superficial promedio obtenido del modelo hidrodinámico

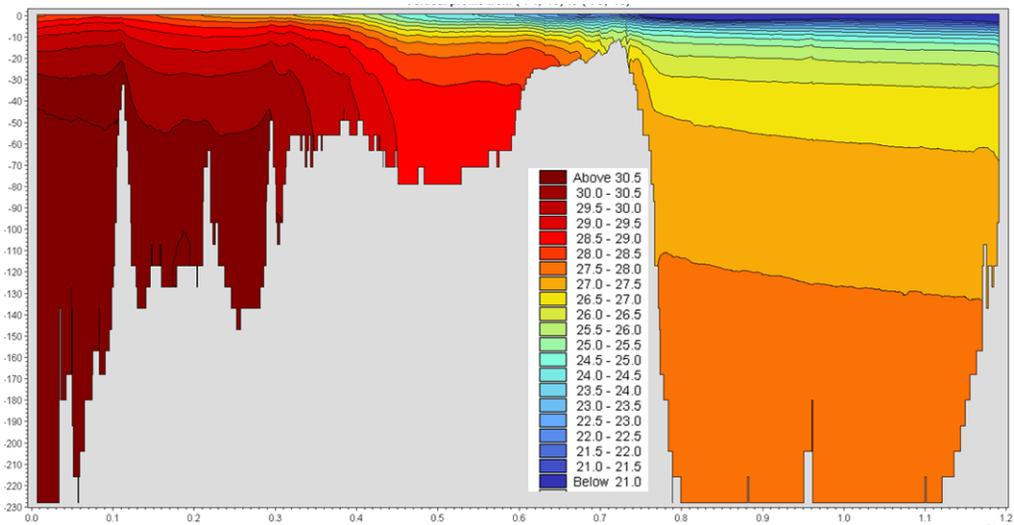


Figura 84: Sección vertical de salinidad promedio desde el canal Costa hasta el fiordo Cupquelán obtenido del modelo hidrodinámico

La estructura vertical promedio de las corrientes en las secciones de canal Elefantes, fiordos Cupquelán y Quitalco (**Figura 85**) muestran que, para la primera de estas, existe una estructura de dos capas con una capa superficial de salida con un grosor variable, dependiendo de la batimetría, que va desde los 10 a 50 m y otra capa de entrada de mayor espesor. La velocidad aumenta en aquellos lugares en donde el flujo se ve estrechado por constricciones batimétricas (**Figura 86**).

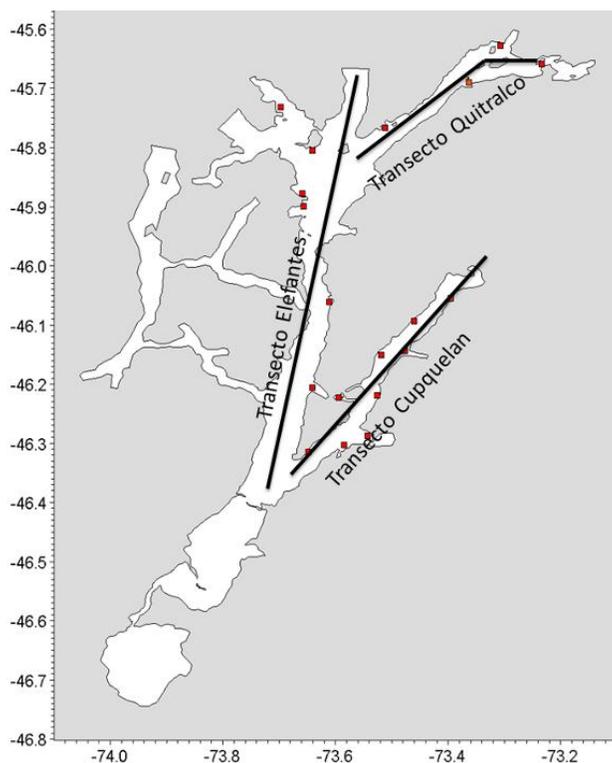


Figura 85: Transectos utilizados en análisis de secciones verticales

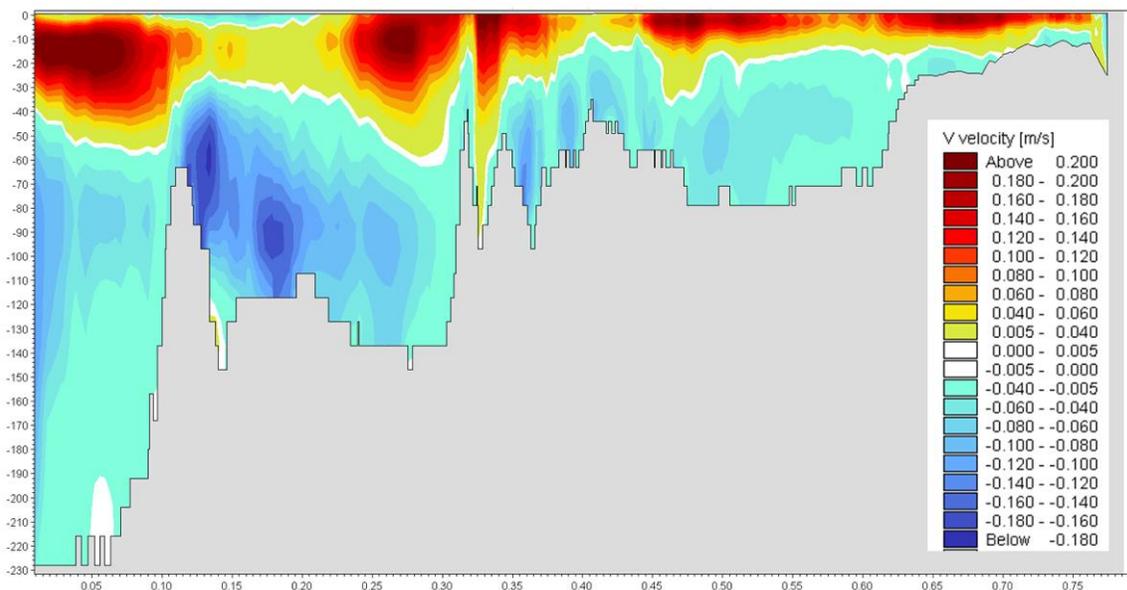


Figura 86: Sección vertical de la componente V-Norte de la corriente a lo largo del canal Elefantes.

Para el caso del fiordo Quitralco, se genera una estructura de dos capas claramente definida hasta el segundo sill, con una capa superficial de salida en promedio hasta los 40 m. y otra profunda de entrada. Hacia la cabeza del segundo sill, la estructura es menos regular, generando una composición más compleja de las corrientes promedio.

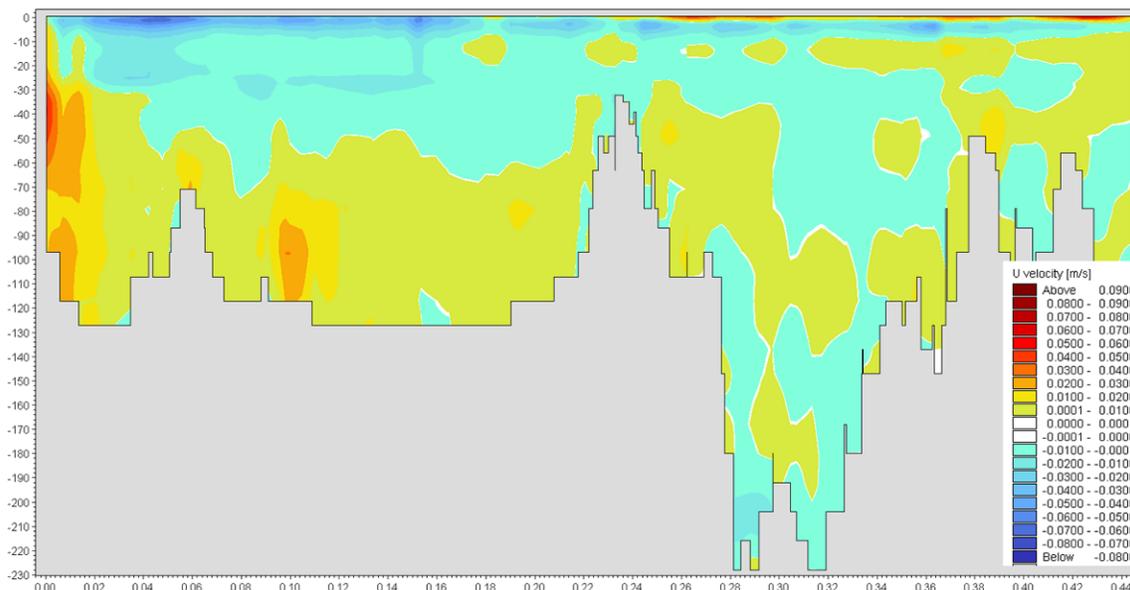


Figura 87: Sección vertical de la componente U-Este de la corriente a lo largo del fiordo Quitralco.

El fiordo Cupquelán, en cambio, presenta una formación de 3 capas, una superficial de salida hasta aproximadamente 20m. Otra con un flujo hacia la cabeza de fiordo hasta aproximadamente los 150 m. y otra hacia la boca que ocupa desde los 150 m. hasta el fondo. Hacia la boca del fiordo es notorio un aumento de las velocidades, probablemente provocada por el abrupto cambio en la batimetría (**Figura 88**).

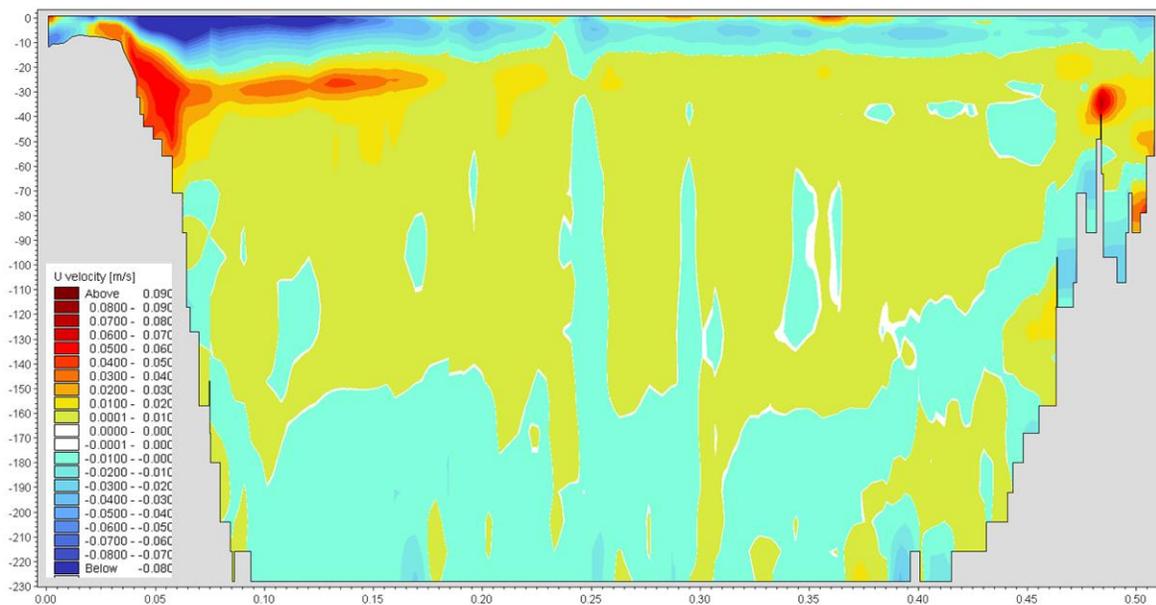


Figura 88: Sección vertical de la componente V-Norte de la corriente a lo largo del canal Cupquelán.

Simulación de transporte de partículas

Se simularon dos periodos, uno de invierno y otro de verano, asociado cada cual a condiciones distinta descarga de agua dulce y variación en los patrones de viento. El periodo de modelación de cada escenario fue de 15 días, con el fin de representar tanto un periodo de sicigias como uno de cuadratura. Para el periodo de invierno se registra un menor caudal de los ríos y vientos distribuidos en los ejes de cada canal en ambas direcciones (**Figura 89a**). Para el escenario de verano, se registra un aumento significativo en la descarga de agua dulce, asociada a deshielo de glaciares de campo de Hielo Norte y viento soplando hacia el interior de los fiordos (**Figura 89b**).

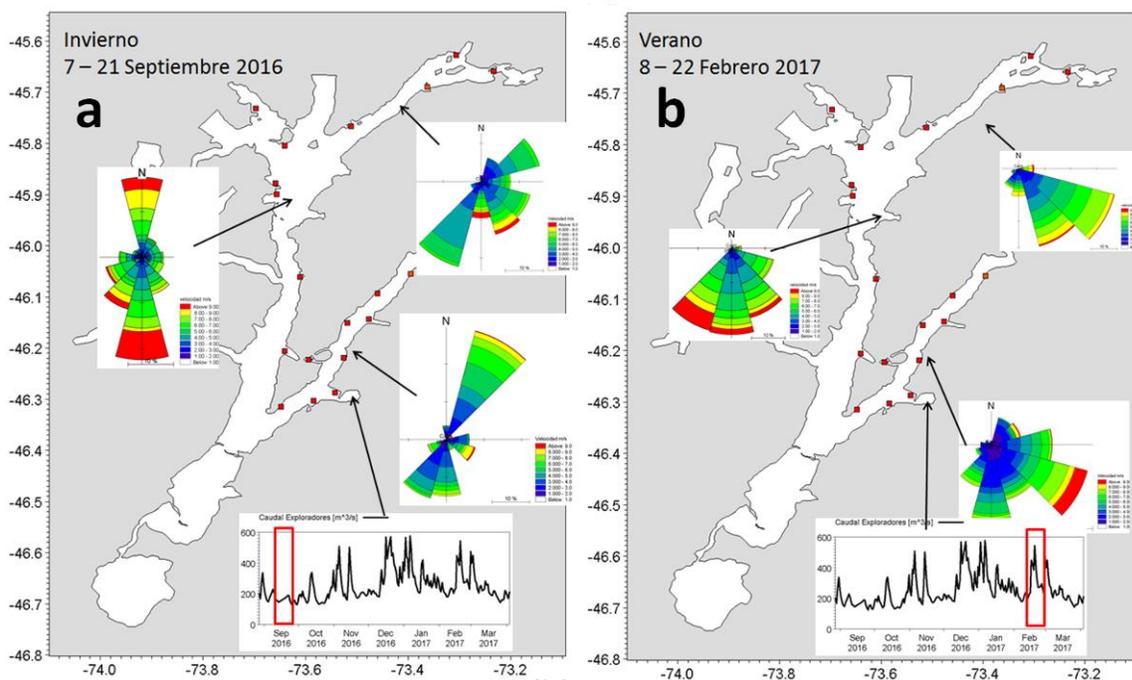


Figura 89: Condiciones de viento (WRF) y caudal de río para escenario de invierno (a) y verano (b) para dispersión de partículas.

Fueron seleccionados 19 fuentes de dispersión asociadas a concesiones de acuicultura, en base a información publicada por Subpesca en <http://mapas.subpesca.cl/visualizador/>. En cada una de estas se liberaron 100 partículas, en periodo de sicigias y 100 en periodo de cuadraturas a 5m de profundidad. Las partículas permanecen activas por un periodo de 3 días, asociado a un horizonte de sobrevivencia de un patógeno como el virus ISA. Para una mejor visualización de los resultados, fueron generadas 5 áreas que son asumidas como conectadas por su cercanía. (Figura 90).

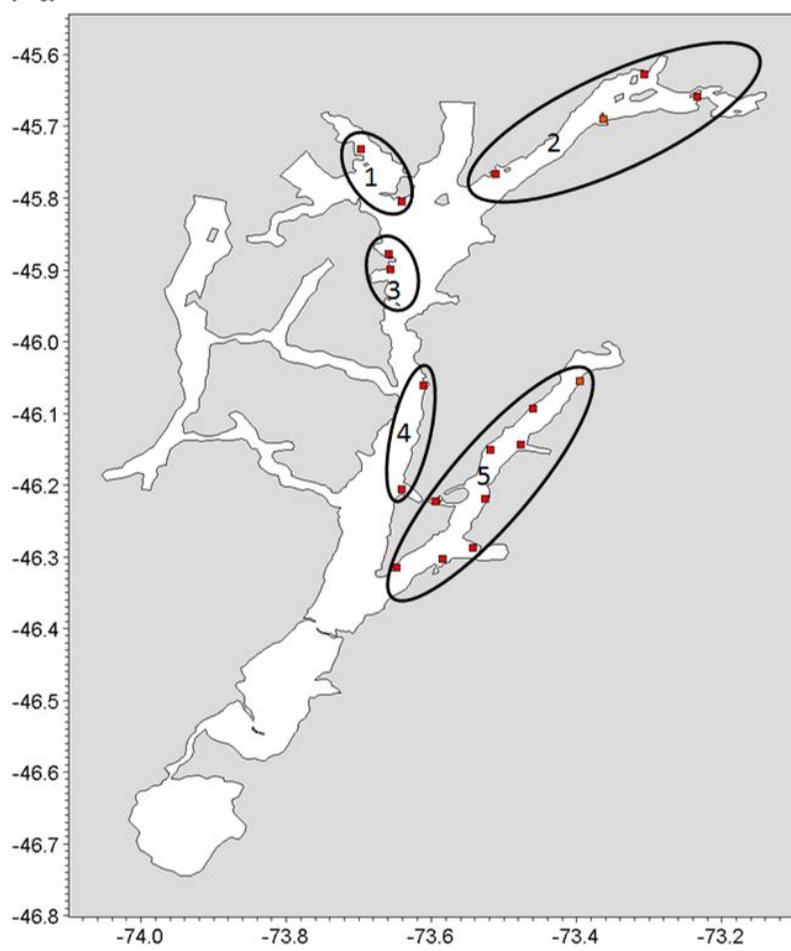


Figura 90: Fuentes de dispersión de partículas asociadas a concesiones de acuicultura y separación de áreas para análisis.

Zona 1 (Figura 91):

El escenario de invierno presenta una dispersión neta hacia el norte, siendo despreciable el transporte hacia interior del sistema, no logrando una conexión con el fiordo Quitralco (zona 2), ni traspasando la barrera topográfica ubicada en canal Elefantes (hacia zona 4), aquí las particular tienden a salir rápidamente a través del canal Costa. Para el escenario de verano hay un mayor transporte hacia el interior, generado probablemente por la acción del viento, aun así, las conexiones hacia el interior del fiordo Quitralco son escasas, llegando una cantidad menor de partículas a la boca del fiordo. Hacia el sur, hay mayores incursiones hacia canal Elefantes, sin embargo, la mayor cantidad está concentrada en el mismo lugar que en el escenario de invierno.

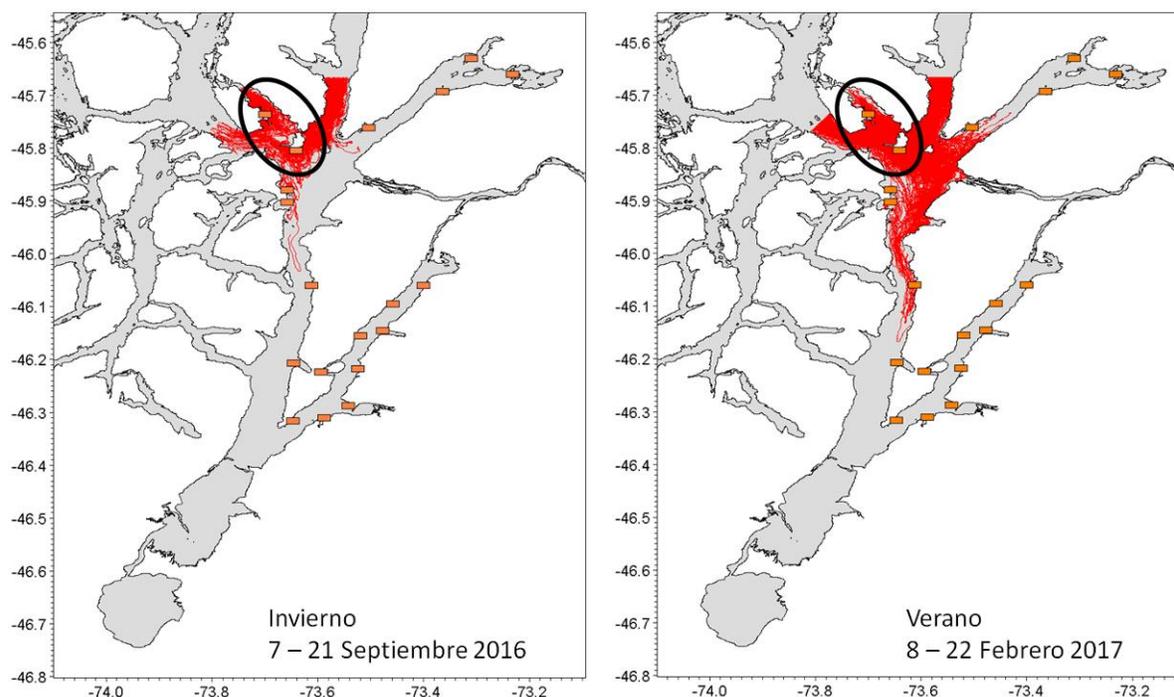


Figura 91: Dispersión de partículas para la zona 1 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Zona 2 (Figura 92):

Las partículas liberadas en Quitrusco durante el escenario de invierno, cubren primariamente todo el fiordo para posteriormente salir por el canal Costa y distribuirse alrededor de la desembocadura del río Huemules. No hay conexiones importantes hacia otras zonas. Para el escenario de verano la dispersión aumenta de manera débil hacia las zonas 1, 2 y 3. Manteniéndose la mayor cantidad de partículas distribuidas de manera similar al escenario de invierno.

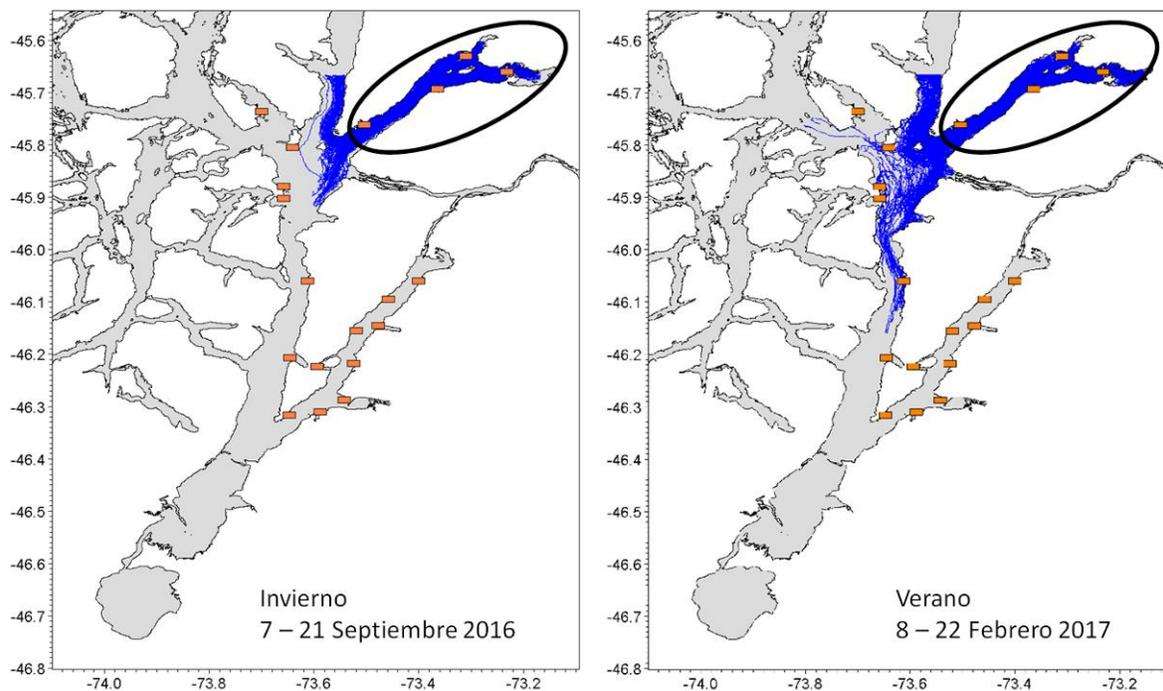


Figura 92: Dispersión de partículas para la zona 2 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Zona 3 (Figura 93):

Esta zona ubicada a la entrada del canal Elefantes, tiene para el escenario de invierno dispersiones que tienden a salir del sistema, ya sea por el paso Tres Cruces o bien el canal Costa, y pasando por la zona 1. También muestra una dispersión al sur conectando con parte de la zona 4. No se visualizan conexiones con el fiordo Quitralco. El escenario de verano muestra similares condiciones a la de invierno, salvo por una mayor salida por el paso Tres cruces que por el canal costa.

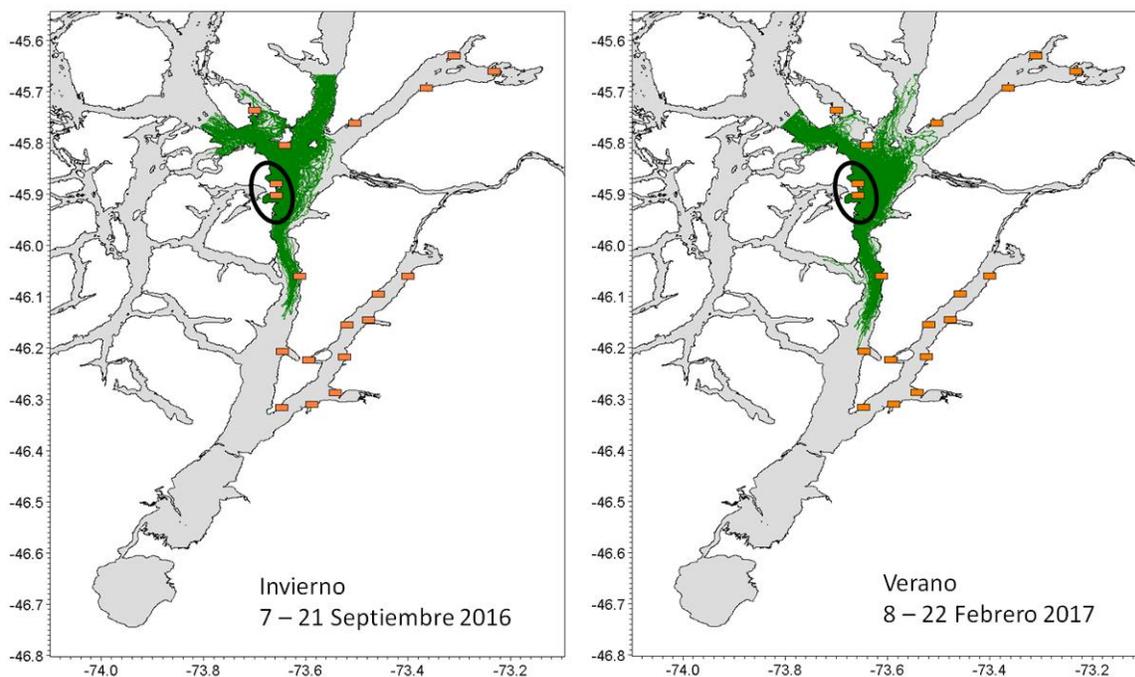


Figura 93: Dispersión de partículas para la zona 2 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Zona 4 (Figura 94).

Para el escenario de invierno se obtiene una condición de dispersión similar a la zona 3, excepto por el mayor alcance hacia el sur, debido a fuente ubicada a hacia esa zona, sin embargo, es evidente que el transporte neto es casi completamente de salida, hacia las zonas 1 y 3. Para el verano hay un mayor transporte hacia la boca de fiordo Cupquelán, generando una débil conexión con esa zona. La dispersión hacia el sur a diferencia del escenario de invierno tiene una tendencia a salir por el paso tres cruces en detrimento de canal Costa.

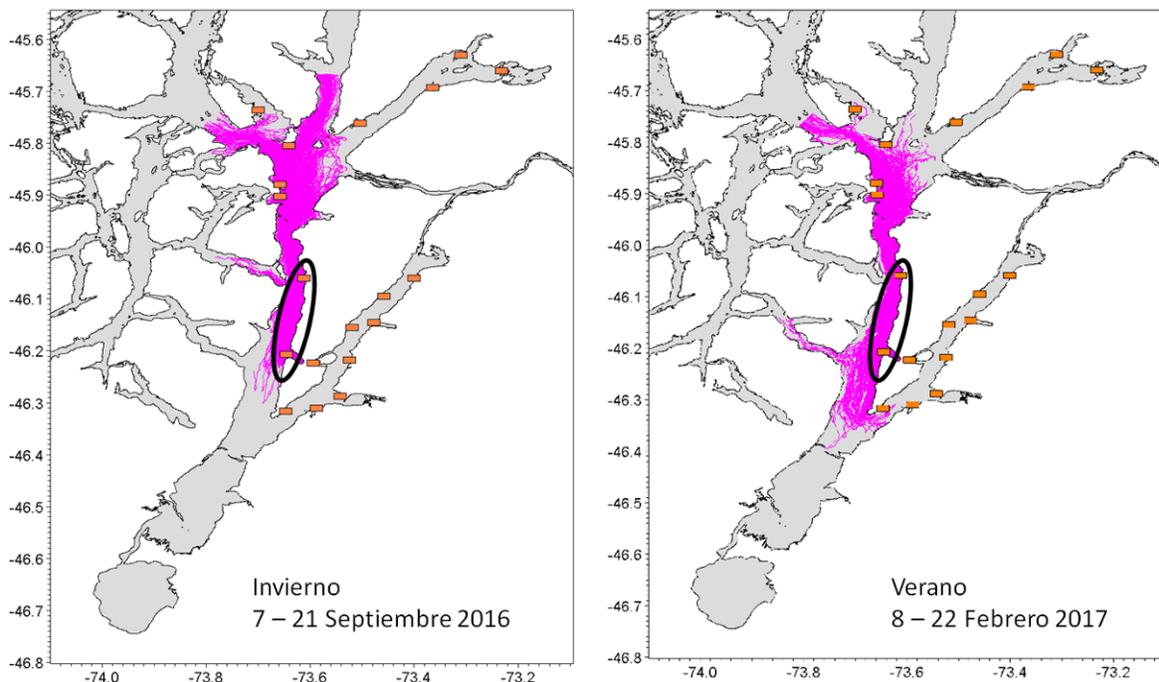


Figura 94: Dispersión de partículas para la zona 4 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

Zona 5 (Figura 95):

Para el fiordo Cupquelán las condiciones de dispersión de ambos escenarios son similares, el fiordo es cubierto completamente, para posteriormente generar una dispersión que conecta con la zona 4 y débilmente con la zona 3. Las partículas no llegan a salir del sistema y tampoco conectan con el fiordo Quitrálco.

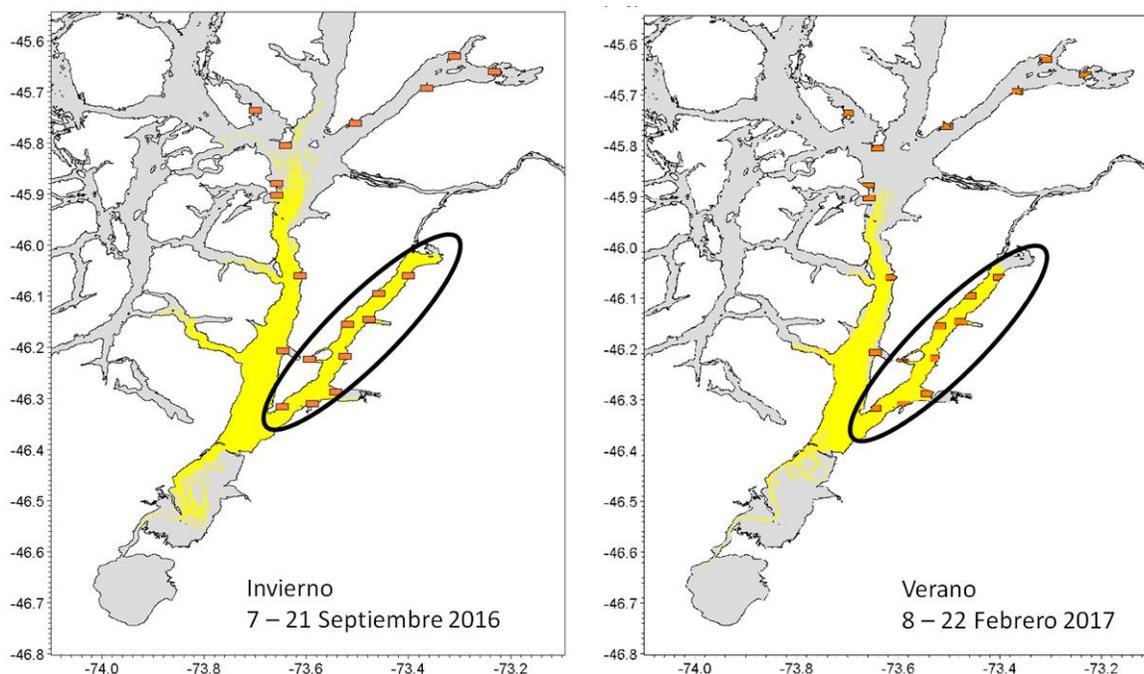


Figura 95: Dispersión de partículas para la zona 5 en escenario de invierno (izquierda) y verano (derecha).

6. DISCUSIÓN

La modelación de caudales diarios fue desarrollada en base a los datos empíricos de nivel hidrométrico medido por los sensores instalados entre noviembre de 2015 y abril de 2017. Las mediciones de caudal en momentos puntuales (mediciones de campo en mayo, agosto y noviembre 2016, enero y abril de 2017) permitieron generar regresiones para modelar el caudal en fechas durante las que no se midió, pero para las que si se cuenta con información de nivel hidrométrico.

El registro de nivel hidrométrico (y por ende los caudales diarios modelados) dan cuenta de la distribución de caudal a lo largo del periodo estudiado (agosto 2016 – abril 2017). Contar con una serie de tiempo más larga (noviembre 2015 – abril 2017) a través de la estación de monitoreo Río Exploradores I establecida anteriormente por el consultor, permitió conocer una aproximación al régimen hidrológico anual del área de estudio. Es importante mencionar que el periodo donde fue efectuado este estudio, correspondió a un año inusual en cuanto a la baja cantidad de precipitaciones.

Las relaciones empíricas establecidas a partir de los análisis con SIG y las mediciones de terreno permitieron modelar la cantidad de agua aportada por las macro-cuencas que constituyen las principales fuentes de agua dulce tributarias al Estero Elefantes, esta información constituye una aproximación para dimensionar los caudales reales, considerando las condiciones climáticas y de aislamiento que dificultan la logística y generan altos costos para la instalación de sensores y medición de caudales de ríos, en lugares no afectados por fluctuaciones de marea.

La forma en que fue abordada la cuantificación en flujos de agua dulce, entregó una información relevante considerando que en esta zona aún no hay mediciones o datos sobre caudales y/o cuantificación de agua dulce, por parte de entidades gubernamentales. Uno de los aspectos destacables es que entregó una serie de tiempo detallada de 3 microcuencas, con regímenes diferentes, permitiendo posiblemente en un desarrollo futuro implementar un modelo bajo el principio balance hidrológico que podría extenderse para obtener aproximaciones en flujos de agua dulce, en zonas don no hay información o esta es muy pobre (Vargas *et al.*, 2012).

El análisis espectral junto con el análisis armónico realizado a las corrientes eulerianas mostró que estas son afectadas significativamente por el régimen de marea semidiurno (12.42 horas) y cuartidiurno (6,21 horas).

Si se compara canal Costa y estero Elefante se observó un importante efecto de la marea sobre las corrientes, siendo un tanto más fuerte en canal Costa. Mientras que entre los esteros Quitralco y Cupquelan se identificó una mayor influencia mareal en Quitralco, a mayor profundidad, y en Cupquelan se observó una mayor energía en las capas superiores, atribuible a la configuración batimétrica del sector.

Destacaron las diferencias en cuanto a las intensidades de la corriente ya que los esteros Quitralco y Cupquelan mostraron menores intensidades con respecto a canal Costa y Estero Elefantes.

Los resultados de ADCP remolcado en paso Tres Cruces mostraron que existiría un intercambio de agua entre estero Elefante y los canales contiguos

En el estero Quitralco se observó un comportamiento típico estuarino con agua superficial de salida atribuible a la descarga de agua dulce y agua subsuperficial de entrada asociada al efecto de la marea. El transecto efectuado en el estero Cupquelan se vio más influenciado por la cercanía con el estero Elefantes y sigue el mismo comportamiento con un flujo de agua superficial hacia el norte y

una capa de agua profunda al sur evidenciando un comportamiento estuarino (Valle-Levinson, 2010). Cabe destacar el estero Quitralco por mostrar un montículo ubicado entre los 40 y los 120m en donde se podría describir un intercambio de agua profunda limitado.

La información analizada de la zona de estudio permitió identificar una estructura vertical de salinidad esquematizada en 2 patrones diferentes, el primer patrón fue observado en las estaciones localizadas entre el lado norte de estero Elefante, incluyendo canal Costa, paso 3 cruces, golfo Elefante y laguna San Rafael, presenta una estructura vertical uniforme, aunque en menor grado en las estaciones de más al norte (paso 3 Cruces, canal Costa y entrada de estero Elefante), que son las aguas que conectan el Sistema denominado Elefante con las aguas que ingresan, desde el norte por la constricción de Meninea, donde destaca la ubicación de un sill de baja profundidad 30-60m, esta constricción tiene una gran capacidad de transporte, pero solo en la capa de agua localizada hasta los 60 metros de profundidad (Salinas & Homozabal, 2003), este proceso es significativo ya que el agua que ingresa al sistema de Elefantes es agua que se encuentra en la capa superficial hacia el norte de Meninea, agua con características de menor salinidad ~31 psu, este es el principal motivo del porqué, dentro de la cuenca conformada por el sistema de Elefante, no ingresan masa de agua de connotaciones oceánicas, principalmente ASAA, sino más bien, por esta capa superficial ingresa (hacia el sur) ASAAM, agua que ya se encuentra mezclada con agua dulce (Guzman & Silva 2002), como resultado de los diferentes grados de mezcla, que esta tenga con el agua dulce provenientes de sus diversas fuentes, generara diversos cuerpos, principalmente AE-estuarina dulce, Agua Estuarina Salobre y Agua estuarina Salada, cuerpos de agua que en su distintas proporciones se distribuyeron dentro del sistema Elefante, resultados concordantes con lo encontrado en el presente estudio. Lo cual estuvo también reforzado por parámetro estratificación, el cual revelo en prácticamente todo el periodo una tendencia a la mezcla que estuvo en concordancia por la influencia mareal.

El segundo patrón fue localizado en los fiordos Quitralco y Cupquelan, los cuales mostraron en esquema característico de una zona estuarina: conformación de 2 capas: Esta capa superficial es de mayor variabilidad donde la salinidad es menor producto de la inter-acción del agua dulce con agua más salina generando la denominada circulación gravitacional ya que la interacción de estos diferentes cuerpos de agua en un sentido o en otro, referente a la mezcla experimentada, puede ser generada por la acción del viento en la capa superficial y/o por efecto de la marea, dando la estructuras particular. (Silva & Calvete, 2002). En Esta capa también se registra una mayor variación de temperatura la cual depende de la época estival/invernal, exhibiendo mayores concentraciones de oxígeno disuelto, bajo esta capa se localiza una capa de una profundidad variada de tipología uniforme, entre ambas capas se registran fuertes gradientes, tal como ha sido reportado para esta zona geográfica por Guzmán & Silva 2002. Característica que también se vieron reforzadas por el parámetro de estratificación, el cual por los elevados valores revelaron que la estratificación se detectó en todos los periodos, siendo más marcados en fiordo Cupquelan, el cual tiene más cercanías y conexión con campos de hielo norte, situación que también fue contrastadas por los registros de cauda medidos en bahía Exploradores.

La distribución vertical de la temperatura con una columna de agua estratificada, observada con inversión térmica durante el periodo invernal, termoclina cálida en superficie para el periodo estival,

ha sido reportada también por Silva & Calvete (2002), los autores plantean que este tipo de estructura obedece principalmente a dos forzantes, la primera es la fluctuación temporal de la radiación solar y aporte de agua dulce con diferencias térmicas, producto de escorrentía y/o derretimiento de glaciares y sería una condición habitual para la zona de fiordos y canales Australes de la Patagonia Chilena. Un hecho que también es importante destacar está relacionado al aumento de la temperatura y los registros en periodo estival, lo cual está relacionado al ingreso del agua proveniente desde el norte por la constricción de Meninea, agua superficial de temperatura elevadas en periodo estival ($\approx 11,5-12^{\circ}\text{C}$), hecho que en cierta medida fu coincidente con los registros en las series de tiempo de la temperatura, donde los valores alcanzan las capas profundas $\approx 90\text{m}$ e.g canal Costa temperaturas de hasta 12°C .

El patrón de distribución vertical en la concentración de oxígeno disuelto, sería la acción conjunta de varios forzantes: en los estratos superficiales las elevadas concentraciones registradas, se deberían por una parte a la acción del viento que produce un fuerte intercambio atmosfera-océano y por otro lado la actividad biológica (Silva 1998), durante el presente estudios las elevadas concentraciones de oxígeno fueron coincidentes con la alta productividad primaria detectada, sobre todo en el fiordo Quitralco. La disminución de los niveles de oxígeno detectados en las capas inferiores se debería posiblemente a la acción de oxidación de materia orgánica proveniente de las capas superficiales, agregando como segundo factor el efecto “tapón de agua dulce” que por efecto de una fuerte pycnoclina, impide la oxigenación de capas más profundas por mezcla vertical (Silva & Calvete 2002). En la zona austral (fiordos, canales), se ha detectado algunas zonas con mínimas de oxígeno (Silva y Vargas, 20014), si bien los valores de oxígeno detectas en las series de tiempo y las estaciones de CTD, mayoritariamente revelaron una columna de agua bien oxigenada, se registró una excepción detectada en fiordo Quitralco, el cual se discute en detalle dado los valores de hipoxia encontrados en las capas más profundas ($\approx 90\text{metros}$) detectadas en las series de tiempo de oxígeno.

Si bien los datos registrados por los diferentes sensores, no pudieron ser calibrados con mediciones de winkler, se realizó una comparación estadística con las estaciones de CTD, tomadas en el punto donde fue instalado el sensor, presentando un alto índice de correlación, esto por lo menos permitió descartar alguna falla en el equipo, los datos. Dado lo significativo de estas bajas de oxígeno detectados, se filtró la serie (para extraer las señales alta frecuencia, se comparó la serie de tiempo con la anomalía del sensor de presión (figura 96). Las bajas de oxígeno más marcadas y con registros de hipoxia se produjeron en época estival (febrero-marzo) con periodo de ocurrencia ~ 15 días siendo coincidente con los periodos de cuadratura, los periodos de cuadraturas generan columnas de agua más estratificada ya que es sabido que la esterificación disminuye el intercambio de agua superficiales, las cual suele ser más oxigenas, tal como como se observó en los registros del sensor de superficies (15m), donde no se registraron las abajas mencionadas anteriormente, además un hecho relevante es la elevada productividad primaria que se registró en fiordo Quitralco, en comparación a las estaciones localizadas en fiordo Cupuelan y zona de estero Elefante y golfo Elefante. Esta condición fue consistente en todos los periodos de muestreo. De estos antecedentes señalados, teóricamente se podría inferir:

El fiordo Quitralco presenta una elevada productividad primaria (la cual se intensificaría en periodo estival y de mayor estratificación), la cual podría estar generando una cantidad relativamente significativa de materia orgánica al medio (sin considerar el ingreso por fuentes naturales y

antrópicas), esta materia orgánica sería degradada rápidamente consumiendo el oxígeno en las capas más profundas, dada una fuerte estratificación (cuadratura), el intercambio y/o oxigenación por las capas superficiales, se vería limitado, siendo este último mecanismo físico el que podría ser el causante en mayor parte de estas bajas concentraciones.

Finalmente se indica que desde este punto de vista Fiordo Quitralco, podría ser considerada una zona sensible para el desarrollo de la acuicultura, no obstante, los resultados son aun incipientes y requieren ser estudiados en más detalle, para determinar si esta condición es permanente dentro del fiordo, es estacional o solo fue un hecho particular.

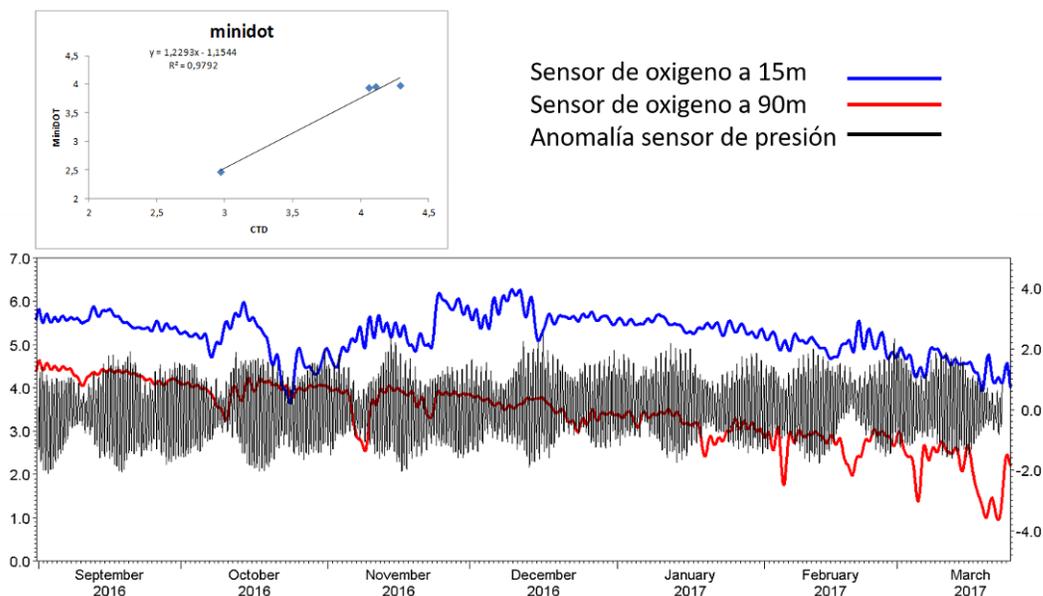


Figura 100: Comparación datos CTD, con sensor de oxígeno (panel superior). Serie de tiempo sensor oxígeno disuelto en fiordo Quitralco a 15 y 90 metros, junto a la anomalía sensor de presión (panel inferior).

La descripción de la circulación en fiordos y canales de la Patagonia Chilena ha estado limitada, entre otras cosas, por la resolución espacial y temporal de modelos que son incapaces de resolver importantes características batimétricas, meteorológicas. En este estudio se ha desarrollado un modelo hidrodinámico, basado en Mike 3 FM, con una malla espacial variable que incluye el forzamiento atmosférico de alta resolución mediante el modelo meteorológico WRF. El enfoque de una malla no estructurada permite la resolución de escalas horizontales tan pequeñas como ~ 100 m en áreas dinámicamente complejas. La dinámica de la estratificación y la mezcla, además es resuelto con un esquema de discretización vertical de 45 capas que combina coordenadas sigma en la superficie y rectangulares en el fondo, permitiendo resolver de forma adecuada los procesos de mezcla vertical en superficie.

La evaluación del modelo hidrodinámico ha demostrado una buena concordancia con una amplia gama de parámetros importantes tales como: nivel del mar, salinidad y corrientes en escalas de alta y baja frecuencia. La respuesta del modelo es capaz de representar las variaciones estacionales, y de corto plazo asociado al cambio del régimen de descarga de agua dulce y viento en una región con una costa extremadamente compleja. El forzamiento realista de la superficie del mar se logró mediante el desarrollo de un modelo meteorológico con una alta resolución espacial y temporal, que proporcionó un buen acuerdo con los datos observacionales disponibles, especialmente en la presión atmosférica, velocidad y la dirección del viento.

Los patrones de circulación derivados de los resultados de modelación muestran una marcada respuesta de la marea, asociada al constituyente M2, esto fue posible notarlo en los fiordos Quitrarco y Cupquellan y con mayor fuerza en el canal Elefantes. En la banda submareal aparece una señal de 15 días, asociada a periodos de sicigias. Por otra parte, es posible notar que en ciertos periodos el viento sopla hacia la cabeza de los fiordos generando una circulación superficial hacia el interior. Esto ya se ha observado en otros fiordos de Chile, como el Reloncaví. En este fiordo durante el invierno, el esfuerzo del viento se dirige principalmente fuera del fiordo, mientras que en verano se dirige al interior del fiordo, oponiéndose al flujo de salida superficial (Castillo, 2016).

La circulación media derivada del modelo entre los meses de septiembre de 2016 y Marzo de 2017, se encuentra determinada en buena medida por la gran cantidad de agua dulce proveniente principalmente desde Campo de Hielo Norte. Esto genera una capa superficial de salida desde los fiordos y canales interiores hacia el norte, este flujo puede llegar a ser muy intenso especialmente en canal Elefantes, por su condición topográfica. Verticalmente la estructura de salinidad, se encuentra determinada por los distintos límites batimétricos que limitan el libre transporte de aguas más saladas hacia el interior, esto provoca que el fiordo Cupquellan tenga, relativo a otros fiordos de la Patagonia Norte, un contenido de sal relativamente más bajo que otros fiordos.

El sistema marino aquí estudiado, se encuentra siendo utilizado en la actualidad en actividades productivas, específicamente en la salmonicultura. Una de las principales problemáticas (si bien no la única) que trae consigo el cultivo intensivo de salmónidos es su fragilidad ante el transporte de patógenos que pudiesen generar contagios masivos en lugares con una alta conectividad. Desde la crisis sanitaria por el virus ISA en la industria de la salmonicultura en el año 2007, se han desarrollado investigaciones tendientes a comprender de mejor forma el posible mecanismo de propagación y/o dispersión de agentes patógenos o parasitarios a partir de un centro de cultivo infectado con el fin de evitar, o al menos minimizar en la medida de lo posible, los riesgos de contagio entre centros una vez surgiera un brote. Hasta la fecha, y a raíz de las drásticas consecuencias del evento del año 2007, los esfuerzos se han centrado en el estudio de la dispersión del virus ISA. Este se transmite horizontalmente por el transporte de agua infectada entre un centro contaminado y otro, aumentando el riesgo con la cercanía entre centros (Vågsholm et al., 1994; Jarp & Karlsen, 1997; McClure et al., 2005) entre otros factores relacionados con las prácticas de cultivo como el tipo de redes y la profundidad de éstas.

El uso de herramientas oceanográficas e hidrodinámicas para la toma de decisiones sanitarias en la salmonicultura, ha sido ampliamente utilizado en países productores tales como Canadá, Noruega, Escocia, Chile e Irlanda. Estos modelos han sido utilizados para estimar la conectividad entre centros de cultivo, en relación con el transporte de partículas activas y pasivas.

Los experimentos de transporte de partículas realizados como parte de este estudio permiten establecer zonas que son más proclives a recibir partículas y otras que más bien funcionan como

zonas exportadoras. Entre el canal Costa y el paso Tres Cruces, parte norte de este sistema, se encuentra la zona que más conexiones recibe de todo el sistema, mientras que tanto el fiordo Quitralco, como Cupquelan, tienen las menores probabilidades de recibir conexiones de otras zonas. Este comportamiento es explicado por la circulación gravitacional, producto del gradiente de presión baroclinico, inducido por la gran cantidad de agua dulce que proviene de las descargas de agua dulce. La posibilidad de generar un cortafuego en canal Elefantes, libre de producción acuícola, minimizaría las posibles conexiones entre la parte sur y norte del sistema.

7. CONCLUSIONES

La forma en que fue abordada la cuantificación en flujos de agua dulce, entregó una información relevante considerando que en esta zona aún no hay mediciones o datos sobre caudales y/o cuantificación de agua dulce, por parte de entidades gubernamentales. Uno de los aspectos destacables es que entregó una serie de tiempo detallada de 3 microcuencas, con régimen diferentes, permitiendo posiblemente en un desarrollo futuro implementar un modelo, bajo el principio balance hidrológico, que podría extenderse para obtener aproximaciones en flujos de agua dulce, en zonas donde no hay información o esta es muy pobre.

La caracterización hidrográfica permitió distinguir zonas con una columna de agua con mayor uniformidad, en estas zonas se ubicaron las estaciones de canal Costa, Paso Tres Cruces, estero Elefante, golfo Elefante y Laguna San Rafael, entre las estaciones de la zona norte y la zona sur, se registraron intensos gradientes horizontales, tanto de salinidad, temperatura oxígeno disuelto y nutrientes, estos patrones se deben en primera instancia el efecto de la marea y el viento.

Las estaciones localizadas dentro del Fiordo Quitralco y Cupquellan, en cambio, evidenciaron una columna de agua estratificada, con una capa superior que registró una alta variabilidad en salinidad temperatura, oxígeno disuelto y nutrientes, la segunda capa fue más profunda con una profundización variada y con una clara tendencia a la uniformidad y estabilidad de los parámetros anterior descritos.

La columna de agua se observó en general bien oxigenada, no obstante destacan los niveles de hipoxia registrados en las series de tiempo de oxígeno disuelto en la capa de 90, dentro del Fiordo Quitralco, estos eventos estuvieron asociados a y/o acoplados a periodo de cuadratura, periodo en el cual la columna tiende a generar una estratificación más intensa y limitar el intercambio (aireación desde las capas más superficiales bien oxigenadas. También se señala que el fiordo presentó los mayores niveles de productividad primaria (concentración clorofila a), dentro de todos lugares y épocas

Se implementó un modelo hidrodinámico de alta resolución, basado en Mike 3 FM, con una malla no estructurada que incluye el forzamiento atmosférico de alta resolución mediante el modelo meteorológico WRF.

La evaluación del modelo hidrodinámico ha demostrado una adecuada consistencia con una amplia gama de parámetros importantes tales como: nivel del mar, salinidad y corrientes en escalas de alta y baja frecuencia. La respuesta del modelo es capaz de representar las variaciones estacionales, y de corto plazo asociado al cambio del régimen de descarga de agua dulce y viento en una región con una costa extremadamente compleja.

El forzamiento realista de la superficie del mar se logró mediante el desarrollo de un modelo meteorológico con una alta resolución espacial y temporal, que proporcionó un buen acuerdo con los datos observacionales disponibles, especialmente en la presión atmosférica, velocidad y la dirección del viento.

En la banda submareal aparece una señal de 15 días, asociada a periodos de sicigias. Por otra parte, es posible notar que en ciertos periodos el viento sopla hacia la cabeza de los fiordos generando una circulación superficial hacia el interior.

La circulación media derivada del modelo entre los meses de septiembre de 2016 y Marzo de 2017, se encuentra determinada en buena medida por la gran cantidad de agua dulce proveniente principalmente desde Campo de Hielo Norte. Esto genera una capa superficial de salida desde los fiordos y canales interiores hacia el norte.

La estructura de salinidad, se encuentra determinado por los distintos límites batimétricos que limitan el libre transporte de aguas más saladas hacia el interior, esto provoca que el fiordo Cupquellan tenga, relativo a otros fiordos de la Patagonia Norte, un contenido de sal relativamente más bajo que otros fiordos.

Se implementó un modelo de dispersión de partículas para estimar la conectividad entre distintas zonas de este sistema, el cual permitió estimar que, entre el canal Costa y el paso Tres Cruces, parte norte de este sistema, se encuentra la zona que más conexiones recibe de todo el sistema, mientras que tanto el fiordo Quitralco, como Cupquellan, tienen las menores probabilidades de recibir conexiones de otras zonas. La posibilidad de generar un cortafuego en canal Elefantes, libre de producción acuícola, minimizaría las posibles conexiones entre la parte sur y norte del sistema.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araya-Vergara, J. 1996. Geomorfología comparada de los fiordos de Chiloé y Aysén. Resultados del Crucero CIMAR 1 – Fiordos. Comité Oceanográfico Nacional, Valparaíso. Libro de Resúmenes: 15-17. Disponible en:
http://aysen.udec.cl/wp-content/uploads/Araya_Vergara_1996.pdf.
- Araya-Vergara, J. F. 1999. Perfiles longitudinales de fiordos de Patagonia Central. *Cienc. Tecnol. Mar.* 22: 3-29.
- Araya-Vergara, J. (2006). Geomorfología submarina de fiordos y piedmonts patagónicos. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. N. Silva and S. Palma (Eds.). Valparaíso, Comité Oceanográfico Nacional Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: 25-27 pp.
- Buschmann AH & R Pizarro. 2001. El costo ambiental de la salmonicultura en Chile. *Análisis de Políticas Públicas, Fundación Terram (Chile)* 5: 1-7. Bendat, j. & a. Piersol. 1986. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley: pp. 566. Cameron, W. & D. Pritchard. 1963. Estuaries. En M.H. Hill (ed). *The Sea*. Vol 2. New York: 306-324.
- 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 http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612012000300010&script=sci_arttext
- Cameron, W. & D. Pritchard. 1963. Estuaries. En M.H. Hill (ed). *The Sea*. Vol 2. New York: 306-324.
- Carrasco C & N Silva. 2010. Comparación de las características oceanográficas físicas y químicas presentes en la zona de puerto montta 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.
- Fuentes J. 2014. Evolución del régimen ambiental de la acuicultura en Chile. *Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso* no.42 Valparaíso.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-68512014000100013#footnote-33032-2.
- Guzmán D y Silva, N. 2002. Caracterización física y química y masas de agua en los canales australes de Chile entre Boca del Guafo y golfo Elefante (crucero CIMAR fiordo 4). *Cienc. Tecnol. Mar.* 25 (2) 45-76.
- Haralambidou, K., G. Sylaios & V.A. Tsihrintzis. 2010. Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 90(4): 174-184.

- Kalnay, E., S.J. Lord, and R.D. McPherson, 1998: Maturity of operational numerical weather prediction: medium range. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 2753-2759
- Kamga, A., S. Fongang, and A Viltard, 2000: Systematic error of ECMWF operational model over tropical Africa. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1949-1959.
- Jolliffe, I. T. and Stephenson, D. B., 2003: *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*. John Wiley and Sons
- Rodrigo C. 2006. Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. N. Silva & S. Palma (eds.) Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 19-23, disponible en: <http://www.cona.cl/revista/spanish/2-1%20Topograf%C3%ADa%20submarina.pdf>
- Salinas S & Hormazabal, S. 2004. Capacidad de transporte de la constricción de Meninea para un flujo de dos capas y el efecto de la corriente de marea. *Cienc. Tecnol. Mar*, 27 (1): 5-15.
- 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.
- 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 & Palma. S. 2006. El programa CIMAR en los canales y fiordos australes. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 11-15, 2006. Disponible en: <http://www.cona.cl/revista/spanish/1-1%20Introduccion.pdf>
- 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. 2010. *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. Cambridge University Press. 315 pp.
- Vargas, J., De la Fuente, L. y Arumí, J.L.. 2012). Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica

de Chile: aplicación de un modelo parsimonioso. Obras y Proyectos 12, 32-41.
Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132012000200003

A N E X O

A N E X O I base de datos

A N E X O II

Ecuaciones involucradas en procesamiento de corrientes
remolcadas.

El **Método de Joyce** (1989, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 6, 169-172) y método de **Pollard & Reid** (1989) se basan en :

$$\tan \alpha = \frac{\langle u_{bt}v_{sh} - v_{bt}u_{sh} \rangle}{\langle u_{bt}u_{sh} + v_{bt}v_{sh} \rangle}$$

$$1 + \beta = [\langle u_{sh}^2 + v_{sh}^2 \rangle / \langle u_{bt}^2 + v_{bt}^2 \rangle]^{1/2}$$

$$u_{corr} = [1 + \beta] [u \cos \alpha - v \sin \alpha]$$

$$v_{corr} = [1 + \beta] [u \sin \alpha + v \cos \alpha]$$

Donde:

u_{bt} componente Este de la velocidad del BT

u_{sh} componente Este de la velocidad de navegación (del GPS)

u componente Este de la velocidad de la corriente medida por el ADCP

u_{corr} componente de velocidad Este corregida

< > Indica promedio a través de un transecto

- Para la **Rotación de los ejes de coordenadas** respecto al eje de mayor variabilidad se emplea lo siguiente (solo si es necesario)

$$x' = x \cos \varphi + y \sin \varphi,$$

$$y' = -x \sin \varphi + y \cos \varphi.$$

Análisis Armónico

El flujo U puede ser representado como la suma de los armónicos:

$$u' = u_0 + \sum_{j=1}^M A_j \sin (\omega_j t + \phi_j)$$

Donde:

u_0 = velocidad residual.

A =amplitud.

ϕ = fase.

ω =frecuencia angular.

Para un armónico M1 (constituyente diurna o semidiurnas)

$$u' = u_0 + A_1 \sin (\omega_1 t + \phi_1)$$

Luego:

$$u' = u_0 + a_1 \sin (\omega_1 t) + b_1 \cos (\omega_1 t)$$

si:

$$a_1 = A_1 \cos \phi_1$$

$$b_1 = A_1 \sin \phi_1$$

Error cuadrático:

$$\varepsilon^2 = \sum^N [u - u']^2 = u^2 - 2uu' + u'^2$$

Usando

$$u' = u_0 + a_1 \sin(\omega_1 t) + b_1 \cos(\omega_1 t)$$

Entonces:

$$\varepsilon^2 = \sum^N \{ u^2 - 2uu_0 - 2ua_1 \sin(\omega_1 t) - 2ub_1 \cos(\omega_1 t) + u_0^2 + 2u_0a_1 \sin(\omega_1 t) + 2u_0b_1 \cos(\omega_1 t) + 2a_1 b_1 \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) + a_1^2 \sin^2(\omega_1 t) + b_1^2 \cos^2(\omega_1 t) \}$$

Entonces para encontrar la mínima distancia entre valores teóricos y observados necesitamos minimizar el error con respecto a u_0, a_1, b_1

$$\delta \varepsilon^2 / \delta u_0 = \sum^N \{ -2u + 2u_0 + 2a_1 \sin(\omega_1 t) + 2b_1 \cos(\omega_1 t) \} = 0$$

$$\delta \varepsilon^2 / \delta a_1 = \sum^N \{ -2u \sin(\omega_1 t) + 2u_0 \sin(\omega_1 t) + 2b_1 \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) + 2a_1 \sin^2(\omega_1 t) \} = 0$$

$$\delta \varepsilon^2 / \delta b_1 = \sum^N \{ -2u \cos(\omega_1 t) + 2u_0 \cos(\omega_1 t) + 2a_1 \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) + 2b_1 \cos^2(\omega_1 t) \} = 0$$

$$\sum^N \{ -2u + 2u_0 + 2a_1 \sin(\omega_1 t) + 2b_1 \cos(\omega_1 t) \} = 0$$

$$\sum^N \{ -2u \sin(\omega_1 t) + 2u_0 \sin(\omega_1 t) + 2b_1 \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) + 2a_1 \sin^2(\omega_1 t) \} = 0$$

$$\sum^N \{ -2u \cos(\omega_1 t) + 2u_0 \cos(\omega_1 t) + 2a_1 \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) + 2b_1 \cos^2(\omega_1 t) \} = 0$$

Reordenando:

$$\sum^N \{ u = u_0 + a_1 \sin(\omega_1 t) + b_1 \cos(\omega_1 t) \}$$

$$\sum^N \{ u \sin(\omega_1 t) = u_0 \sin(\omega_1 t) + b_1 \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) + a_1 \sin^2(\omega_1 t) \}$$

$$\sum^N \{ u \cos(\omega_1 t) = u_0 \cos(\omega_1 t) + a_1 \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) + b_1 \cos^2(\omega_1 t) \}$$

$$\begin{bmatrix} \sum^N u \\ \sum^N u \sin(\omega_1 t) \\ \sum^N u \cos(\omega_1 t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum^N \sin(\omega_1 t) & \sum^N \cos(\omega_1 t) \\ \sum^N \sin(\omega_1 t) & \sum^N \sin^2(\omega_1 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) \\ \sum^N \cos(\omega_1 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) & \sum^N \cos^2(\omega_1 t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}$$

Si existen 2 armonicos:

A=

$$\begin{pmatrix} N & \sum^N \sin(\omega_1 t) & \sum^N \cos(\omega_1 t) & \sum^N \sin(\omega_2 t) & \sum^N \cos(\omega_2 t) \\ \sum^N \sin(\omega_1 t) & \sum^N \sin^2(\omega_1 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \\ \sum^N \cos(\omega_1 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_1 t) & \sum^N \cos^2(\omega_1 t) & \sum^N \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) & \sum^N \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \\ \sum^N \sin(\omega_2 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) & \sum^N \cos(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) & \sum^N \sin^2(\omega_2 t) & \sum^N \sin(\omega_2 t) \cos(\omega_2 t) \\ \sum^N \cos(\omega_2 t) & \sum^N \sin(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) & \sum^N \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) & \sum^N \sin(\omega_2 t) \cos(\omega_2 t) & \sum^N \cos^2(\omega_2 t) \end{pmatrix}$$

B=

$$\begin{pmatrix} \sum^N u \\ \sum^N u \sin(\omega_1 t) \\ \sum^N u \cos(\omega_1 t) \\ \sum^N u \sin(\omega_2 t) \\ \sum^N u \cos(\omega_2 t) \end{pmatrix}$$

X=

$$\begin{pmatrix} u_0 \\ a_1 \\ b_1 \\ a_2 \\ b_2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}$$

Bondad de Ajuste:

$$\sum [\langle u_{\text{obs}} \rangle - u_{\text{pred}}]^2$$

$$\sum [\langle u_{\text{obs}} \rangle - u_{\text{obs}}]^2$$

Error medio cuadrático:

$$[1/N \sum (u_{\text{obs}} - u_{\text{pred}})^2]^{1/2}$$

A N E X O III

DERIVADORES

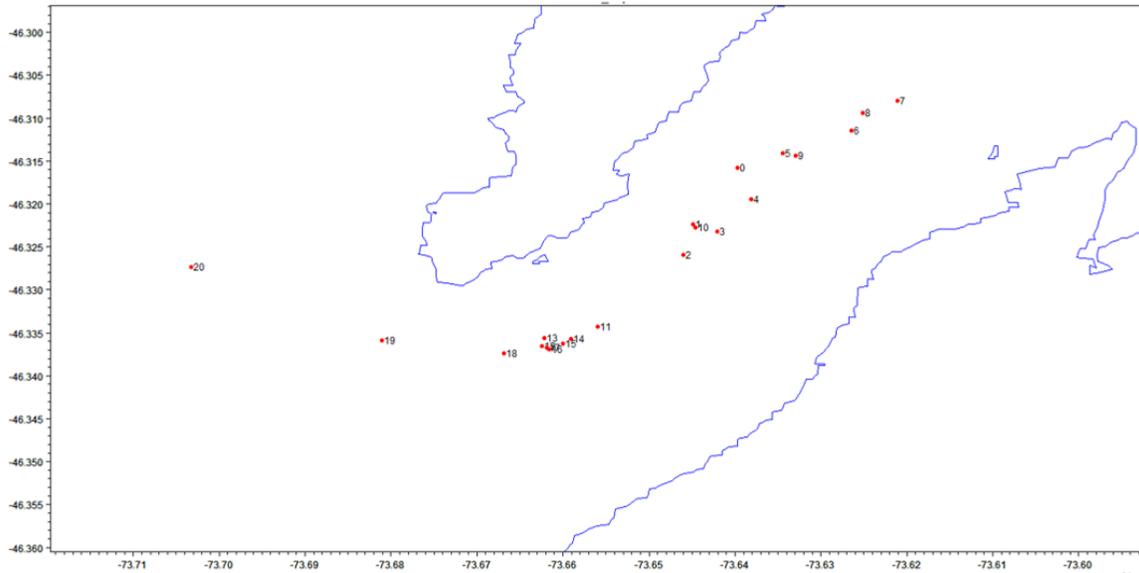


Figura 1. Trayectoria del derivador liberado en estero Cupuelan a 6 metros en septiembre del 2016. Los números de menor a mayor indican las posiciones desde el inicio al final.

Tabla I

Descripción derivador observado a 6 m en Cupuelan, septiembre 2016.

DERIVADOR OBSERVADO 6m	
DISTANCIA RECORRIDA (Km)	14.5430
DISTANCIA NETA (Km)	5.2061
TIEMPO (horas)	20
VELOCIDAD MEDIA(cm/s)	20.1930

Tabla II

Fecha y posición geográfica cada una hora de Derivador observado a 6 m en Cupquelan, septiembre 2016

fecha	hora(GMT)	longitud	latitud	#
04-sep-16	15:04	-73.6397	-46.3158	0
04-sep-16	16:04	-73.6449	-46.3223	1
04-sep-16	17:04	-73.646	-46.3259	2
04-sep-16	18:04	-73.6421	-46.3232	3
04-sep-16	19:04	-73.6381	-46.3194	4
04-sep-16	20:04	-73.6344	-46.3141	5
04-sep-16	21:04	-73.6265	-46.3114	6
04-sep-16	22:04	-73.6211	-46.308	7
04-sep-16	23:04	-73.6251	-46.3094	8
05-sep-16	0:04	-73.6329	-46.3144	9
05-sep-16	1:04	-73.6446	-46.3227	10
05-sep-16	2:04	-73.656	-46.3343	11
05-sep-16	3:04	-73.6625	-46.3365	12
05-sep-16	4:04	-73.6622	-46.3356	13
05-sep-16	5:04	-73.6591	-46.3357	14
05-sep-16	6:04	-73.66	-46.3363	15
05-sep-16	7:04	-73.6616	-46.3369	16
05-sep-16	8:04	-73.6619	-46.3367	17
05-sep-16	9:04	-73.6669	-46.3374	18
05-sep-16	10:04	-73.6811	-46.3359	19
05-sep-16	11:04	-73.7033	-46.3273	20

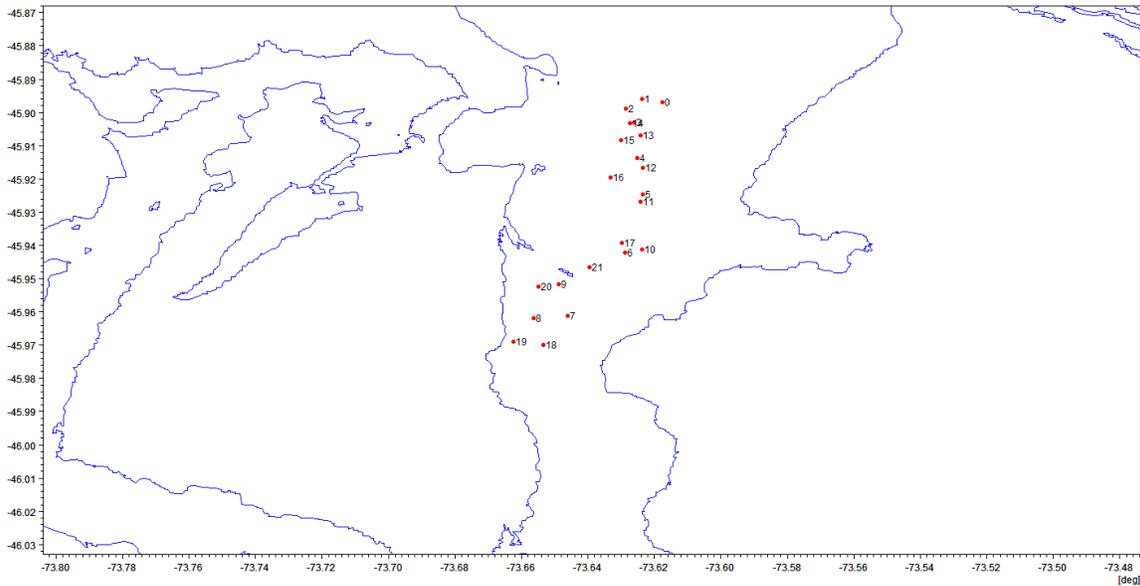


Figura 2. Trayectoria del derivador liberado en Elefante norte a 6 metros en septiembre del 2016. Los números de menor a mayor indican las posiciones desde el inicio al final.

Tabla III

Descripción derivador observado a 6 m Elefante norte , septiembre 2016.

DERIVADOR OBSERVADO 6m	
DISTANCIA RECORRIDA (Km)	33.3038
DISTANCIA NETA (Km)	4.7738
TIEMPO (horas)	21
VELOCIDAD MEDIA(cm/s)	44.0403

Tabla IV

Fecha y posición geográfica cada una hora de Derivador observado a 6 m en Elefante norte, septiembre 2016.

fecha	hora (GMT)	longitud	latitud	numero
06-sep-16	14:46	-73.6176	-45.8968	0
06-sep-16	15:46	-73.6237	-45.8960	1
06-sep-16	16:46	-73.6286	-45.8989	2
06-sep-16	17:46	-73.6261	-45.9030	3
06-sep-16	18:46	-73.6251	-45.9137	4
06-sep-16	19:46	-73.6234	-45.9247	5
06-sep-16	20:46	-73.6289	-45.9423	6
06-sep-16	21:46	-73.6462	-45.9611	7
06-sep-16	22:46	-73.6563	-45.9620	8
06-sep-16	23:46	-73.6487	-45.9517	9
07-sep-16	0:46	-73.6238	-45.9413	10
07-sep-16	1:46	-73.6243	-45.9269	11
07-sep-16	2:46	-73.6234	-45.9167	12
07-sep-16	3:46	-73.6241	-45.9069	13
07-sep-16	4:46	-73.6273	-45.9033	14
07-sep-16	5:46	-73.6300	-45.9083	15
07-sep-16	6:46	-73.6331	-45.9195	16
07-sep-16	7:46	-73.6299	-45.9393	17
07-sep-16	8:46	-73.6535	-45.9699	18
07-sep-16	9:46	-73.6624	-45.9690	19
07-sep-16	10:46	-73.6549	-45.9524	20
07-sep-16	11:46	-73.6395	-45.9465	21

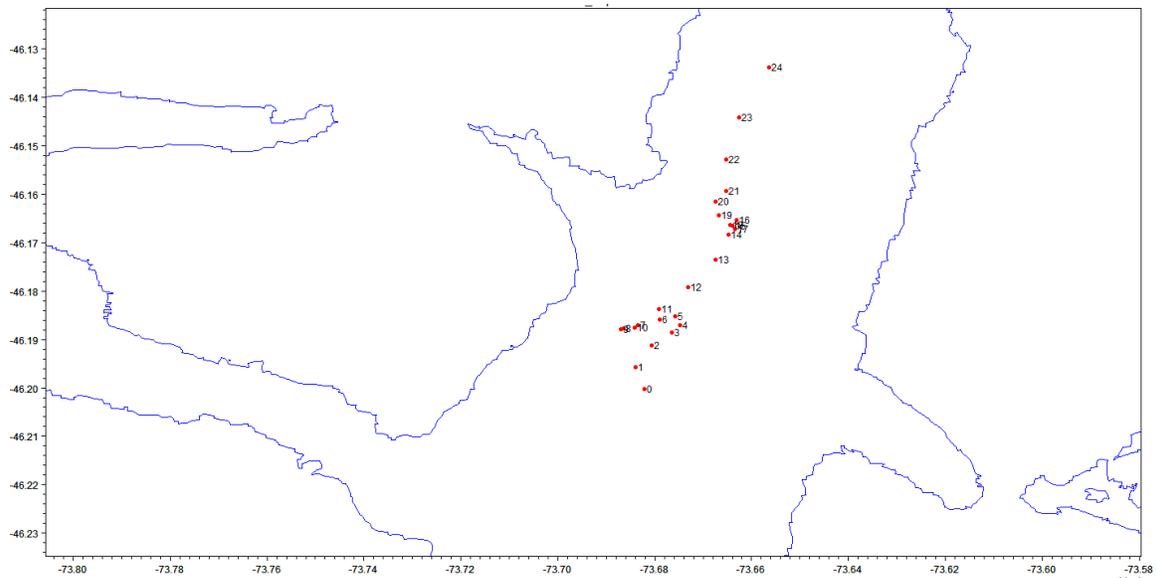


Figura 3. Trayectoria del derivador liberado en Elefante sur a 6 metros en septiembre del 2016. Los números de menor a mayor indican las posiciones desde el inicio al final.

Tabla V

Descripción derivador observado a 6 m Elefante sur, septiembre 2016.

DERIVADOR OBSERVADO 6m	
DISTANCIA RECORRIDA (Km)	10.86
DISTANCIA NETA (Km)	7.85
TIEMPO (horas)	24
VELOCIDAD MEDIA(cm/s)	12.5670

Tabla VI

Fecha y posición geográfica cada una hora de Derivador observado a 6 m en Elefante sur, septiembre 2016.

fecha	hora	latitud	longitud	#
05-09-2016	12:36	-46.2003	-73.6822	0
05-09-2016	13:36	-46.1957	-73.6839	1
05-09-2016	14:36	-46.1913	-73.6807	2
05-09-2016	15:36	-46.1885	-73.6764	3
05-09-2016	16:36	-46.1871	-73.6747	4
05-09-2016	17:36	-46.1853	-73.6758	5
05-09-2016	18:36	-46.1859	-73.6789	6
05-09-2016	19:36	-46.187	-73.6835	7
05-09-2016	20:36	-46.1878	-73.6865	8
05-09-2016	21:36	-46.1879	-73.6869	9
05-09-2016	22:36	-46.1875	-73.6842	10
05-09-2016	23:36	-46.1837	-73.6791	11
06-09-2016	0:36	-46.1792	-73.6731	12
06-09-2016	1:36	-46.1735	-73.6674	13
06-09-2016	2:36	-46.1683	-73.6647	14
06-09-2016	3:36	-46.1665	-73.6639	15
06-09-2016	4:36	-46.1653	-73.6631	16
06-09-2016	5:36	-46.1671	-73.6635	17
06-09-2016	6:36	-46.1663	-73.6645	18
06-09-2016	7:36	-46.1644	-73.6667	19
06-09-2016	8:36	-46.1615	-73.6675	20
06-09-2016	9:36	-46.1594	-73.6652	21
06-09-2016	10:36	-46.1529	-73.6653	22
06-09-2016	11:36	-46.1442	-73.6625	23
06-09-2016	12:36	-46.1338	-73.6564	24

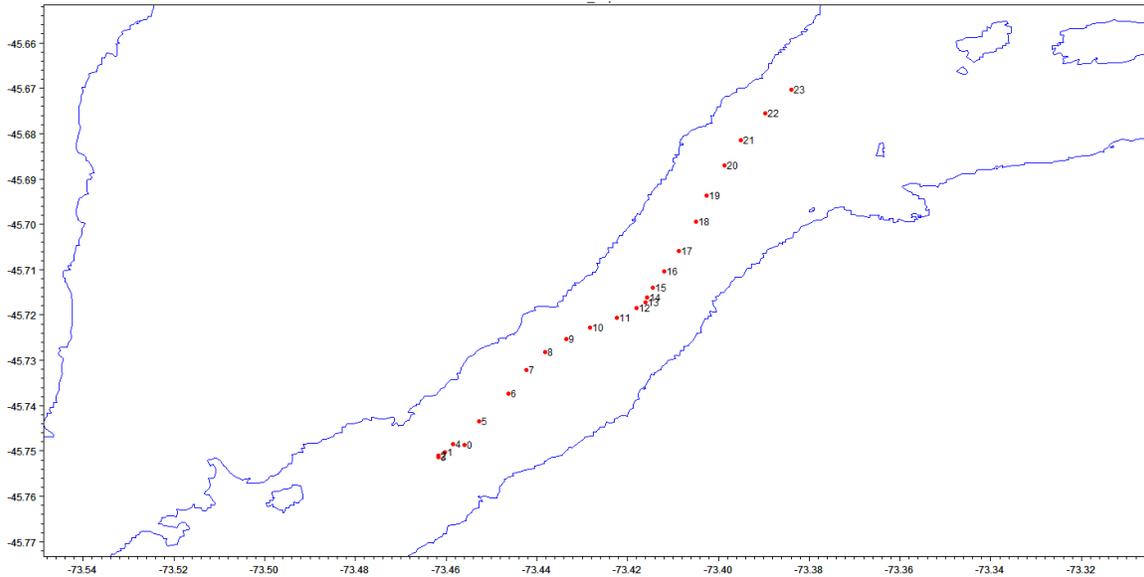


Figura 4. Trayectoria del derivador liberado en Quitralco a 6 metros en septiembre del 2016. Los números de menor a mayor indican las posiciones desde el inicio al final.

Tabla VII

Descripción derivador observado a 6 m Quitralco, septiembre 2016.

DERIVADOR OBSERVADO 6m	
DISTANCIA RECORRIDA (Km)	12.46
DISTANCIA NETA (Km)	11.00
TIEMPO (horas)	23
VELOCIDAD MEDIA(cm/s)	15.05

Tabla VIII

Fecha y posición geográfica cada una hora de Derivador observado a 6 m en Quitralco, septiembre 2016.

fecha	hora GMT	longitud	latitud	#
7-sept_2016	14:56	-73.4559	-45.7487	0
7-sept_2016	15:56	-73.4602	-45.7502	1
7-sept_2016	16:56	-73.4618	-45.751	2
7-sept_2016	17:56	-73.4618	-45.7513	3
7-sept_2016	18:56	-73.4585	-45.7484	4
7-sept_2016	19:56	-73.4527	-45.7435	5
7-sept_2016	20:56	-73.4463	-45.7373	6
7-sept_2016	21:56	-73.4424	-45.7321	7
7-sept_2016	22:56	-73.4382	-45.7281	8
7-sept_2016	23:56	-73.4336	-45.7253	9
8-sept_2016	0:56	-73.4283	-45.7227	10
8-sept_2016	1:56	-73.4224	-45.7206	11
8-sept_2016	2:56	-73.418	-45.7185	12
8-sept_2016	3:56	-73.4161	-45.7172	13
8-sept_2016	4:56	-73.4157	-45.7161	14
8-sept_2016	5:56	-73.4145	-45.7139	15
8-sept_2016	6:56	-73.4119	-45.7104	16
8-sept_2016	7:56	-73.4088	-45.7059	17
8-sept_2016	8:56	-73.405	-45.6994	18
8-sept_2016	9:56	-73.4026	-45.6937	19
8-sept_2016	10:56	-73.3987	-45.6871	20
8-sept_2016	11:56	-73.3951	-45.6815	21
8-sept_2016	12:56	-73.3896	-45.6755	22
8-sept_2016	13:56	-73.3839	-45.6703	23

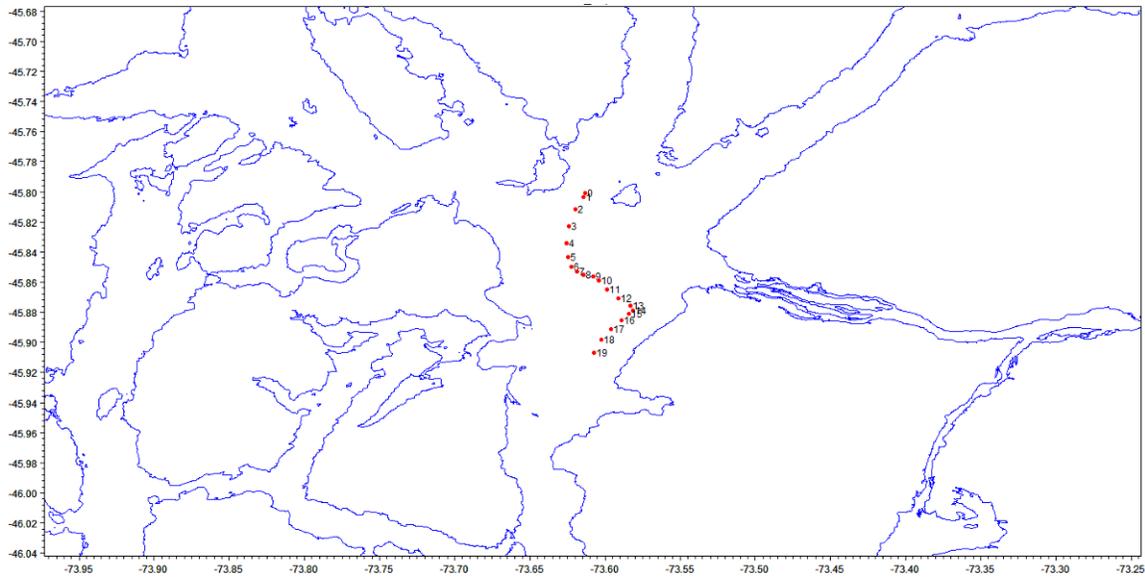


Figura 5. Trayectoria del derivador liberado en Raimapu a 6 metros en septiembre del 2016. Los números de menor a mayor indican las posiciones desde el inicio al final.

Tabla IX

Descripción derivador observado a 6 m Raimapu, septiembre 2016.

DERIVADOR OBSERVADO 6m	
DISTANCIA RECORRIDA (Km)	14.54
DISTANCIA NETA (Km)	12.09
TIEMPO (horas)	19
VELOCIDAD MEDIA(cm/s)	21.25

Tabla X

Fecha y posición geográfica cada una hora de Derivador observado a 6 m en Raimapu, septiembre 2016.

fecha	hora (GMT)	longitud	latitud	#
08-sep-16	16:56	-73.6131	-45.8007	0
08-sep-16	17:56	-73.6146	-45.8034	1
08-sep-16	18:56	-73.6195	-45.8116	2
08-sep-16	19:56	-73.6243	-45.8229	3
08-sep-16	20:56	-73.6254	-45.8341	4
08-sep-16	21:56	-73.6245	-45.8434	5
08-sep-16	22:56	-73.6227	-45.8497	6
08-sep-16	23:56	-73.6187	-45.8529	7
09-sep-16	0:56	-73.6143	-45.8551	8
09-sep-16	1:56	-73.608	-45.8561	9
09-sep-16	2:56	-73.6039	-45.8589	10
09-sep-16	3:56	-73.599	-45.865	11
09-sep-16	4:56	-73.591	-45.8706	12
09-sep-16	5:56	-73.5833	-45.8755	13
09-sep-16	6:56	-73.5813	-45.8791	14
09-sep-16	7:56	-73.5844	-45.8809	15
09-sep-16	8:56	-73.5889	-45.8853	16
09-sep-16	9:56	-73.5959	-45.8911	17
09-sep-16	10:56	-73.6024	-45.8985	18
09-sep-16	11:56	-73.6074	-45.9069	19

ANEXO IV

EVALUACIÓN ESTADÍSTICA DE CORRIENTES

Evaluación estadística de corrientes

Las evaluaciones se realizaron para verificar el comportamiento del modelo en distintas bandas de frecuencias, principalmente en la escala mareal y submareal (residual), para el último caso, los datos fueron filtrados utilizando un filtro paso bajo coseno de Lanczos de 40 horas de corte y 121 pesos (Walter y Heston, 1982; Thompson, 1983), con el fin de quitar la frecuencias asociadas a la marea. Las medidas estadísticas utilizadas en cada una de las series de tiempo están descritas en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Índices estadísticos de evaluación del modelo (SIM) y las observaciones (OBS)

Performance measure	Equation
Mean error	$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i) = \overline{OBS} - \overline{SIM}$
Mean absolute error	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N OBS_i - SIM_i $
Root mean squared error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}$
Standard deviation of residuals	$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i - (\overline{OBS} - \overline{SIM}))^2}$
Coefficient of determination	$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})(SIM_i - \overline{SIM}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2 \sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{SIM})^2}$
Coefficient of efficiency (Nash-Sutcliffe coefficient)	$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2}$
Index of agreement	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{OBS} + OBS_i - \overline{OBS})^2}$

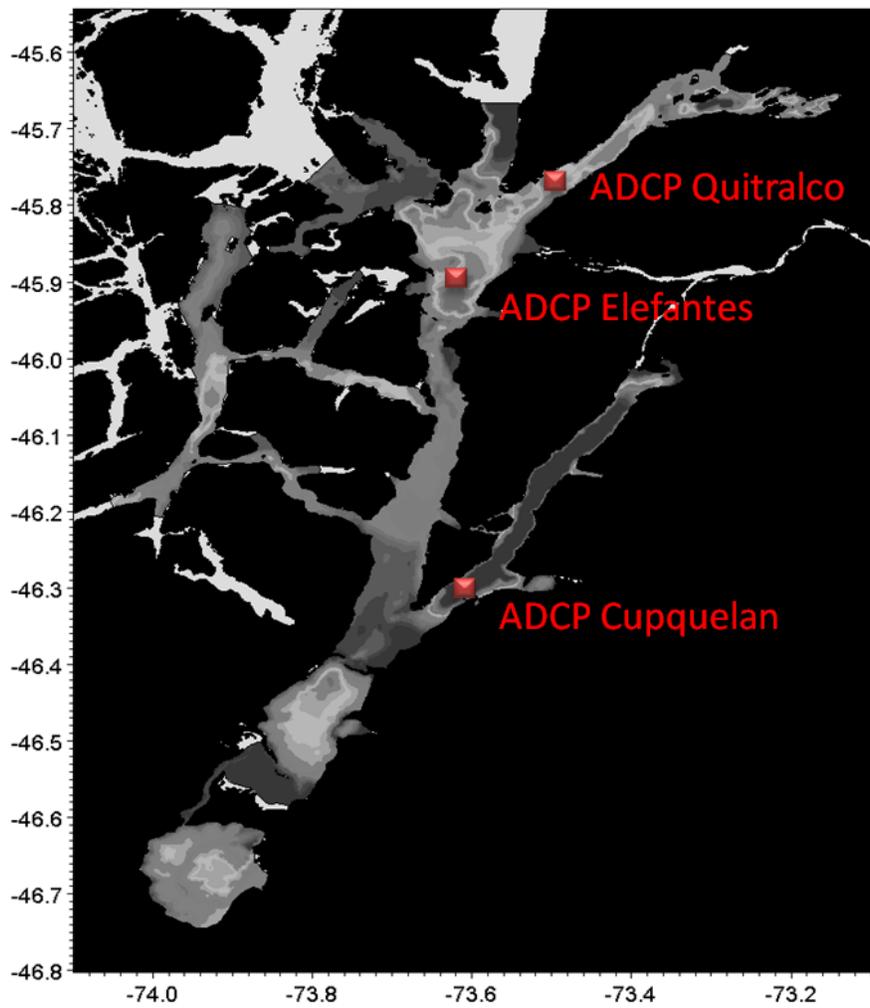
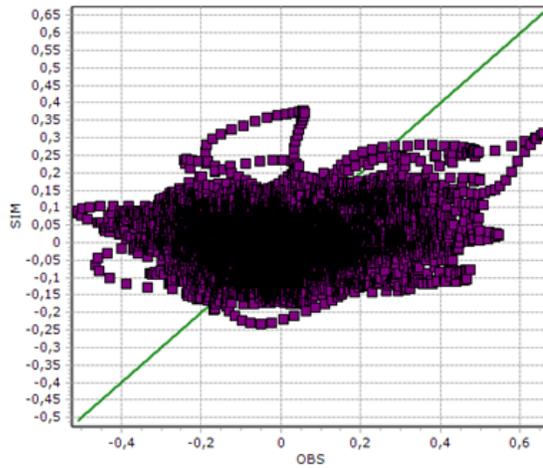


Figura 9: Posición de ADCP para evaluación del modelo.

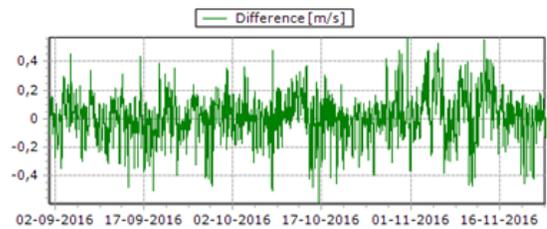
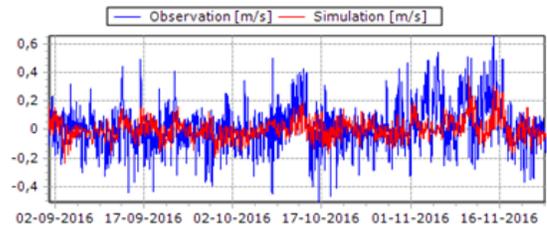
1. Escala temporal mareal

U-Este Elefantes 2m

Scatter Plot



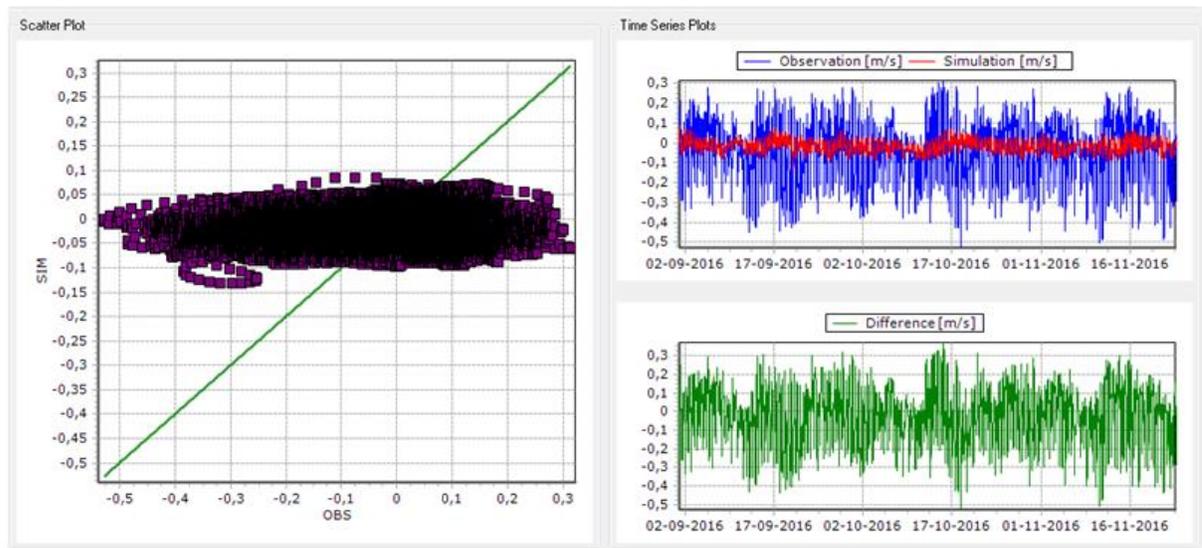
Time Series Plots



Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0114	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,1155	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,1523	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1518	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,0219	[-]
	Coefficient of Efficiency	-3,8150	[-]
	Index of Agreement	0,4074	[-]

U-Este Elefantos 15m

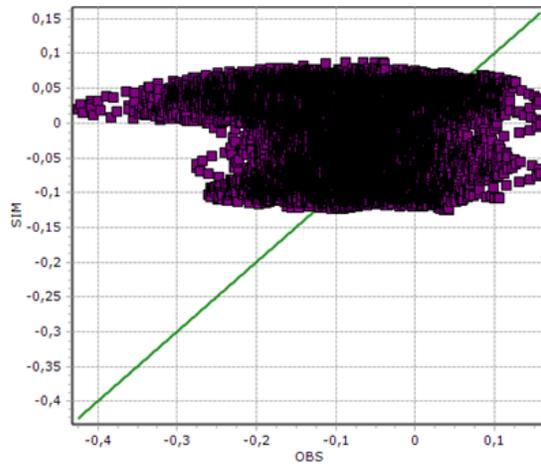


Performance Measures

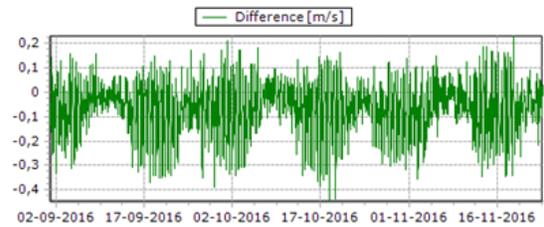
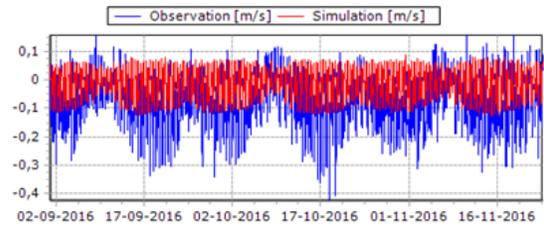
	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	-0,0245	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,1243	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,1541	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1521	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,0130	[-]
	Coefficient of Efficiency	-20,5883	[-]
	Index of Agreement	0,2730	[-]

U-Este Elefantas 70m

Scatter Plot



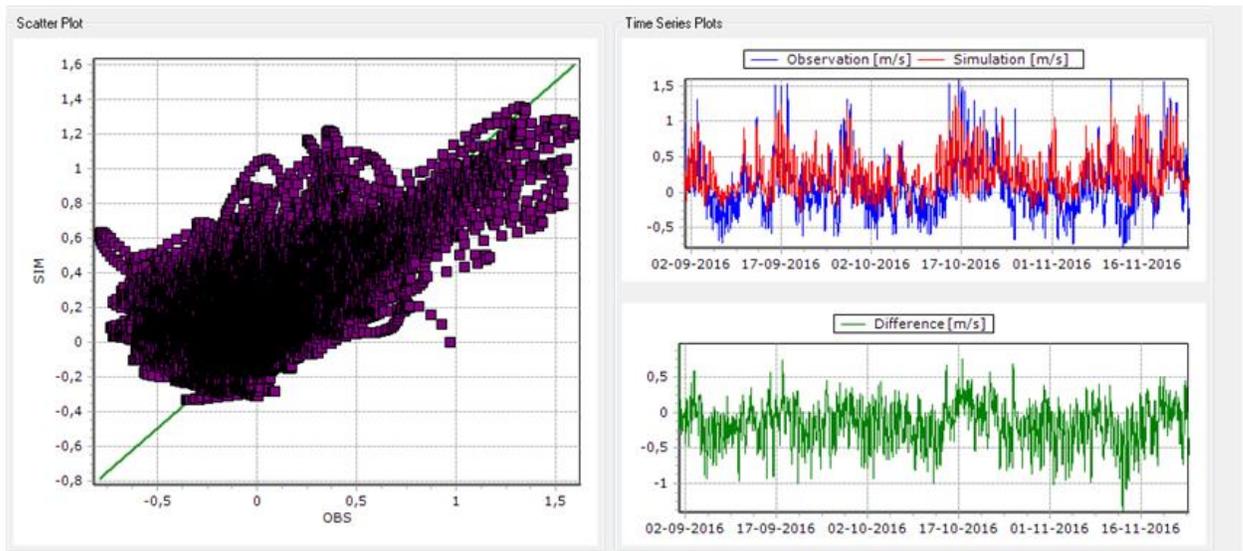
Time Series Plots



Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	-0,0633	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0936	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,1227	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1051	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,0018	[-]
	Coefficient of Efficiency	-3,8222	[-]
	Index of Agreement	0,4117	[-]

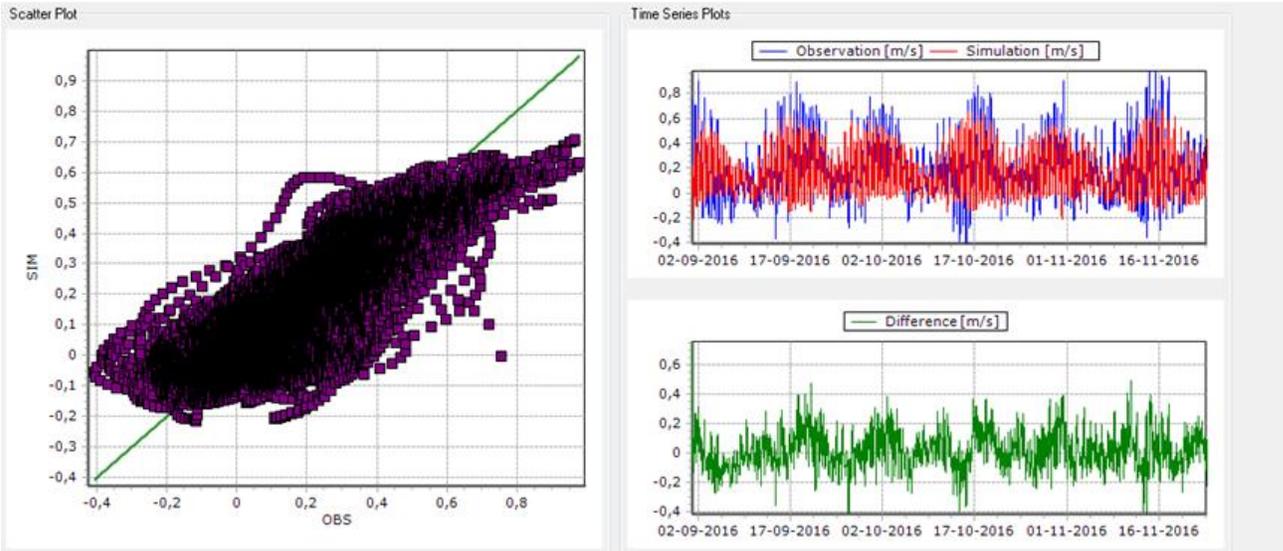
V-Norte Elefantes 2m



Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	-0,1689	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,2610	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,3391	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,2941	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,3998	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,4211	[-]
	Index of Agreement	0,7402	[-]

V-Norte Elefantos 15m

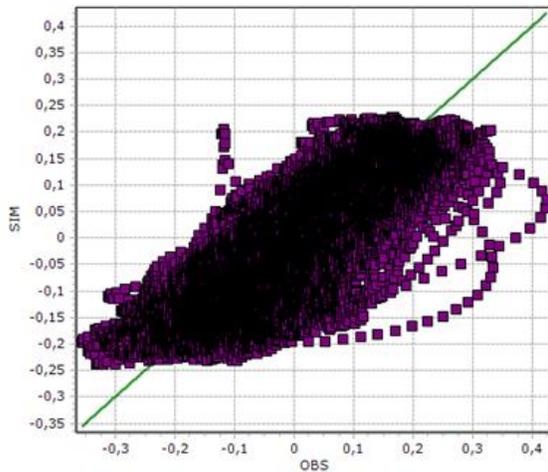


Performance Measures

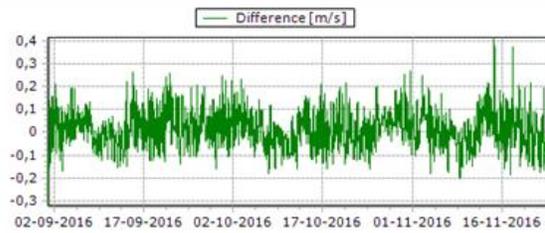
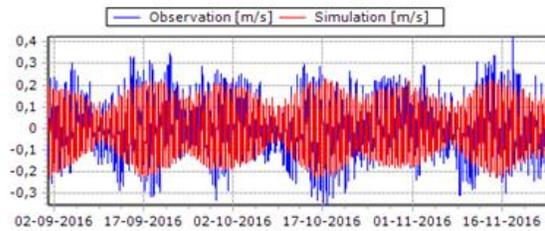
	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0188	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0998	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,1272	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1258	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,6742	[-]
	Coefficient of Efficiency	0,5200	[-]
	Index of Agreement	0,8943	[-]

V-Norte Elefantos 70m

Scatter Plot



Time Series Plots

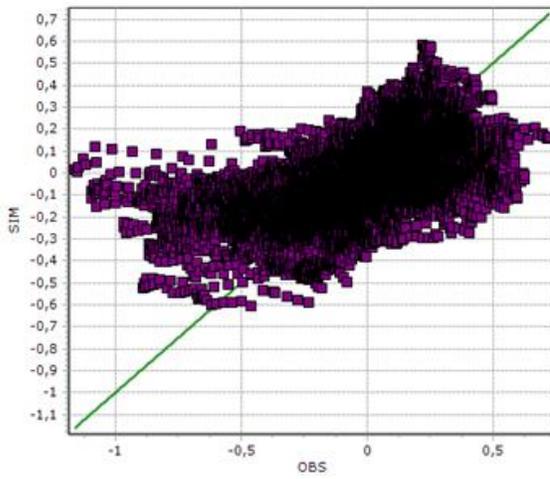


Performance Measures

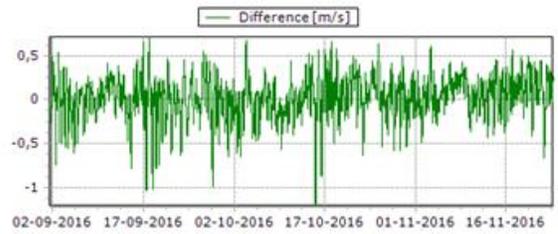
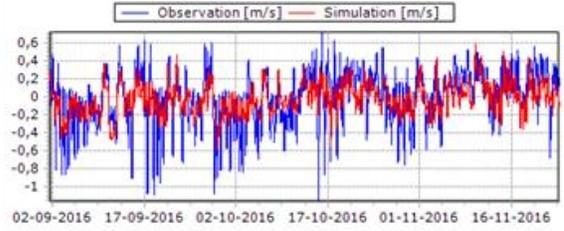
	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0148	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0639	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0814	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0800	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,6467	[-]
	Coefficient of Efficiency	0,5430	[-]
	Index of Agreement	0,8895	[-]

U-Norte Cupquelan 2m

Scatter Plot



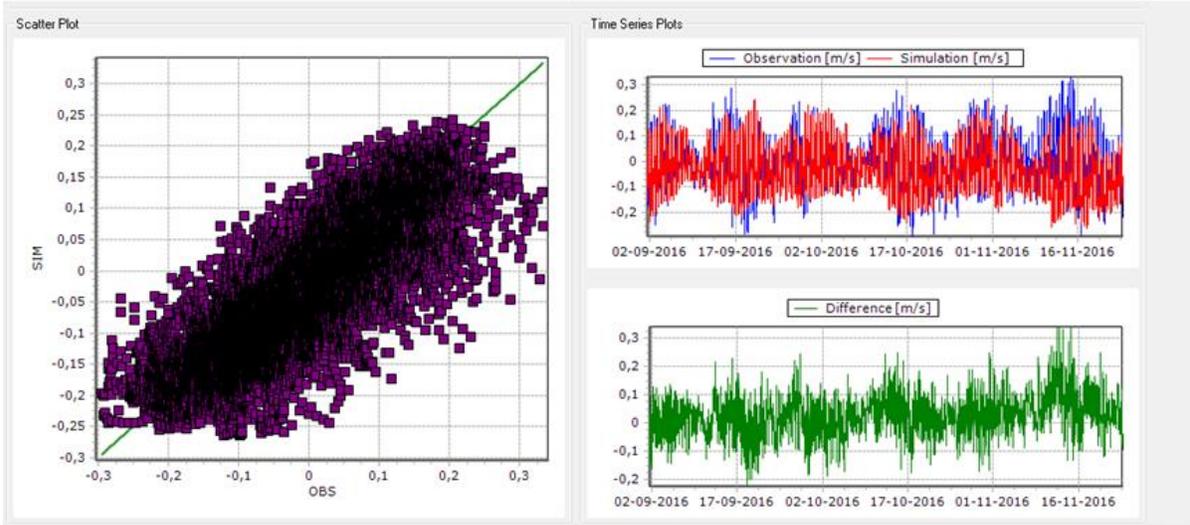
Time Series Plots



Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0154	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,1826	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,2377	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,2372	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,3339	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,8471	[-]
	Index of Agreement	0,6956	[-]

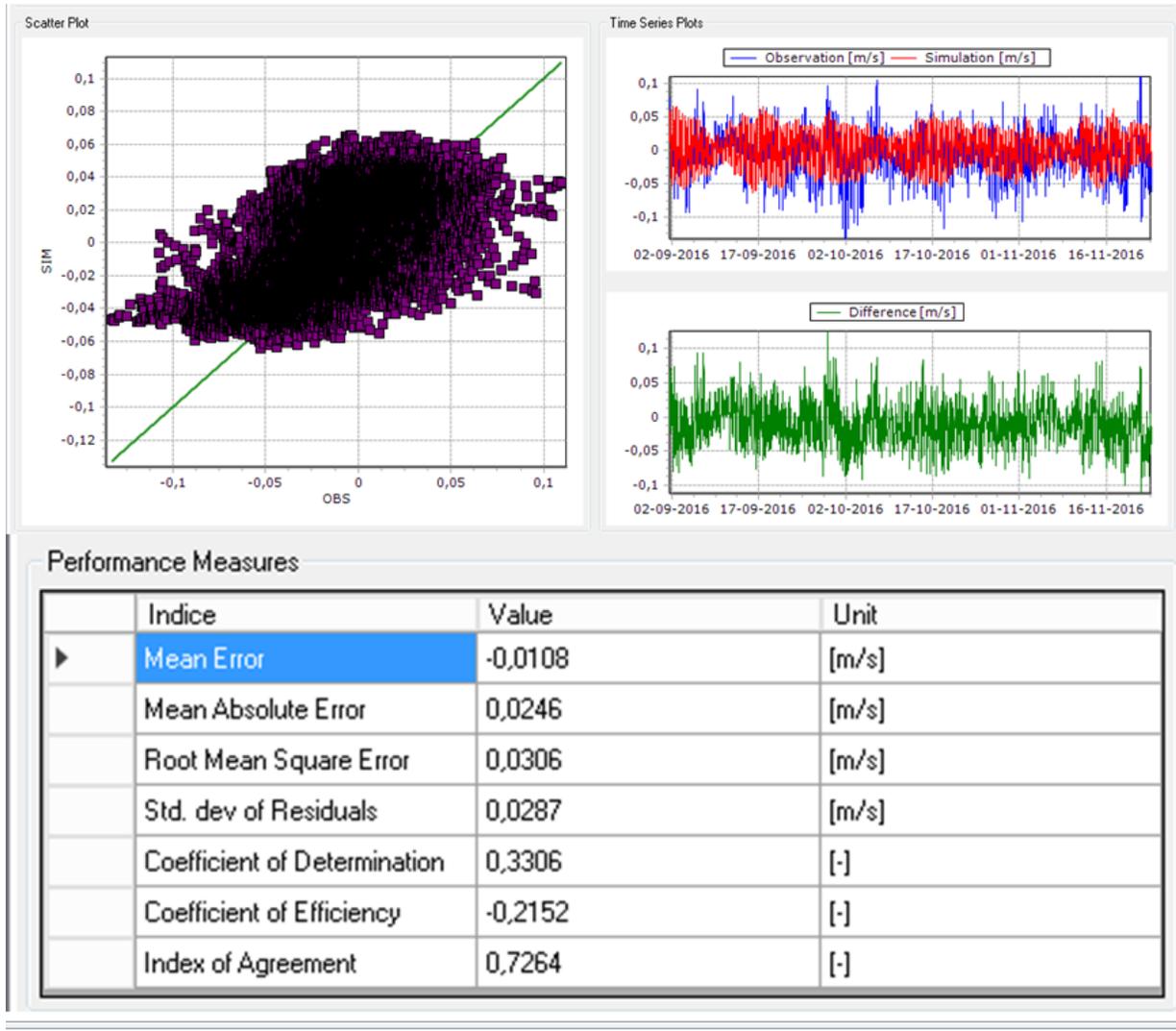
U-Norte Cupquelan 15m



Performance Measures

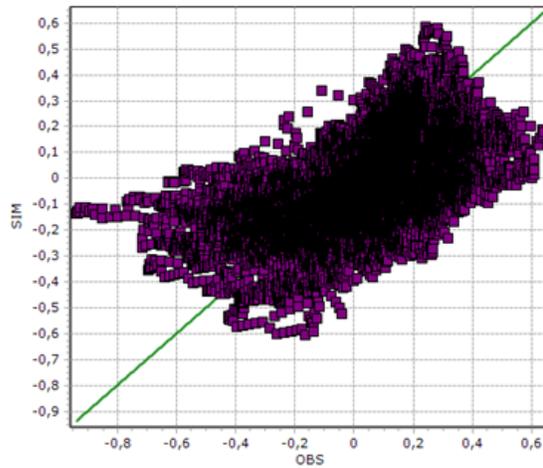
	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0292	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0551	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0712	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0649	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,6745	[-]
	Coefficient of Efficiency	0,5405	[-]
	Index of Agreement	0,8868	[-]

U-Norte Cupquelan 70m

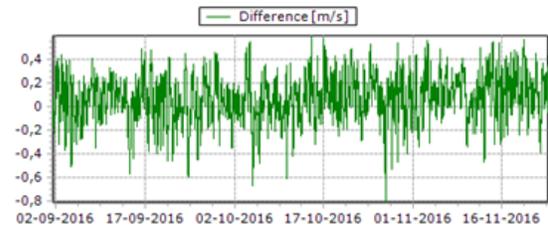
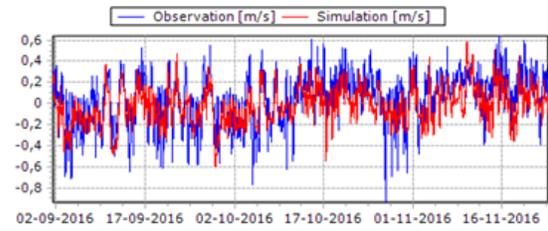


V-Norte Cupquelan 2m

Scatter Plot



Time Series Plots

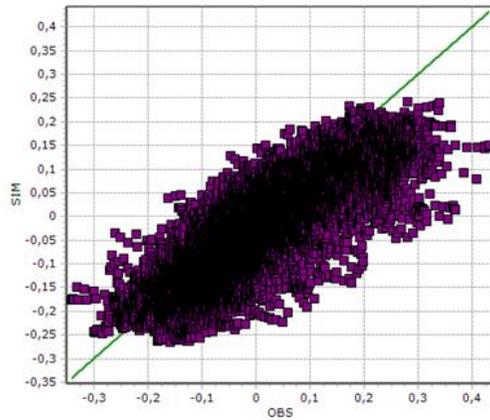


Performance Measures

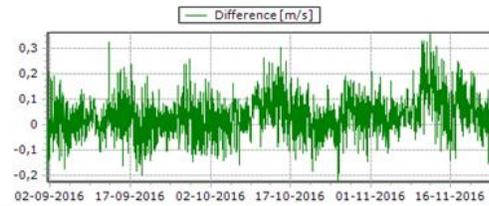
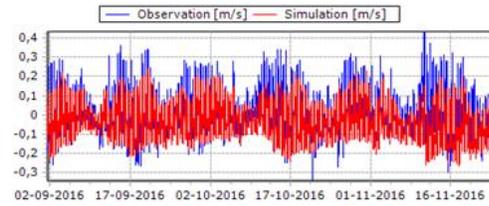
	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0652	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,1629	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,2046	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1940	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,3483	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,3684	[-]
	Index of Agreement	0,7277	[-]

V-Norte Cupquelan 15m

Scatter Plot



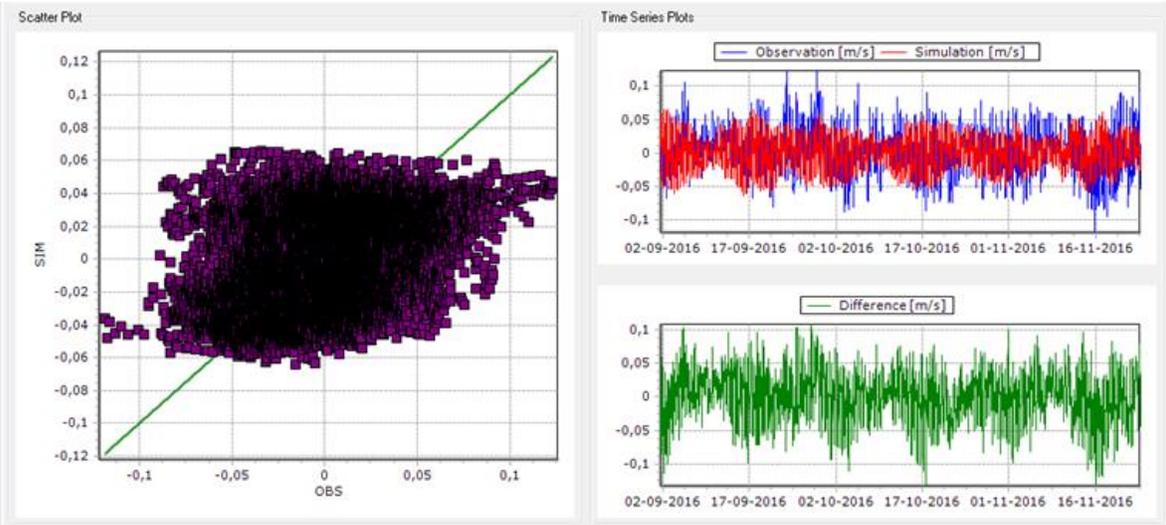
Time Series Plots



Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0382	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0589	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0774	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0673	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,7073	[-]
	Coefficient of Efficiency	0,4569	[-]
	Index of Agreement	0,8830	[-]

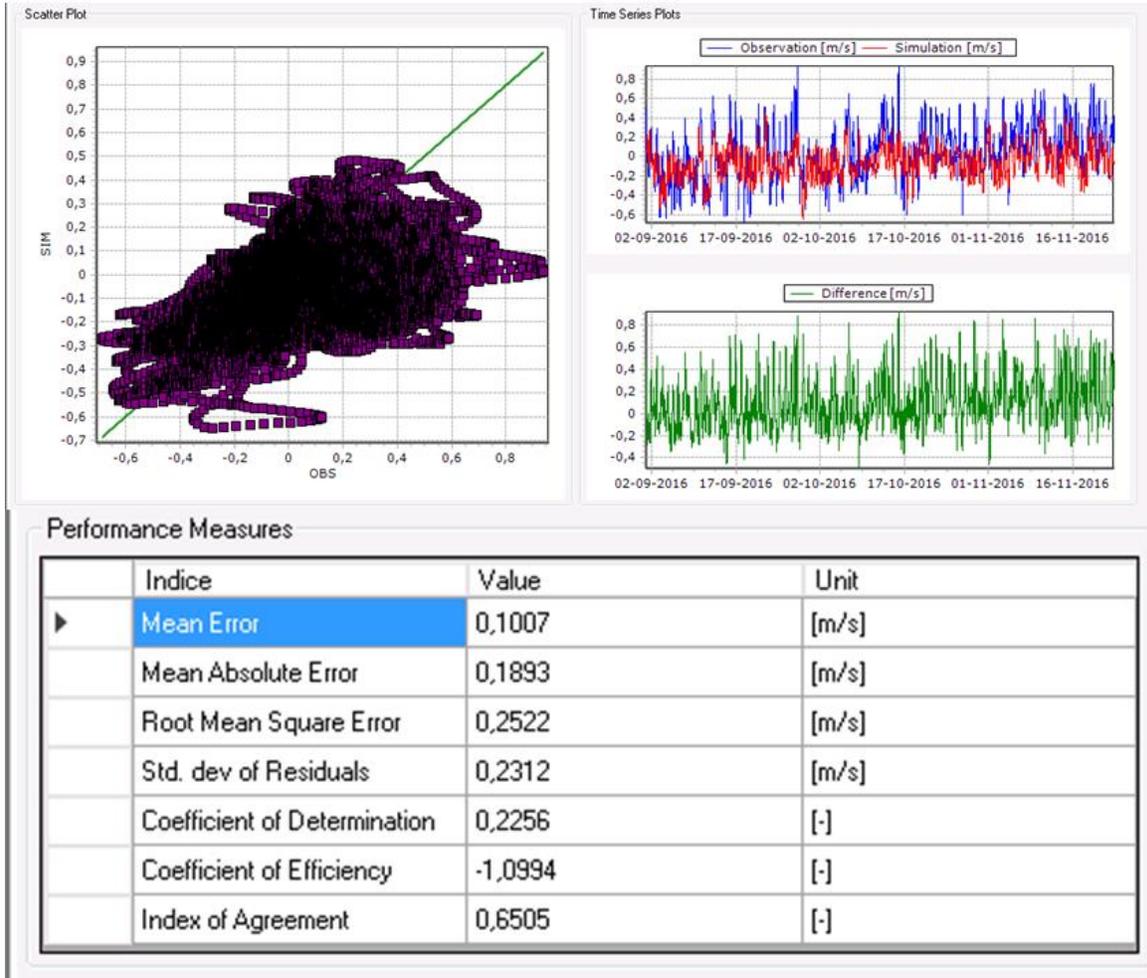
V-Norte Cupquelan 70m



Performance Measures

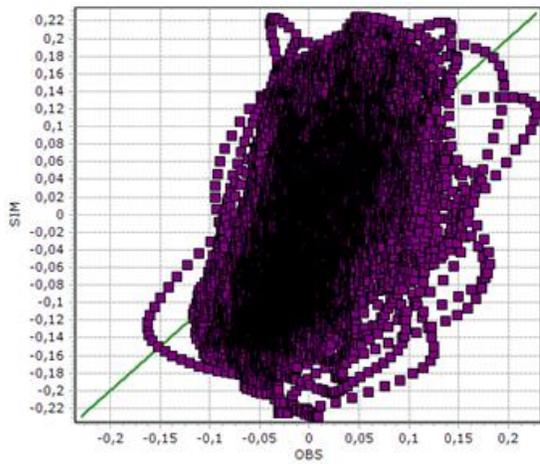
	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0012	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0288	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0360	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0360	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,1269	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,6758	[-]
	Index of Agreement	0,6179	[-]

U-Este Quitralco 2m

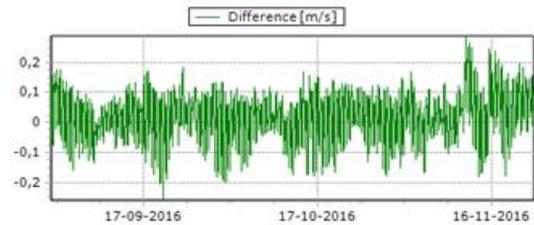
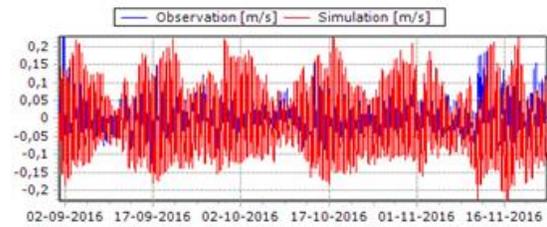


U-Este Quitralco 15m

Scatter Plot



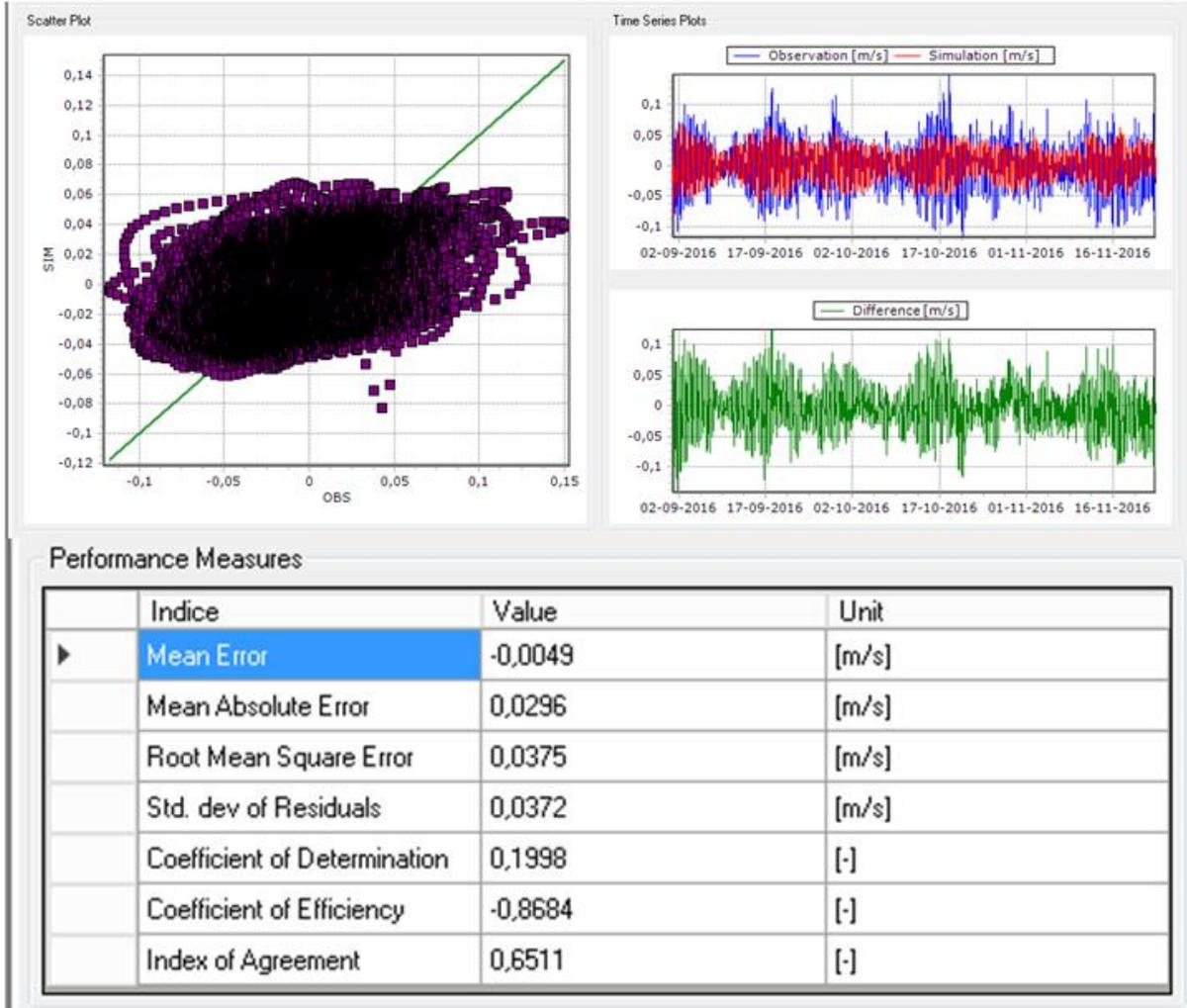
Time Series Plots



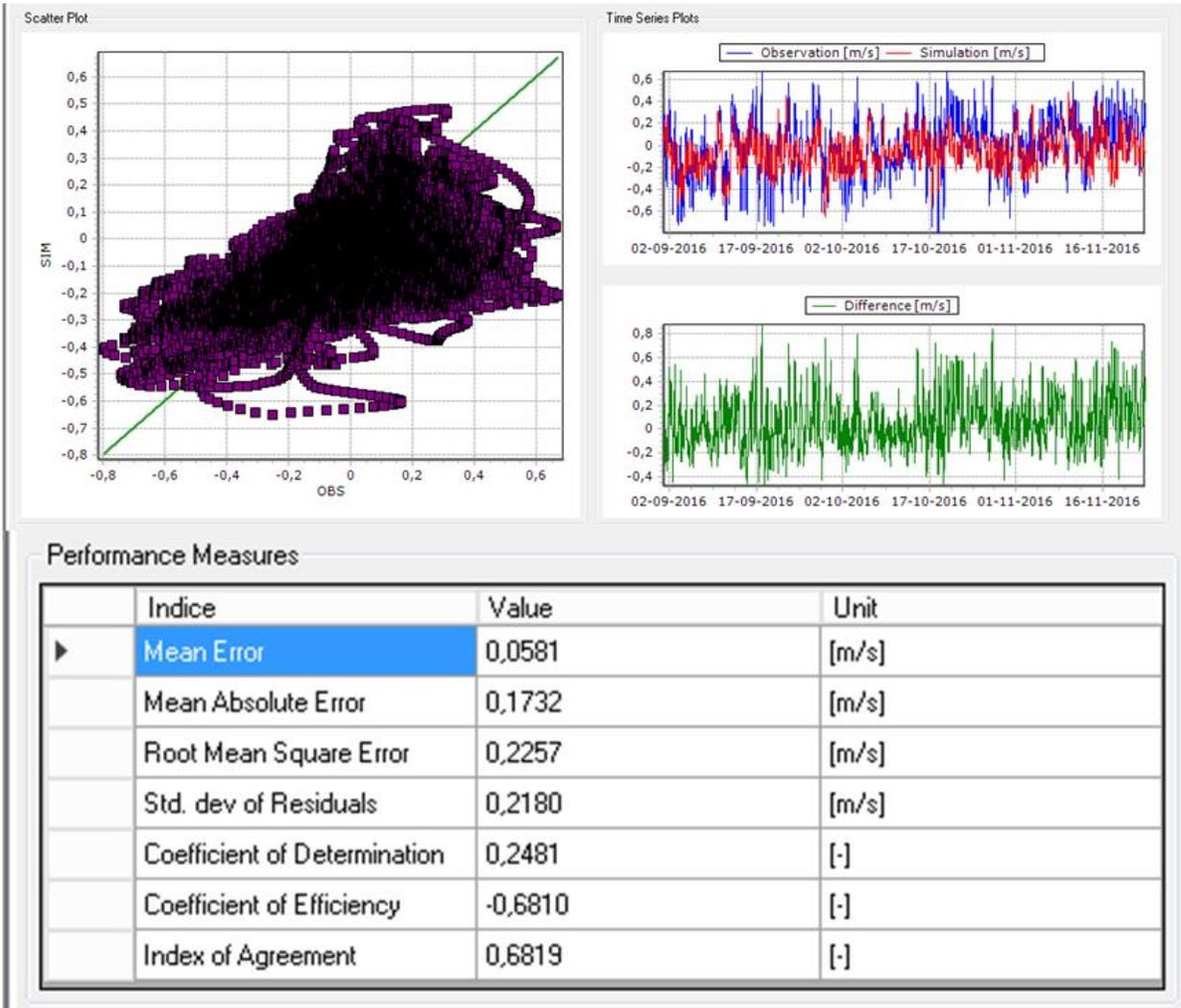
Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0199	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0667	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0811	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0786	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,2803	[-]
	Coefficient of Efficiency	0,2343	[-]
	Index of Agreement	0,6391	[-]

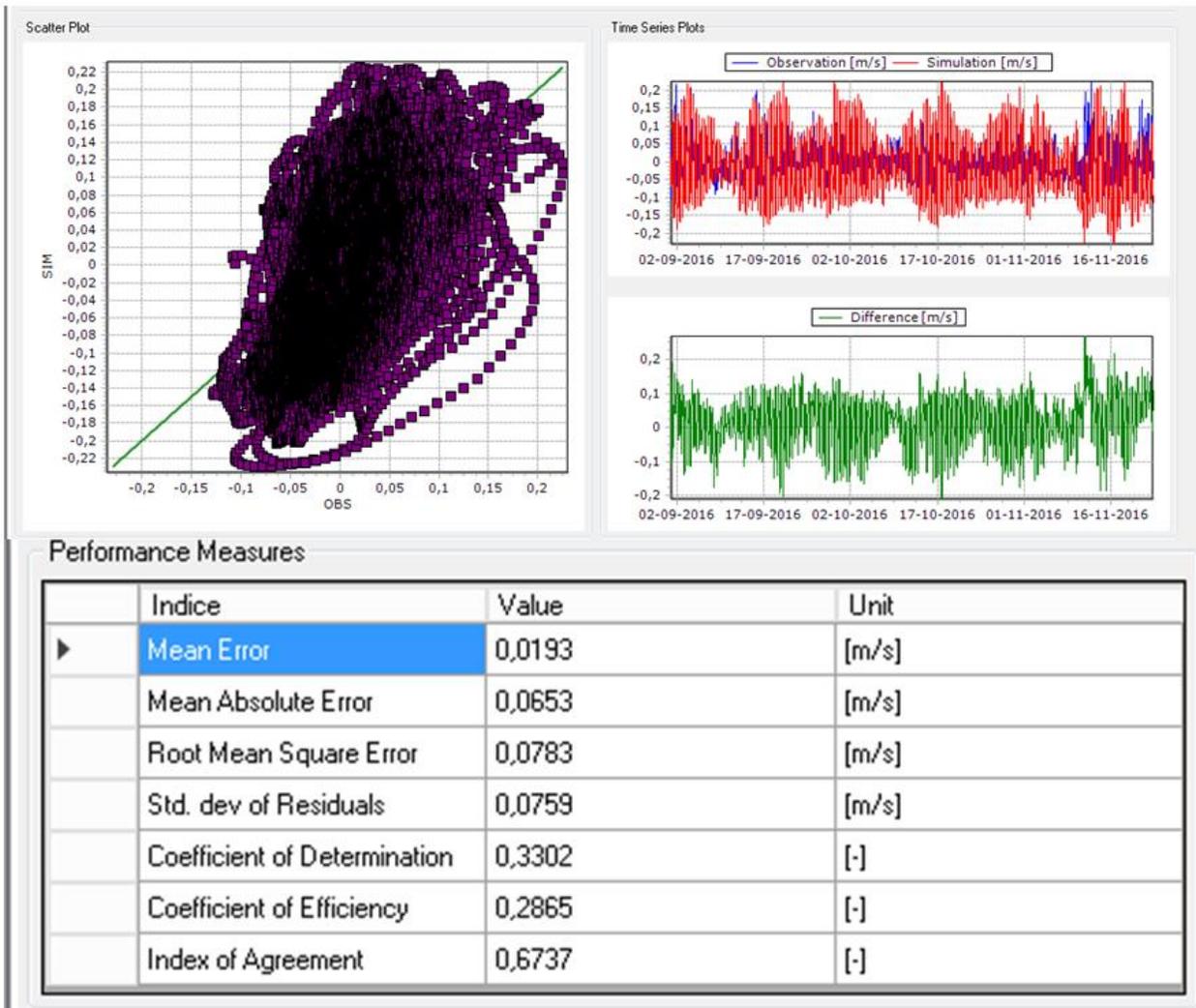
U-Este Quitralco 70m



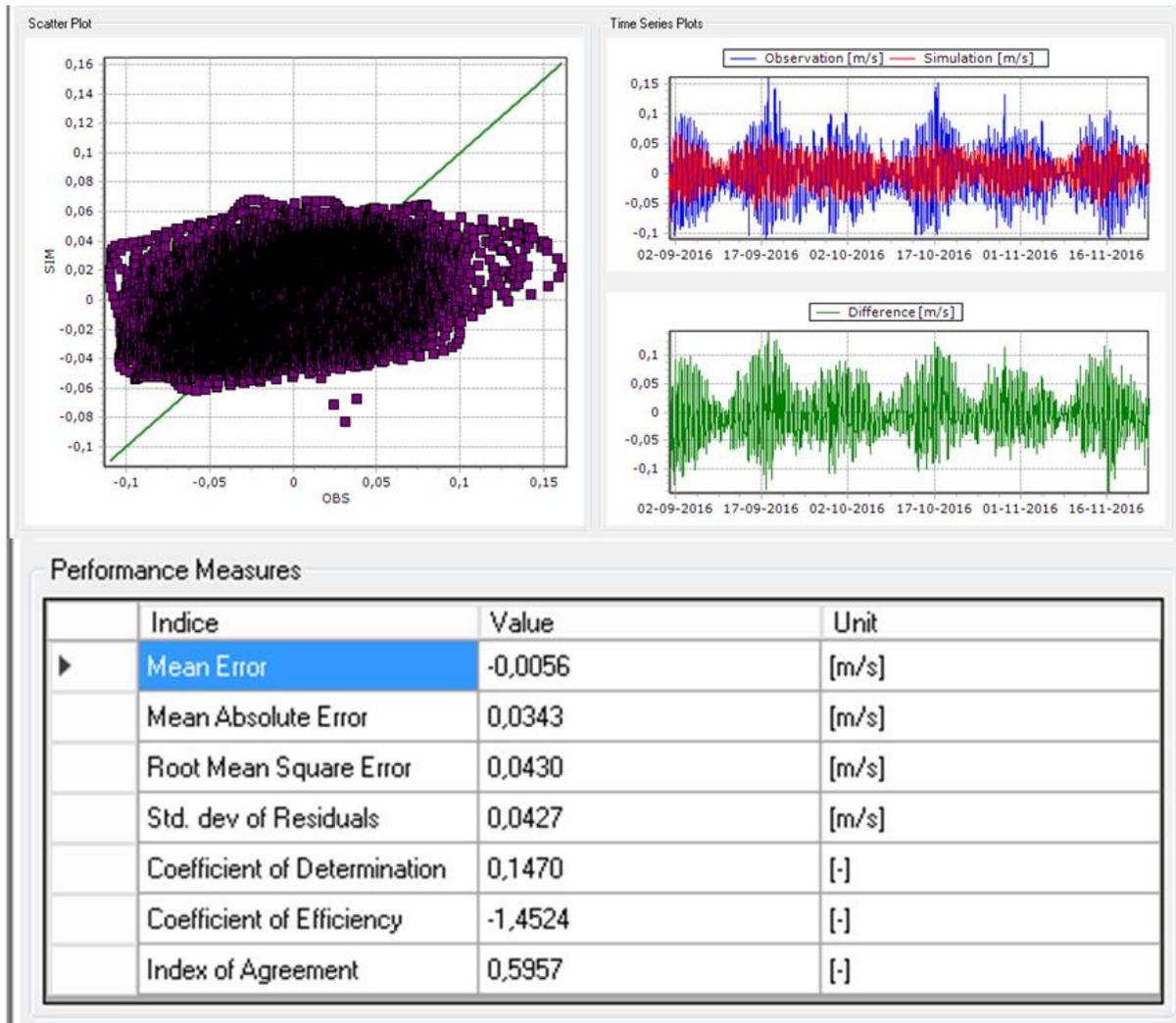
V-Norte Quitralco 2m



V-Norte Quitralco 15m

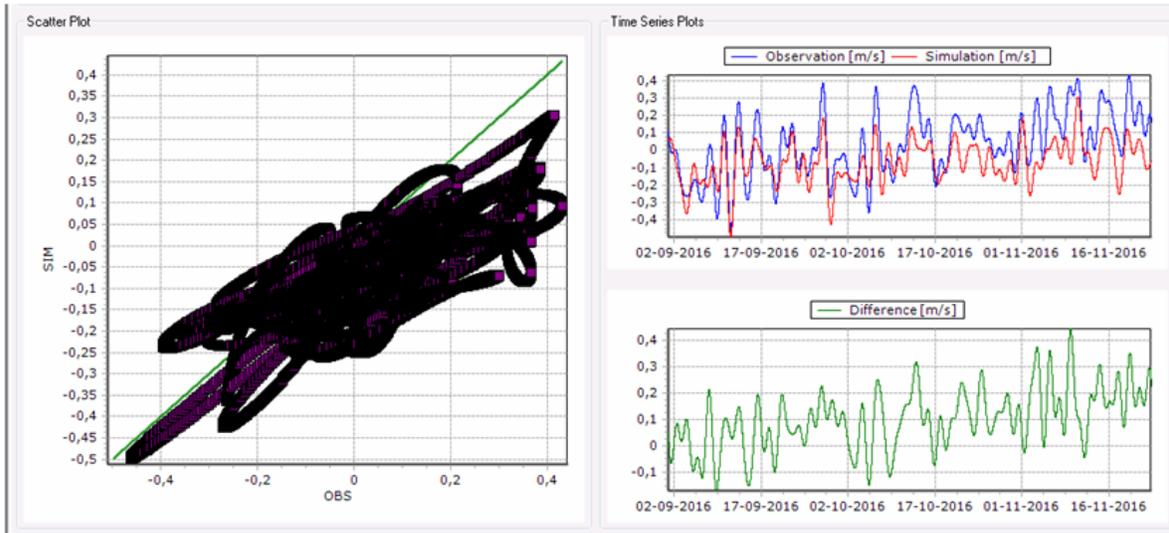


V-Norte Quitralco 70m



2. Escala temporal sub-mareal

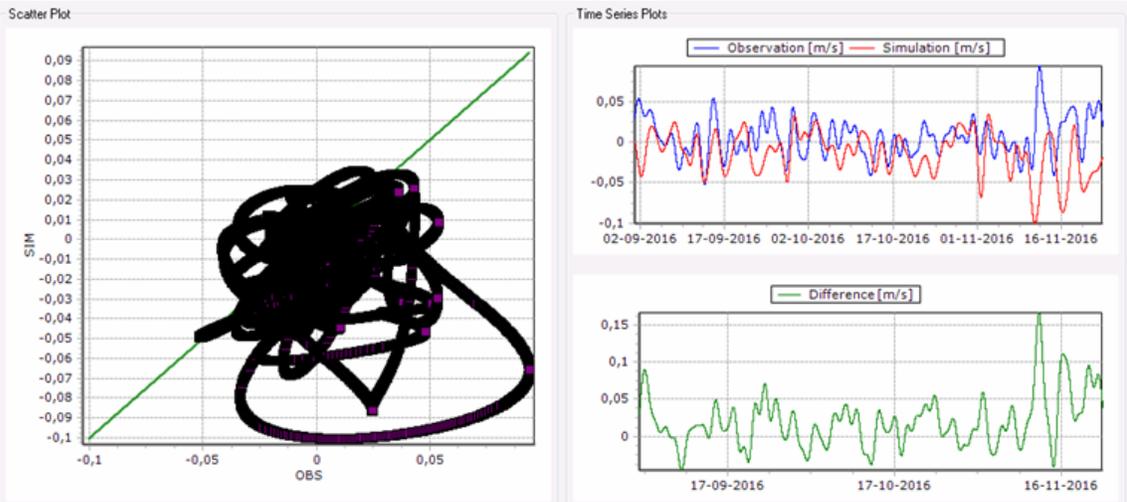
U-Este Quitralco 2m Residual



Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,1005	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,1250	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,1510	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1127	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,6298	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,5688	[-]
	Index of Agreement	0,7738	[-]

U-Este Quitralco 15m Residual



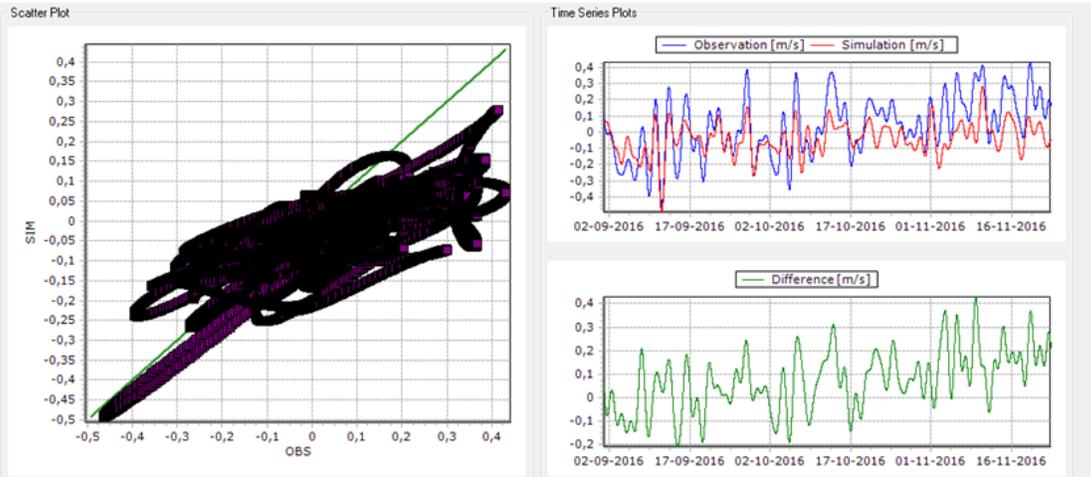
Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0198	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0291	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0397	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0344	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,0013	[-]
	Coefficient of Efficiency	-1,3844	[-]
	Index of Agreement	0,4202	[-]

U-Este Quitralco 70m Residual



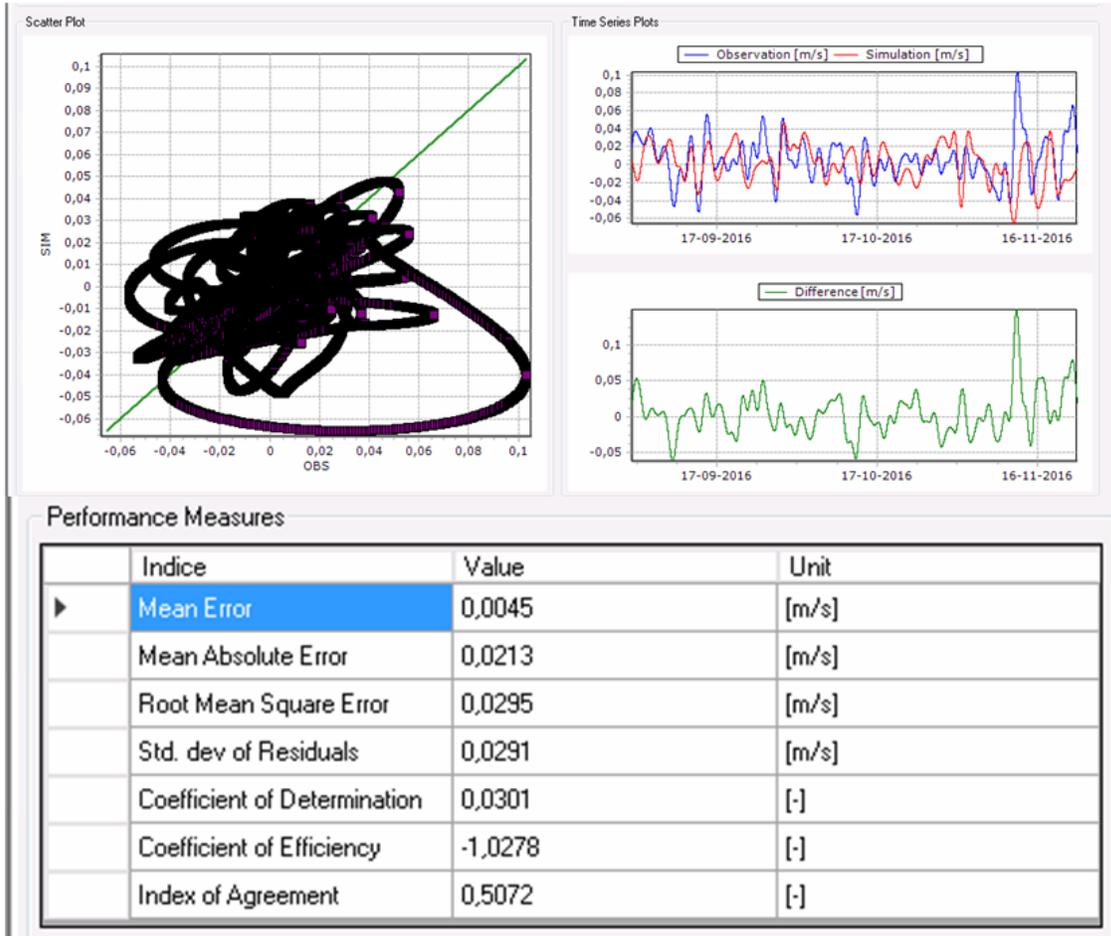
V-Norte Quitralco 2m Residual



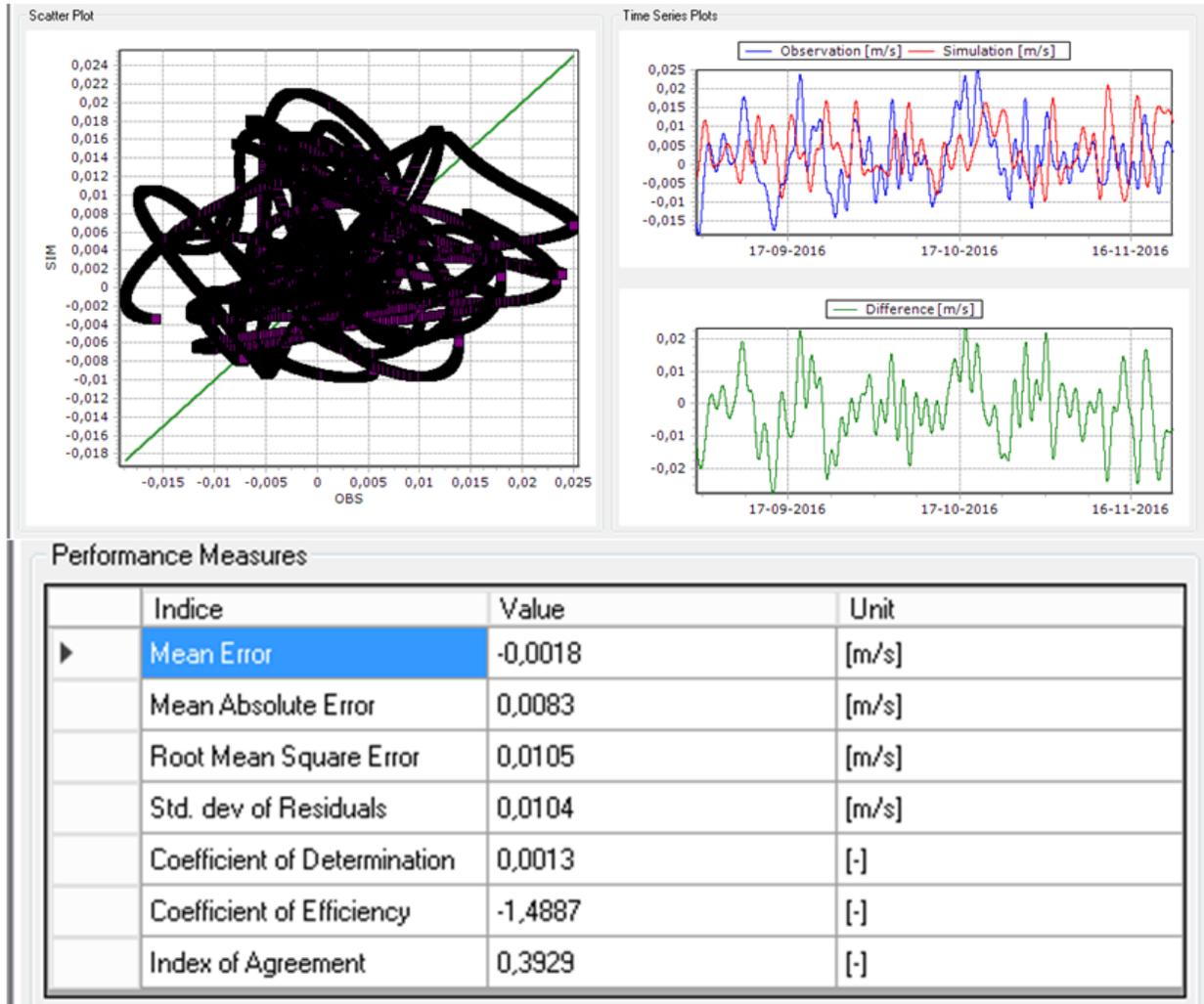
Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0734	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,1189	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,1460	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1262	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,5536	[-]
	Coefficient of Efficiency	-1,1431	[-]
	Index of Agreement	0,7409	[-]

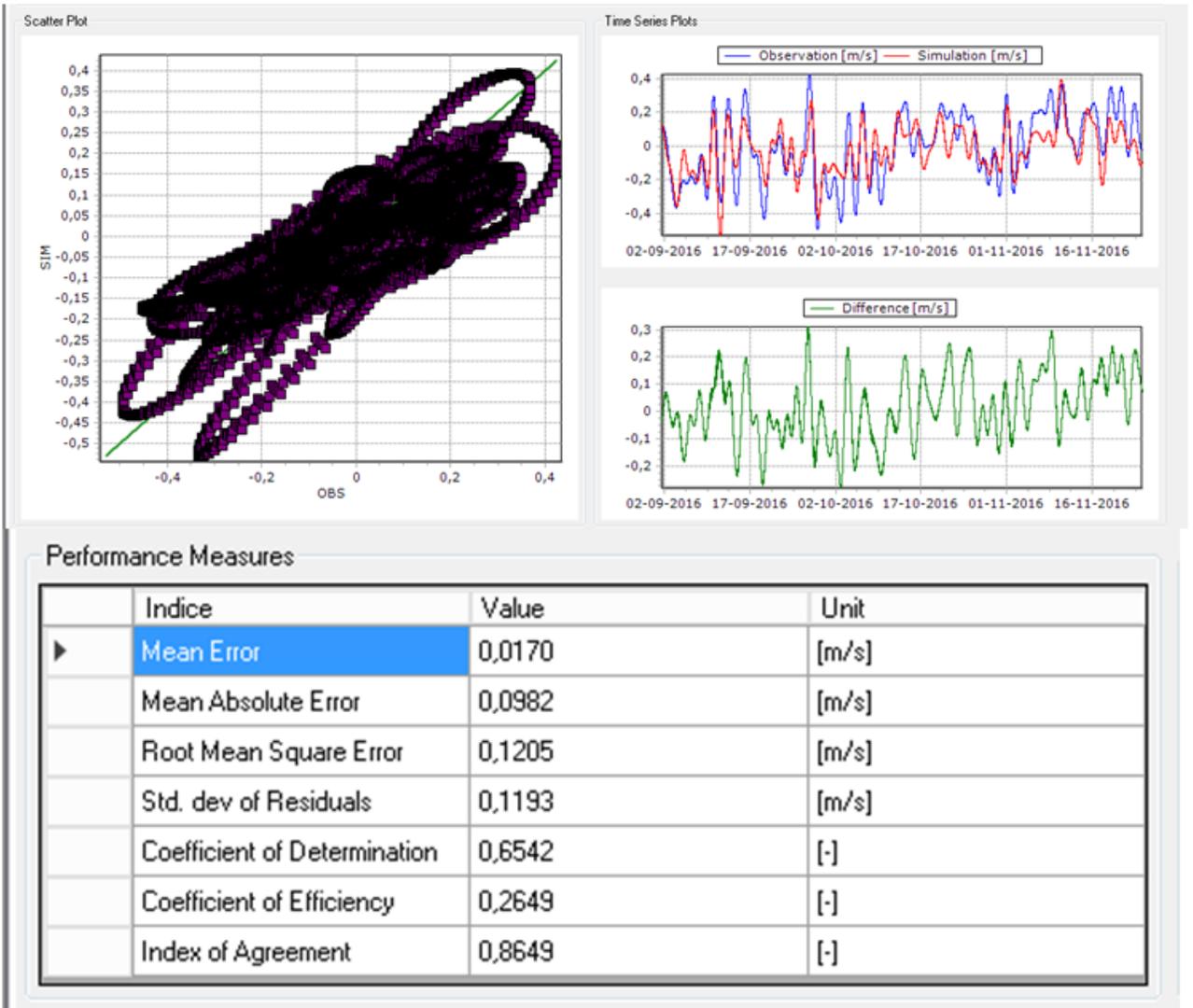
V-Norte Quitralco 15m Residual



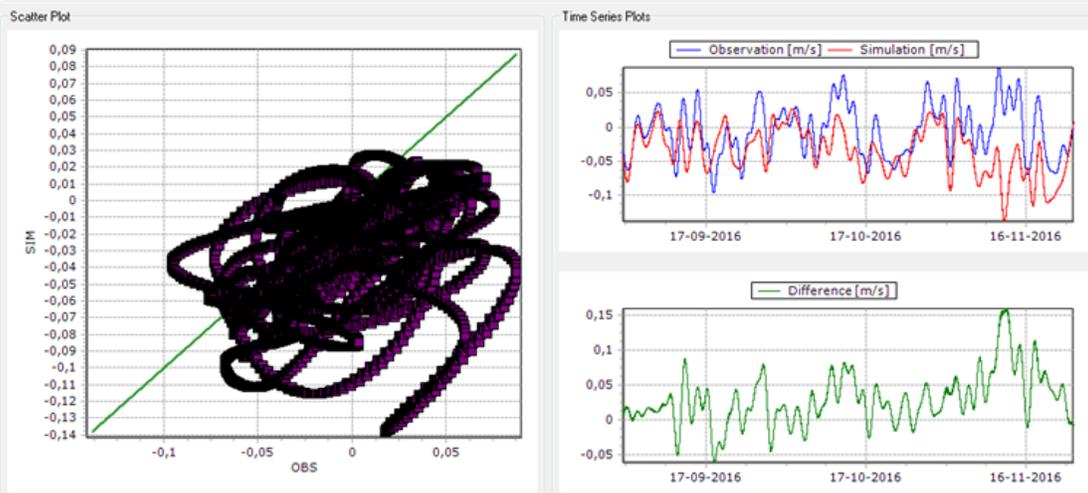
V-Norte Quitralco 70m Residual



U-Este Cupquelan 2m Residual



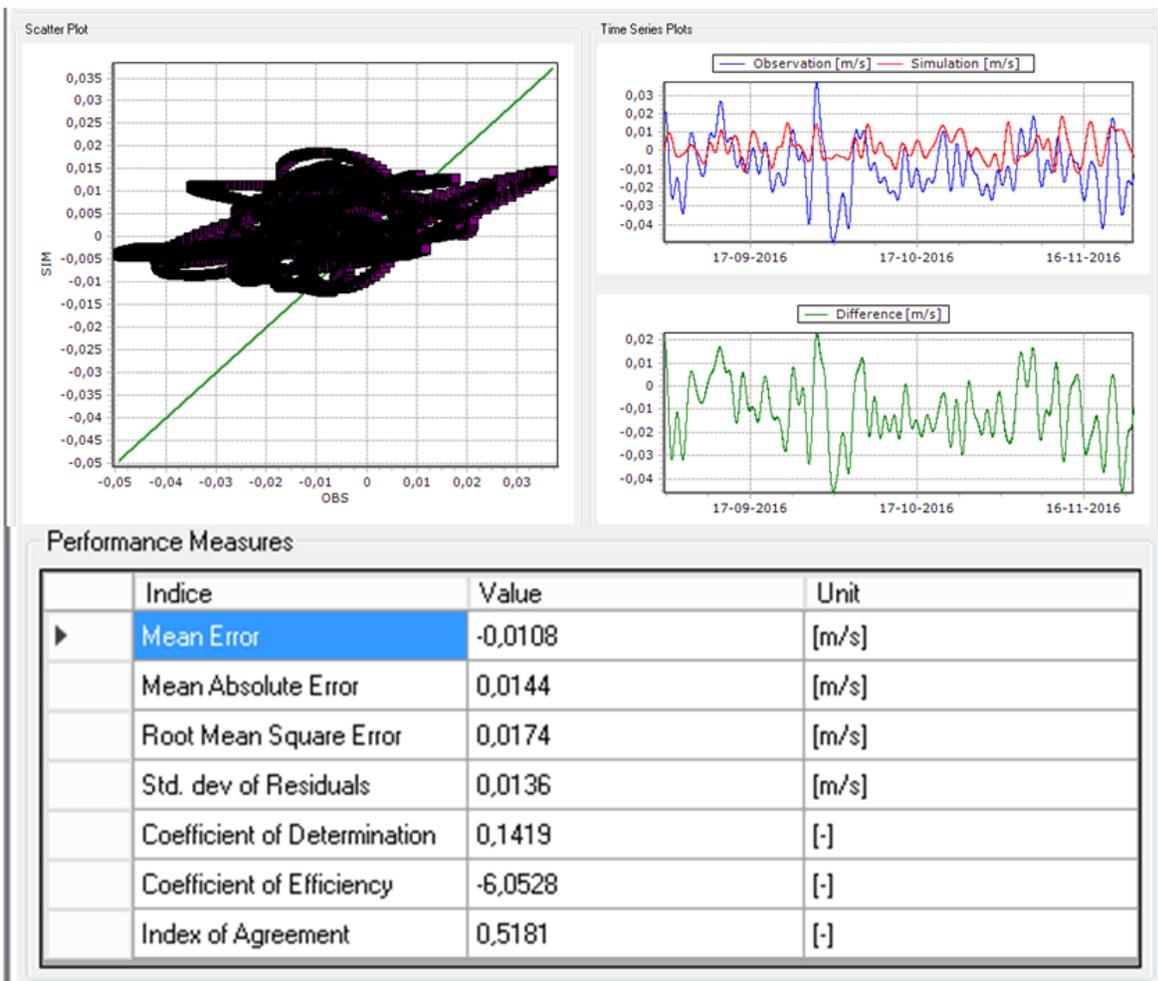
U-Este Cupquellan 15m Residual



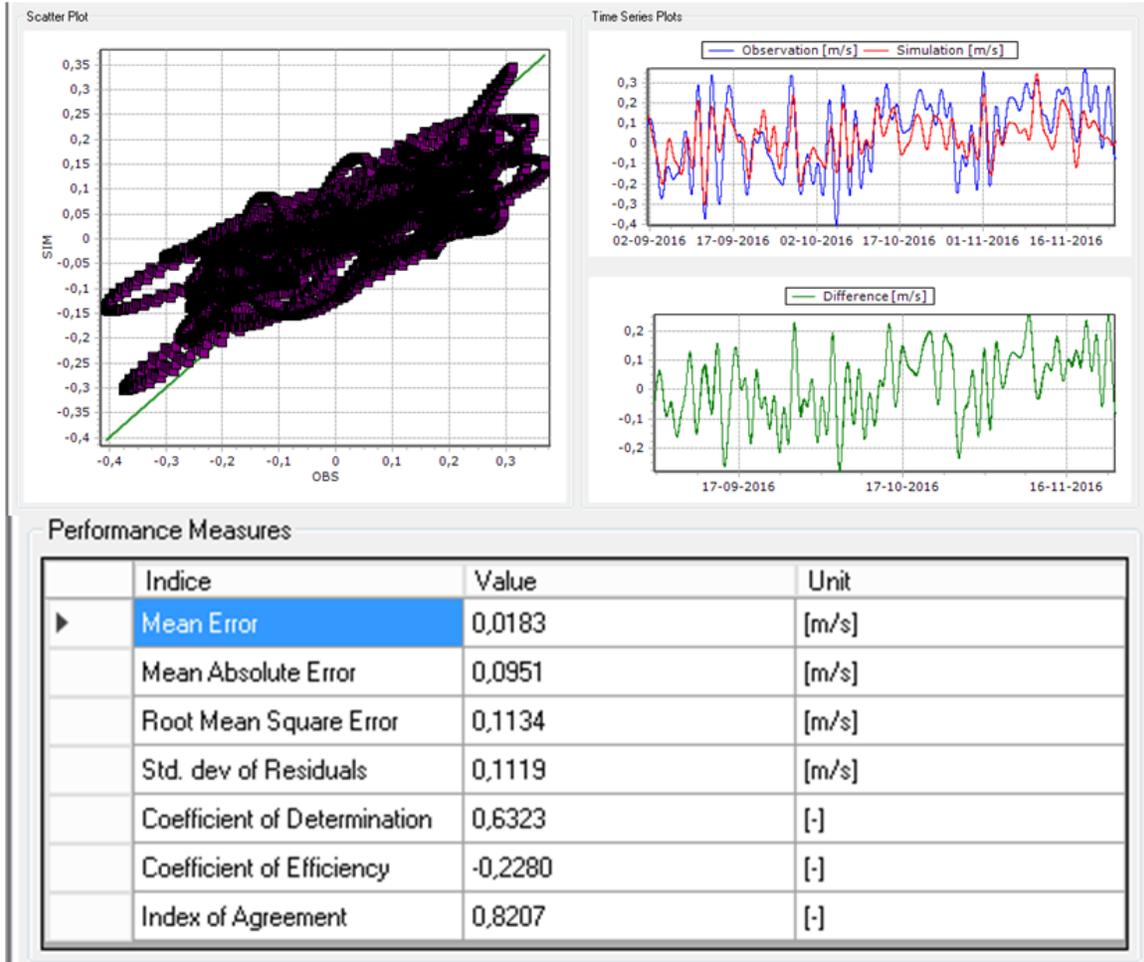
Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0290	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0361	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0474	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0375	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,2256	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,8591	[-]
	Index of Agreement	0,6256	[-]

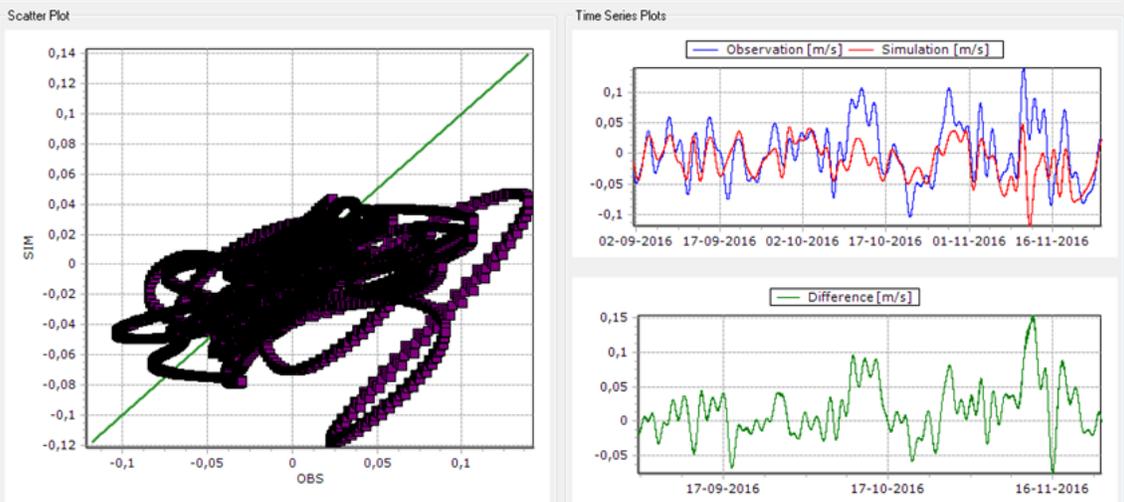
U-Este Cupquelan 70m Residual



V-Norte Cupquelan 2m Residual



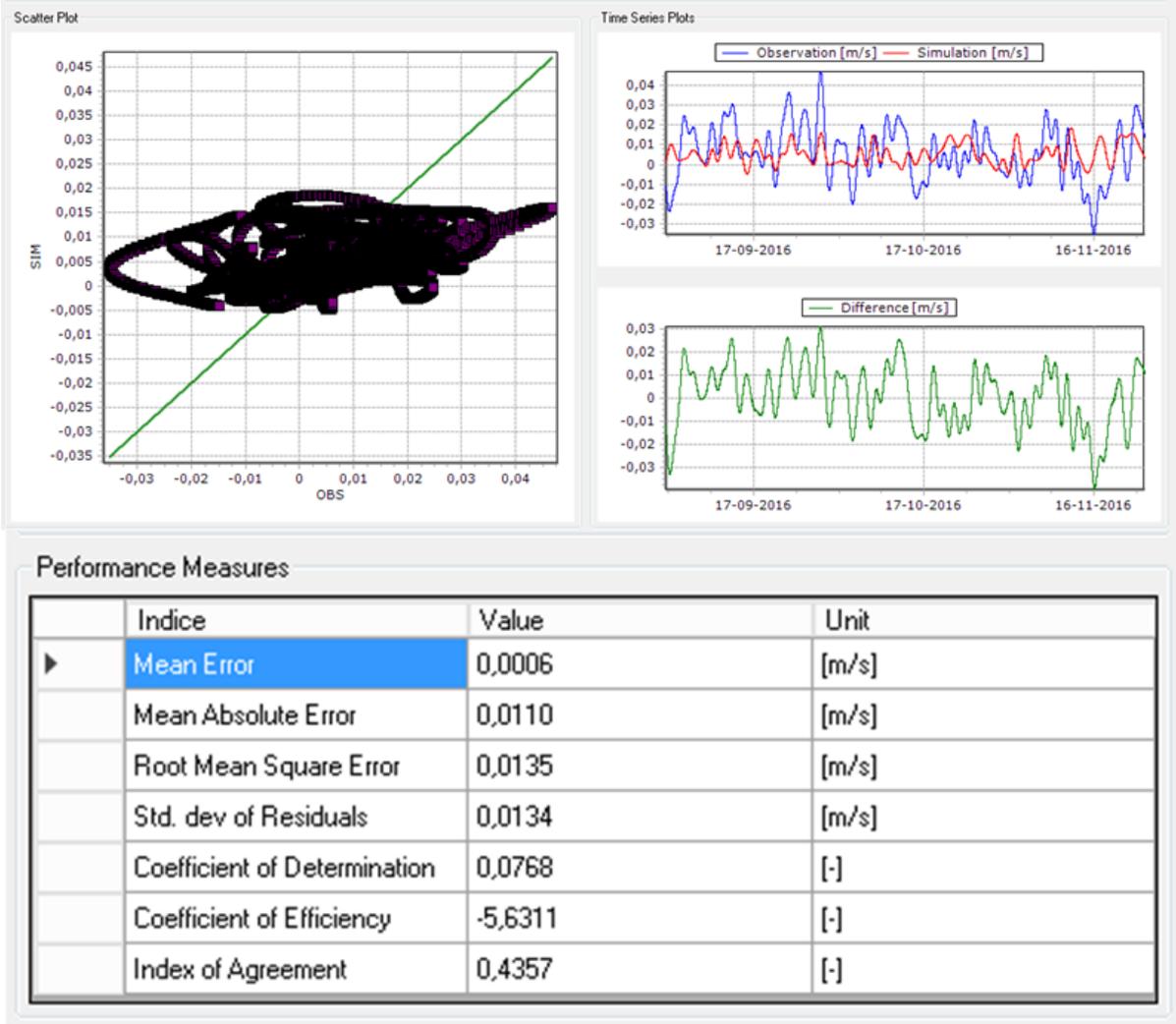
V-Norte Cupquelan 15m Residual



Performance Measures

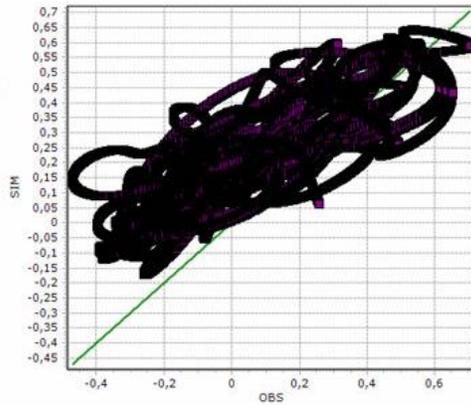
	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	0,0158	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,0303	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,0415	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,0384	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,3088	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,8767	[-]
	Index of Agreement	0,6864	[-]

V-Norte Cupquelan 70m Residual

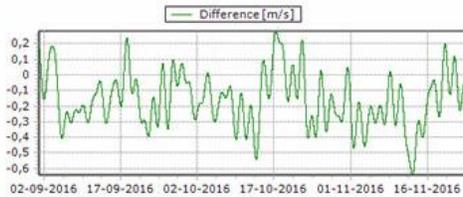
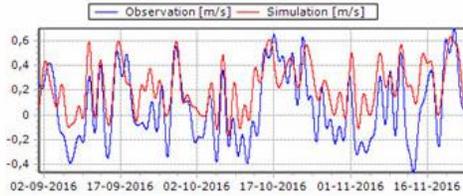


V-Norte Elefantos 2m Residual

Scatter Plot



Time Series Plots



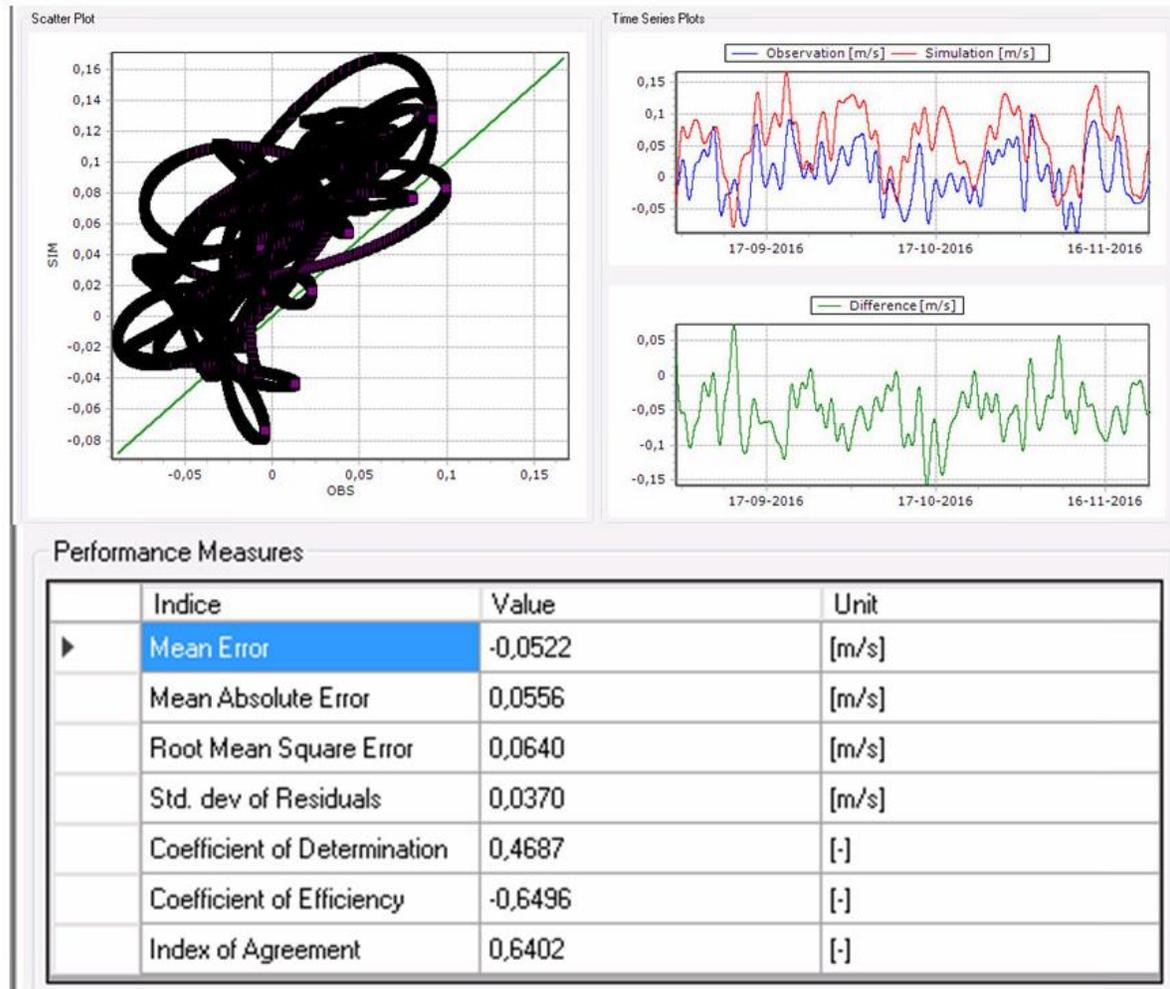
Performance Measures

	Indice	Value	Unit
▶	Mean Error	-0,1613	[m/s]
	Mean Absolute Error	0,1980	[m/s]
	Root Mean Square Error	0,2356	[m/s]
	Std. dev of Residuals	0,1718	[m/s]
	Coefficient of Determination	0,6345	[-]
	Coefficient of Efficiency	-0,5187	[-]
	Index of Agreement	0,7774	[-]

V-Norte Elefantos 15m Residual



V-Norte Elefantes 70m Residual



Referencias

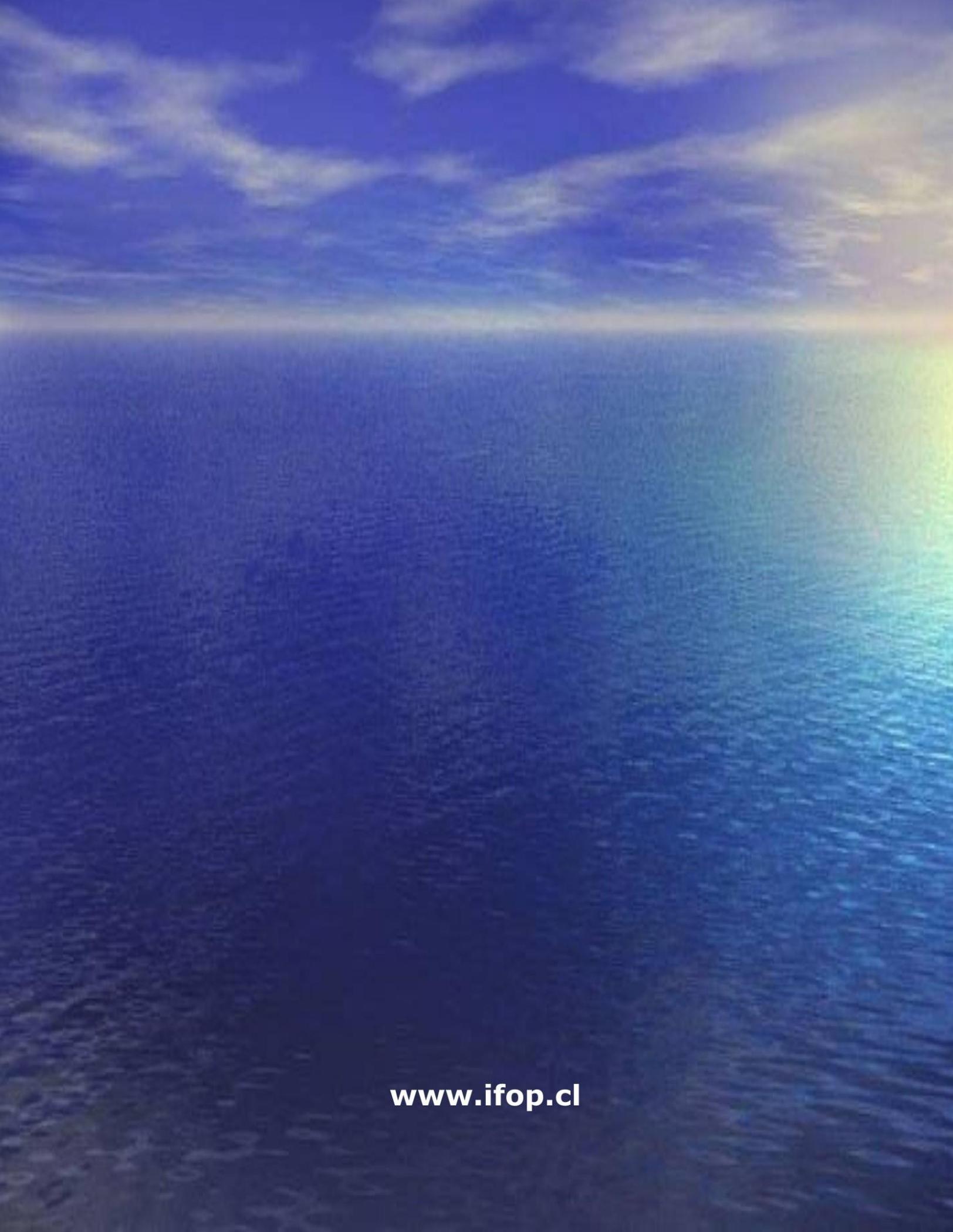
- Legates, D.R., McCabe, G.J., (1999), Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation, *Water Resour. Res.*, 35(1), 233-241
- Nash, J.E., Sutcliffe, J., (1970), River flow forecasting through conceptual models, Part I A discussions of principles, *J. Hydrol.*, 10, 282-290.

Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J, Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M., (1985), Statistics for the evaluation and comparison of models, J. Geophys. Res., 90, 8995-9005.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO
Sección Ediciones y Producción

Almte. Manuel Blanco Encalada 839
Fono 56-32-2151500
Valparaíso, Chile
www.ifop.cl



www.ifop.cl