

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas
Departamento de Oceanografía

INFORME FINAL

**PROYECTO DEL FONDO DE INVESTIGACIÓN PESQUERA Y DE
ACUICULTURA**

FIPA N° 2015-07

**DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA NATURAL DE AGUAS DE BAJO
CONTENIDO DE OXÍGENO DISUELTAS, EN ZONAS UTILIZADAS PARA EL
CULTIVO DE SALMONES. ZONA NORPATAGÓNICA CHILENA**

**Iván Pérez-Santos, Nicolas Mayorga, Nelson Silva, Manuel Castillo, Paulina Montero,
Wolfgang Schneider, Oscar Pizarro, Nadín Ramírez, Gabriela Igor, Giovanni Daneri,
Arnoldo Valle-Levinson, Eduardo Navarro y Adolfo Mesa.**

Junio, 2017

Concepción



Programa COPAS Sur-Austral
<http://www.sur-austral.udec.cl>

INFORME FINAL

Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción

PARTICIPANTES Y FUNCIONES

	Personal profesional	Filiación	Título profesional	Función
1	Iván Pérez Santos	Universidad de Concepción	Doctor en Oceanografía	Jefe del proyecto, coordinación y participación en terreno, análisis de datos y confección de informes
2	Wolfgang Schneider	Universidad de Concepción	Doctor en Oceanografía	Coordinador científico. Diseño y control del muestreo hidrográfico, equipos CTD.
3	Oscar Pizarro	Universidad de Concepción	Doctor en Oceanografía	Diseño de anclajes y análisis de datos de corrientes
4	Giovanni Daneri	Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia	Doctor en Oceanografía	Bases de datos salmonicultura y nutrientes.
5	Manuel Castillo	Universidad de Valparaíso	Doctor en Oceanografía	Análisis de datos de corrientes y marea de los anclajes.
6	Nelson Silva	Pontificia Universidad Católica de Valparaíso	Magister en Oceanografía	Análisis de laboratorio, masas de agua y de datos de ODy nutriente.
7	Paulina Montero	Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia	Magister en Oceanografía	Bases de datos salmonicultura, análisis de laboratorio y de nutrientes
8	Arnoldo Valle-Levinson	Universidad de Florida	Doctor en Oceanografía	Análisis de la circulación estuarina y conexión entre procesos.
9	Eduardo Navarro	Universidad de Concepción	Biólogo Marino	Coordinación campañas, muestreo y análisis de datos oceanográficos.
10	Nicolas mayorga	Universidad del Bio Bio	Licenciado en Ciencias Físicas	Muestreo y análisis de datos oceanográficos.
11	Nadín Ramírez	Universidad de Concepción	Oceanógrafo	Muestreo y análisis de datos oceanográficos.
12	Gabriela Igor	Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia	Técnico en Salmonicultura	Muestreo y análisis de laboratorio de oxígeno por Winkler.
13	Adolfo Mesa	Liceo Puerto Cisnes	Biólogo Marino	Mantenimiento y salva de datos de la boya Puyuhuapi.

• Concepción, junio de 2017 •

RESUMEN EJECUTIVO

En los meses de febrero a noviembre del 2016 se realizó la colecta de datos del proyecto FIPA 2015-07 “*Determinación de la presencia natural de aguas de bajo contenido de oxígeno disuelto, en zonas utilizadas para el cultivo de salmónes. Zona norpatagónica Chilena*”. El objetivo general del proyecto fue: Determinar la variabilidad espacio temporal de las aguas de bajo contenido de oxígeno disuelto (OD) en la zona norpatagónica y su posible asociación con eventos de mortalidad por carencia de OD en centros de cultivo de peces. Para dar cumplimiento a este objetivo se seleccionaron dos zonas de estudio, la primera en el suroeste del golfo de Corcovado (cercañas a Melinka) y la segunda en el fiordo Puyuhuapi. En cada una de las regiones se realizaron mediciones físicas de la columna de agua usando un equipo CTD con sensores de OD, en tres repeticiones por campañas. Además, se colectó agua con botellas Niskin a profundidades estándares para el análisis del OD con el método de Winkler, nutrientes y salinidad. Los registros de OD y salinidad se usaron para validar el funcionamiento del CTD. Paralelo a este trabajo en la zona de Melinka se realizó una transecta estacional desde el punto de muestreo hacia la costa con el objetivo de determinar el posible desplazamiento vertical de la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS) hacia la superficie. En el fiordo Puyuhuapi, se realizó igualmente una transecta a lo largo del fiordo de sur a norte durante el otoño para estudiar la distribución vertical y horizontal de la zona de hipoxia (OD menor a 2 mL/L) y el posible impacto en las jaulas de salmónes. En total se realizaron 7 campañas oceanográficas, 4 en la zona de Melinka (enero, abril, agosto y noviembre del 2016) y 3 en Puyuhuapi (febrero, junio y noviembre del 2016). Durante las campañas de mediciones con CTDO se realizó la recuperación periódica de los datos y la mantención de los equipos.

Otro de los trabajos de gran importancia para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, fue la instalación de 3 anclajes oceanográficos distribuidos, uno en la zona de Melinka y dos en Puyuhuapi en su sector sur y norte. En cada anclaje se ubicaron perfiladores acústicos del tipo ADCP de 300 kHz que registraron el comportamiento de las corrientes marinas desde la sub-superficie hasta el fondo. También, se adicionaron registradores autónomos de temperatura, salinidad, OD y clorofila-a a diferentes niveles (1 m, 5 m y 30 m de la superficie y a 10 m del fondo) que permitieron registrar el comportamiento temporal de las masas de aguas y detectar eventos de baja de OD. En cada sector cerca de los anclajes se ubicaron sensores de presión para estudiar el régimen de mareas y en cada región se instaló una estación meteorológica HOBO U30. En general se obtuvo más del 70% de los datos previstos a colectar. No se pudo completar la obtención del 100% de los datos debido a que se presentaron fallas de funcionamiento en los MicroCAT instalados en el fondo y a un error en la programación de los MiniDOT que limitó la captura de datos en el anclaje norte de Puyuhuapi. Se reportó la pérdida total de un ADCP de 600 kHz instalado en la parte superior del anclaje de Melinka, para medir las corrientes superficiales, debido a fallas en la hermeticidad del equipo (la entrada de agua inundó el equipo). Por otro lado, la parte superior del anclaje de Melinka desapareció desde agosto 2016 sin resultados hasta la fecha. En esa línea se encontraba una sonda multiparámetro YSI 6600, dos MiniDOT, dos sensores de conductividad HOBO U24, dos sensores de turbidez del agua OBS y dos boyas de vidrio de profundidad. Además, en un envío de los frascos de salinidad hacia el laboratorio sufrimos la pérdida de varias muestras por mala manipulación.

Todos los objetivos específicos del proyecto fueron logrados, respondiéndose a la

problemática planteada en la motivación de esta propuesta. El análisis de los datos colectados permitió establecer que el proceso de la hipoxia en aguas profundas de esta zona de la Patagonia no es permanente durante todo el año. En la zona suroeste del golfo de Corcovado (Melinka) el OD profundo tuvo un ciclo anual, con valores dentro de la hipoxia durante el verano y parte del otoño, pero a partir de mayo el OD se incremento hasta septiembre para después disminuir de nuevo en la primavera. Este resultado representa una nueva contribución a las ciencias marinas Chilena, debido a la importancia que tiene esta región en el intercambio de aguas del océano con el sistema de fiordos y canales. Un evento de aumento de OD fue registrado también en las aguas intermedias del fiordo Puyuhuapi, demostrando la conexión entre estas zonas antes mencionadas. La ventilación natural profunda de los fiordos estaría evitando que se generen zonas de anoxias (zonas muertas) por la degradación de materia orgánica tanto alóctona como autóctona que reciben. Las masas de aguas involucradas en el proceso de la hipoxia y la ventilación fueron la AESS y el Agua Subantártica (ASAA). Sin embargo, el AESS también registro valores por encima de la hipoxia.

Durante el periodo de mediciones se detectaron dos eventos de baja de OD en la capa superior (< 50 m), ambos en la estación de verano y principio del otoño (marzo-abril). El primero fue de corta duración, unos 15 días, y se reportó en la posición del anclaje de Melinka. El evento ocurrió a los ~7 m y se relacionó con el florecimiento de algas de este verano 2016. Entre las principales causas que dieron su origen estuvo el comportamiento del viento favorable a la surgencia costera en el exterior de la isla Chiloé, así como un bombeo de Ekman intenso que pudo inyectar nutrientes hacia la superficie y activar un florecimiento en aguas cercanas al anclaje, que hizo descender el OD a niveles de 1-2 mL/L. El segundo evento se detecto en aguas sub-superficiales (~30 m) al sur del fiordo Puyuhuapi de marzo a principios de abril. El análisis de este evento permitió conocer que la concentraciones de OD disminuyeron su concentración hasta niveles letales para la vida de los peces (2.8 mL/L, ó 4 mg/L) después de la ocurrencia de un florecimiento de algas en el fiordo Puyuhuapi. El florecimiento fue detectado por la boya oceanográfica instalada en este lugar. Sin embargo, no fue posible hacer una asociación con mortalidades de salmón en balsas de cultivo, debido a que este barrio estaba finalizando su ciclo productivo y entró en descanso sanitario de abril a junio 2016. Los registros temporales de OD y los obtenidos con CTD en las diferentes estaciones del año 2016 en ambos lugares (Melinka y Puyuhuapi), descartan la posibilidad de que los eventos de baja de OD hayan sido producido por el ascenso de las aguas con bajo OD desde la capa hipoxica profunda, ubicada por debajo de los 100 metros. Por otro lado se confirma, que la masa de agua AESS no tuvo relación con el origen de esta bajas de OD, pues la capa de agua sub superficial donde ocurrieron las bajas de OD, estuvo dominada por la presencia de las Aguas estuarinas saladas.

Teniendo en cuenta los resultados de este proyecto creemos necesario la elaboración urgente de un protocolo de muestreo que al menos se realice por barrios, donde se incluya la realización de perfiles semanales de la temperatura, salinidad, clorofila-a y oxígeno disuelto desde la superficie hasta ~50 metros de profundidad con la finalidad de confirmar que la presencia de la baja de OD es un evento natural externo, de modo que permita activar un sistema de alerta temprana y así reducir mortalidades y daño ambiental colateral. Por otro lado, se hace necesario la creación de un sistema de medición continuo del OD en los primeros 50 metros de la columna de agua con sensores cada 10

metros que permitirán conocer con precisión la posición y desarrollo de un evento de baja de OD. Estos registros podrán estar en línea para la toma de decisiones y ejecución correcta de los planes de mitigación.

INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN EJECUTIVO	3-5
Objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos	20
SOBREOFERTAS	20
1. INTRODUCCION	21
2. ANTECEDENTES	21
2.1 Análisis de la información histórica de perfiles de CTD en la zona colectada durante diferentes cruceros. Identificación y cuantificación de las masas de agua (SOBREOFERTA 1)	21-25
2.2. Análisis de la información histórica del agua superficial obtenidos con la boya y estaciones meteo-oceánicas (SOBREOFERTA 4).	26-29
2.3. Análisis de la información histórica de las condiciones atmosféricas locales obtenidas de la boya y estaciones meteo-oceánicas (SOBREOFERTA 5).	29-32
2.4. Revisión bibliográfica de antecedentes oceanográficos relacionados con la baja de oxígeno disuelto en fiordos.	33
2.4.1. Disminución de los niveles de oxígeno disuelto en fiordos.	33-34
2.4.2. Fitoplancton y producción de materia orgánica.	34
2.4.3 Estratificación de la columna de agua.	35
2.4.4. Características topográficas y masas de aguas oceánicas.	35-36
2.4.5. Materia orgánica alóctona.	36-37
2.4.6 Eutrofización.	37-39
2.4.7. Cambio climático.	39
3. DATOS Y METODOLOGÍAS	40
3.1. Campañas de mediciones.	40-41
3.2. Datos recolectados.	41-42
3.3. Mediciones hidrográficas.	42
3.4. Determinación del oxígeno disuelto y salinidad.	43
3.5. Análisis de los nutrientes.	43
3.6. Anclaje de estaciones oceanográficas.	44
3.6.1. Melinka.	44-46
3.6.2. Fiordo Puyuhuapi.	47-49
3.7. Mediciones de marea.	50
3.8. Mediciones meteorológicas.	50
3.9. Análisis de datos de corriente marinas de ADCP.	51-52
3.10. Información de mortalidad de SERNAPESCA y otras fuentes.	52-53
4. RESULTADOS	54
4.1. Características hidrográficas obtenidas en las cercanías de Melinka.	54-59
4.2. Características hidrográficas obtenidas en el fiordo Puyuhuapi.	60-64
4.3. Comportamiento de los nutrientes.	64-66

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

4.4.	Condiciones meteorológicas.	66-70
4.5.	Régimen de mareas.	71-74
4.6.	Procesamiento y análisis de los datos series de tiempo del anclaje de Melinka.	75
4.6.1.	Serie de tiempo hidrográfica del fondo (MicroCat y MiniDOT).	75
4.6.2.	Serie de tiempo hidrográfica a 30 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).	75-77
4.6.3.	Serie de tiempo hidrográfica a 5 metros (YSI-6600 y HOBO U-26).	77-79
4.7.	Procesamiento y análisis de los datos series de tiempo del anclaje sur Puyuhuapi.	80
4.7.1.	Serie de tiempo hidrográfica a 5 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).	80
4.7.2.	Serie de tiempo hidrográfica a 30 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).	80
4.7.3.	Serie de tiempo hidrográfica del fondo (MicroCat y MiniDOT).	80-83
4.8.	Procesamiento y análisis de los datos series de tiempo del anclaje norte Puyuhuapi.	83
4.8.1.	Serie de tiempo hidrográfica a 1m y 5 metros (Boya, HOBO U-24 y MiniDOT).	83-84
4.8.2.	Serie de tiempo hidrográfica a 30 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).	84
4.8.3.	4.8.3. Serie de tiempo hidrográfica a 94 m y cerca del fondo.	84-88
4.9.	Procesamiento y análisis de los datos de ADCP del anclaje de Melinka.	89-104
4.10.	Procesamiento y análisis de los datos de ADCP del anclaje de sur Puyuhuapi.	105-121
4.11.	Procesamiento y análisis de los datos de ADCP del anclaje de norte Puyuhuapi.	122-149
4.12.	Recopilación de información en SERNAPESCA y salmoneras sobre la mortalidad de peces por baja de oxígeno del 2014 al 2016.	150-153
5.	Análisis y discusión de los resultados	154
5.1.	Variabilidad de la hipoxia/ventilación.	154-159
5.2.	Eventos de baja de OD superficial en Melinka.	159-163
5.3.	Evento de baja de OD sub-superficial en el sur de Puyuhuapi.	164-166
5.4.	Relación entre las corrientes de Melinka y Puyuhuapi.	166-169
6.	CONCLUSIONES	169-171
7.	RECOMENDACIONES	172
8.	REFERENCIAS	172-177
9.	ANEXOS	178-205

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1. (a) Área de estudio seleccionada para la identificación de los cuerpos de agua estuarinos y masas de agua usando (b-c) diagrama temperatura conservativa / salinidad absoluta / profundidad. Se incluye la ubicación de cada masa y cuerpo de agua, con su porcentaje de participación.....22
- Figura 2. (a) Área de estudio seleccionada para establecer la relación entre los cuerpos de agua estuarinas y masas de agua con el oxígeno disuelto. (b-c) Diagrama temperatura conservativa / salinidad absoluta / oxígeno disuelto.....24
- Figura 3. Panel superior. Distribución vertical del oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación en el fiordo Puyuhuapi y canal Jacaf. Panel inferior. Distribución vertical del oxígeno disuelto y el porcentaje de saturación en la zona de Melinka.....25
- Figura 4. Posición de las estaciones oceanográficas fijas y boya oceanográfica.....26
- Figura 5. Panel derecho, serie de tiempo de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y clorofila a 1 m de profundidad (2010 – 2016), registradas en la boya oceanográfica. Panel izquierdo, promedios mensuales con sus desviaciones estándares.....27
- Figura 6. Panel izquierdo. Serie de tiempo de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto obtenida de la estación Bahía Anita (HOBO U30-ETH) desde febrero 2013 hasta enero 2014. La estación se ubicó al sur de canal Puyuhuapi (44° 54.95' Sur y 73° 01,65' Oeste) y los sensores a una profundidad de 3 y 14 m. Panel derecho. Promedios mensuales de cada variable.....28
- Figura 7. Panel izquierdo. Serie de tiempo de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto obtenida de la estación Jacaf-2 (HOBO U30-ETH) desde febrero 2013 hasta enero 2014. La estación se instaló al oeste del canal Jacaf (44° 19.436 Sur y 72° 53.858 Oeste) y los sensores a una profundidad de 3 y 14 m. Panel derecho. Promedios mensuales de cada variable.....29
- Figura 8. Rosas de viento estacional de la boya oceanográfica instalada el fiordo Puyuhuapi (44° 35.286' Sur y 72° 43.625' Oeste) en el periodo abril 2011 a marzo 2013.....30
- Figura 9. Rosa de viento de la estación Bahía Anita instalada en el sur del fiordo Puyuhuapi (44° 54.95' Sur y 73° 01,65' Oeste), durante febrero 2013 a enero 2014.....31
- Figura 10. Rosa de viento de la estación Isla Magdalena (44° 35' 28'' Sur y 72° 44' 13'' Oeste) instalada en el muelle de la isla Magdalena a 900 metros de la boya. Periodo de datos de abril 2014 a febrero 2016.....31
- Figura 11. Parámetros atmosféricos obtenidos de la estación isla Magdalena.....32
- Figura 12. Sistema de anclajes y mediciones realizados durante la ejecución del proyecto. En color rojo se muestran las mediciones adicionales y anclajes de instrumentos que se realizaron como sobreofertas de trabajo.....40

Figura 13. Diseño del anclaje oceanográfico en Melinka.....	45
Figura 14. Fotos que muestran la instalación de la estación meteorológica en Melinka, la maniobra del anclaje oceanográfico y del muestreo in-situ.	46
Figura 15. Diseño del anclaje oceanográfico en el sur del fiordo Puyuhuapi.....	48
Figura 16. Diseño del anclaje oceanográfico en el norte del fiordo Puyuhuapi.....	49
Figura 17. Ubicación geográfica de los centros de cultivo identificados con mortalidad de peces por baja de oxígeno en el área de estudio durante el año 2014, 2015 y 2016.....	53
Figura 18. Zona de muestreo en la región de Melinka. En círculo rojo aparece la posición del anclaje oceanográfico, en azul la transepto de CTD y en verde la estación meteorológica.....	54
Figura 19. Perfiles de la temperatura conservativa, salinidad absoluta, oxígeno disuelto y fluorescencia obtenidos durante las cuatro estaciones del año 2016 en las cercanías de isla de Melinka al oeste del Golfo de Corcovado.....	56
Figura 20. (Panel superior) perfiles de oxígeno disuelto y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 9 de enero 2016 en la campaña Melinka-1.....	57
Figura 21. (Panel izquierdo), transepto hidrográfico realizado desde el punto del anclaje hacia la costa el 10 de enero del 2016 en las cercanías de la isla de Melinka. (Panel derecho) el mismo transepto pero realizado el 11 de abril 2016. El criterio usado para la definición de las masas de agua fue la salinidad (Guzmán y Silva, 2002; Sievers, 2006 y Sievers y Silva 2008), definiéndose el agua Subantártica modificada (ASAAM, salinidad entre 31-33 g/kg), el agua subantártica (ASAA, Salinidades entre 33-33.9 g/kg) y el agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS, salinidades mayores a 33.9).....	58
Figura 22. (Panel izquierdo), transepto hidrográfico realizado desde el punto del anclaje hacia la costa el 2 de agosto del 2016 en las cercanías de la isla de Melinka. (Panel derecho) el mismo transepto pero realizado el 17 de noviembre 2016. El criterio usado para la definición de las masas de agua fue la salinidad (Guzmán y Silva, 2002; Sievers, 2006 y Sievers y Silva 2008), definiéndose el agua Subantártica modificada (ASAAM, salinidad entre 31-33 g/kg), el agua subantártica (ASAA, Salinidades entre 33-33.9 g/kg) y el agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS, salinidades mayores a 33.9).	59
Figura 23. Ubicación de las estaciones oceanográficas en el fiordo Puyuhuapi.....	60
Figura 24. Perfiles de la temperatura conservativa, salinidad absoluta, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y fluorescencia obtenidos durante verano, otoño y primavera del 2016 en la zona sur del fiordo Puyuhuapi.....	61

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Figura 25. Perfiles de la temperatura conservativa, salinidad absoluta, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y fluorescencia obtenidos durante verano, otoño y primavera del 2016 en la zona norte del fiordo Puyuhuapi.....62

Figura 26. Sección hidrográfica realizada de sur a norte en el fiordo Puyuhuapi durante el 16 y 17 de junio del 2016. El criterio usado para la definición de las masas de agua fue la salinidad (Guzmán y Silva, 2002; Sievers, 2006 y Sievers y Silva 2008), definiéndose el agua Subantártica modificada (ASAAM, salinidad entre 31-33 g/kg), el agua subantártica (ASAA, Salinidades entre 33-33.9 g/kg) y el agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS, salinidades mayores a 33.9).....63

Figura 27. Relación entre oxígeno disuelto y la salinidad del agua obtenidos de la sección hidrográfica realizada de sur a norte en el fiordo Puyuhuapi durante el 16 y 17 de junio del 2016.....64

Figura 28. Comportamiento vertical de los nutrientes en Melinka y Puyuhuapi.....66

Figura 29. (a) Temperatura del aire, (b) radiación solar, (c) velocidad del viento y (d) precipitaciones, obtenidas en la estación meteorológica instalada en Melinka (43°53'48.80"S/ 73°44'57.44"O) durante enero-noviembre del 2016.....68

Figura 30. Datos de la estación de Melinka representando la (a) los vectores del viento indicando la velocidad y dirección durante todo el periodo de observaciones (dirección hacia dónde va el viento). (b) Presión atmosférica y (c) rosa de viento. La interpretación de la dirección del viento en la rosa fue de acuerdo a la convención meteorológica (de donde viene el viento).....69

Figura 31. (a) Temperatura del aire, (b) radiación solar, (c) velocidad del viento y (d) precipitaciones, obtenidas en la estación meteorológica instalada en la Isla Magdalena, fiordo Puyuhuapi en el periodo abril 2014-noviembre del 2016.....70

Figura 32. Datos de la estación Isla Magdalena en el fiordo Puyuhuapi representando la (a) la presión atmosférica y (b) la rosa de viento. La interpretación de la dirección del viento en la rosa fue de acuerdo a la convención meteorológica (de donde viene el viento). No se presentó el diagrama de vectores en esta figura pues la gran cantidad de datos impide una buena representación.....71

Figura 33. (a) Serie de nivel del mar obtenido del MicroCat SBE 37 instalado a 10 metros del fondo en el anclaje de Melinka. (b) Serie de nivel del mar de un equipo HOBO U-20 instalado en el borde costero del sector sur del fiordo Puyuhuapi. (c) Serie de nivel del mar de un equipo HOBO U-20 instalado en el muelle de la Isla Magdalena en el sector norte del fiordo Puyuhuapi.....74

Figura 34. (a) Serie de tiempo de la temperatura y (b) salinidad del agua obtenida del MicroCat y (c-d) OD y porcentaje de saturación del MiniDOT. Los datos fueron colectados en el anclaje de Melinka a ~10 metros del fondo en el periodo enero-noviembre 2016...76

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Figura 35. (a) Serie de temperatura y (b) salinidad del agua obtenidas de un equipo HOBO U-24 a 30 m de la superficie del mar en el anclaje de Melinka en el periodo 10/01/2016 al 8/04/2016.77

Figura 36. (a) Serie de presión, (b) temperatura del agua, (c) salinidad del agua y (f) clorofila-a obtenida de la sonda YSI 6600. (d) Porcentaje de saturación del OD y (e) concentración de OD entregados por el sensor HOBO U26, instalados en el anclaje de Melinka durante enero-abril 2016.....78

Figura 37. (a) Serie de presión, (b) concentración de oxígeno disuelto, (c) clorofila-a obtenidas de la sonda YSI 6600 y el sensor HOBO U26, instalados a ~7 metros de la superficie del mar en el anclaje de Melinka durante enero-abril 2016. (d) Muestra un ejemplo del momento de coincidencia entre la presión y el oxígeno disuelto. Las líneas de color rojo en (a), (b) y (c) representan las series filtradas con un coseno de Lanczos de 40 horas que eliminó el efecto de la marea.....79

Figura 38. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) OD y (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~5 m de la superficie del mar en el anclaje sur de Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas de salva de datos mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).....81

Figura 39. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) OD y (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~30 m de la superficie del mar en el anclaje sur de Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).....82

Figura 40. Temperatura, salinidad, OD y porcentaje de saturación obtenido de un MicroCat ubicado en el nivel de fondo en el anclaje sur de Puyuhuapi, durante febrero y noviembre 2016. La barra de colores indica la profundidad de referencia de posición del instrumento en el anclaje.....83

Figura 41. Serie de tiempo de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, saturación de OD y clorofila a 1 m de profundidad, registradas durante el 2016 en la boya oceanográfica instalada en las cercanías del anclaje norte de Puyuhuapi. Los círculos negros en los datos de clorofila-a señalan los momentos en que se realizaron las mantenciones físicas de la boya.....85

Figura 42. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) OD y (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~5 m de la superficie del mar en el anclaje norte de Puyuhuapi

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).....86

Figura 43. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) OD y (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~30 m de la superficie del mar en el anclaje norte de Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).....87

Figura 44. (a) Serie temporal de la temperatura obtenida de un HOBO U-22 a ~94 metros de profundidad. (b-c) Serie de temperatura y salinidad del agua obtenida del MicroCat instalado a ~220 metros de profundidad en el norte del fiordo Puyuhuapi.....88

Figura 45. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 50 m, 60 m, 70 m y 80 m de profundidad en la zona de Melinka.....91

Figura 46. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 90 m, 100 m, 120 m y 130 m de profundidad en la zona de Melinka.....92

Figura 47. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de Melinka entre los 46 y 70 m.....97

Figura 48. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de Melinka entre los 80 y 110 m.....97

Figura 49. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de Melinka entre los 46 y 70 m.....98

Figura 50. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de Melinka entre los 80 y 110 m.....98

Figura 51. Espectros de energía de las componentes U (negro) y V (rojo) de las corrientes de Melinka entre los 46 y 70 m.....99

Figura 52. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de Melinka entre los 80 y 110 m.....100

Figura 53. Diagrama de trazos de las corrientes medidas en Melinka. Las corrientes han sido rotadas de acuerdo al eje del canal.....101

Figura 54. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en Melinka.....102

Figura 55. Importancia de la marea en profundidad.....103

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Figura 56. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en Melinka.....	104
Figura 57. Vector promedio en profundidad en el anclaje de Melinka.....	104
Figura 58. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 80 m, 90 m, 100 m y 110 m de profundidad en la zona sur de Puyuhuapi.....	107
Figura 59. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 120 m, 130 m, 140 m y 150 m de profundidad en la zona sur de Puyuhuapi.....	108
Figura 60. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 80 y 100 m.....	114
Figura 61. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 110 y 140 m.....	114
Figura 62. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 80 y 100 m.....	115
Figura 63. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes la zona sur de Puyuhuapi entre los 110 y 140 m.....	115
Figura 64. Espectros de energía de las componentes U (negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 80 y 100 m.....	116
Figura 65. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 110 y 140 m.....	117
Figura 66. Diagrama de trazos de las corrientes medidas en la zona sur de Puyuhuapi. Las corrientes han sido rotadas de acuerdo al eje del canal.....	118
Figura 67. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona sur de Puyuhuapi.....	119
Figura 68. Importancia de la marea en profundidad al sur de Puyuhuapi.....	120
Figura 69. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona sur de Puyuhuapi.....	121
Figura 70. Vector promedio en profundidad al sur de Puyuhuapi.....	121
Figura 71. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 1 m, 5 m, 10 m y 15 m de profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.....	124
Figura 72. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 20 m y 25 m de	

profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.	125
Figura 73. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 1 y 15 m.....	128
Figura 74: Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.....	128
Figura 75: Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 1 y 15 m.....	129
Figura 76. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes la zona norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.....	129
Figura 77. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 1 y 15 m.....	130
Figura 78: Espectros de energía de las componentes U (negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.....	131
Figura 79: Diagrama de trazos de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.	131
Figura 80. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.....	132
Figura 81. Importancia de la marea en profundidad al norte de Puyuhuapi entre los 1 y 30 m.....	133
Figura 82. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (en el centro) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.....	134
Figura 83. Vector promedio en profundidad entre los 1 y 30 m al norte de Puyuhuapi...	134
Figura 84. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 120 m, 130 m, 140 m y 150 m de profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.....	137
Figura 85. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 160 m, 170 m y 180 m de profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.....	138
Figura 86. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 115 y 150 m.....	142
Figura 87. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 160 y 180 m.....	142

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Figura 88. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 115 y 150 m.....	143
Figura 89. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes la zona norte de Puyuhuapi entre los 160 y 180 m.....	143
Figura 90. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 115 y 150 m.....	144
Figura 91. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 160 y 180 m.....	145
Figura 92. Diagrama de trazos de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.....	146
Figura 93. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.....	147
Figura 94. Importancia de la marea en profundidad en el norte de Puyuhuapi.....	148
Figura 95. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.....	149
Figura 96. Vector promedio en profundidad al norte de Puyuhuapi.....	149
Figura 97. Porcentaje de mortalidad (puntos) y N° de peces (barras) registrados durante el año 2014 en el área de estudio.....	150
Figura 98. Porcentaje de mortalidad (puntos) y N° de peces (barras) registrados durante el año 2015 en los centros de cultivo del área de estudio.....	152
Figura 99. Porcentaje de mortalidad (puntos) y N° de peces (barras) registrados durante el año 2016 en el área de estudio.....	153
Figura 100. (a) Series de OD obtenida con MiniDOT en las aguas profundas del sector de Melinka y el fiordo Puyuhuapi. (b) Regresión lineal entre la serie de Melinka y el anclaje norte en Puyuhuapi.....	155
Figura 101. Análisis de ondeleta realizado a las series de OD ubicadas en los anclajes de (a) Melinka y del sector norte (b) y sur (c) del fiordo Puyuhuapi.....	156
Figura 102. Análisis de ondeleta realizado a las series de (a) presión atmosférica, (b) viento zonal y (c) viento meridional obtenidos de la estación meteorológica instalada en la Isla de Melinka, en el periodo febrero-noviembre 2016.....	157

Figura 103. (a) Componente zonal y (c) meridional de la corriente obtenida del ADCP en el nivel de 120 metros. (b y d) Análisis de ondeleta realizado a la componente zonal y de la corriente en el anclaje de Melinka de febrero a noviembre 2016.....158

Figura 104. (a) Diagrama salinidad vs. OD y porcentaje de saturación obtenidos del MicroCat y MiniDOT ubicados en el nivel de fondo del anclaje de Melinka en el periodo enero-noviembre del 2016 y en (b) en el anclaje sur de Puyuhuapi durante junio-noviembre del 2016.....159

Figura 105. (a) Comportamiento del viento satelital superficial obtenido del producto ASCAT. (b) Esfuerzo del viento (flechas negras), transporte de Ekman (flechas rojas) y bombeo de Ekman (colores) derivados del viento satelital. Ambos resultados se presentan para el 12 de marzo 2016.....161

Figura 106. (a) Esfuerzo del viento, (b) Índice de afloramiento donde los valores negativos son favorables a la surgencia y los positivos a hundimiento. (c) Acumulado del transporte de Ekman, donde igualmente los valores negativos son favorables a la surgencia costera. Registros horarios de la estación meteorológica instalada en Melinka.....162

Figura 107. Imágenes del promedio mensual de la temperatura superficial del mar, obtenidas de Modis-Aqua durante el verano del 2016. Cortesía de Elías Pinilla, IFOP-Castro.....163

Figura 108. (a) Nivel del mar obtenido del puesto de nivel del SHOA instalado en el puerto de Melinka. (b y c) Serie de OD y clorofila-a de la sonda YSI a ~7 m. (d) Regresión lineal entre los datos de OD y clorofila-a para los días que se muestran en el grafico.....163

Figura 109. Series temporales de la temperatura del agua, OD y porcentaje de saturación de OD obtenidos por equipos MiniDOTs en el sur del fiordo Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre del 2016.....165

Figura 110. (a, b y c) Series de OD, porcentaje de saturación y clorofila-a obtenidas en la boya y en el anclaje sur en el fiordo Puyuhuapi de enero a abril 2016. (d y e) Perfiles de fluorescencia obtenidos con CTD en l anclaje norte y sur durante febrero 2016.....166

Figura 111. Corrientes de máxima intensidad en la zona de Melinka, Puyuhuapi Norte y Puyuhuapi Sur. Las líneas negras se han dibujado como referencias.....167

Figura 112. Espectros de coherencia cuadrada y fase entre las corrientes a lo largo medidas en Melinka y Puyuhuapi Norte (Melk/ P Norte) y entre Melinka y Puyuhuapi Sur (Melk/ P Sur). El nivel de confianza mostrado en el espectro de coherencia es del 95%, solo las fases con coherencias mayores al 95% de confianza han sido graficadas.....168

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cruceros oceanográficos realizados en la región de estudio.....	23
Tabla 2. Calendario de ejecución de las campañas de mediciones y salva de datos.....	41
Tabla 3. Cobertura de datos colectados durante el proyecto.....	41-42
Tabla 4. Características técnicas de los sensores instalados en el SBE 25.....	43
Tabla 5. Información del anclaje de Melinka y salva de datos.....	44
Tabla 6. Características técnicas de los equipos instalados en el anclaje de Melinka y Puyuhuapi.....	44
Tabla 7. Especificaciones técnicas de los ADCP instalados en el anclaje de Melinka y Puyuhuapi.....	44
Tabla 8. Información del anclaje sur en el fiordo Puyuhuapi.....	47
Tabla 9. Información del anclaje norte en el fiordo Puyuhuapi.....	47
Tabla 10. Información de la instalación de sensores de presión en el fiordo Puyuhuapi....	50
Tabla 11. Características técnicas de la estación meteorológica HOBO U-30.....	50
Tabla 12. Rangos de direcciones consideradas en este reporte.....	51
Tabla 13. Empresas reportadas por SENAPESCA con eventos de mortalidades por baja de oxígeno disuelto en el fiordo Puyuhuapi.....	52
Tabla 14. Distribución de valores porcentuales de la dirección y velocidad del viento para la estación meteorológica instalada en Melinka.....	67
Tabla 15. Distribución de valores porcentuales de la dirección y velocidad del viento para la estación meteorológica instalada en la Isla Magdalena, norte del fiordo Puyuhuapi.....	67
Tabla 16. Valores de amplitud (relativos) y fase de los armónicos de marea que representaron el 95% de intervalo de confianza, en la zona de Melinka.....	72
Tabla 17. Valores de amplitud (relativos) y fase de los armónicos de marea que representaron el 95% de intervalo de confianza en el anclaje sur de Puyuhuapi.....	73
Tabla 18. Valores de amplitud (relativos) y fase de los armónicos de marea que representaron el 95% de intervalo de confianza en el anclaje norte de Puyuhuapi.....	73

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 19. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en anclaje de Melinka entre los 46 y 65 m.....	93
Tabla 20. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en anclaje de Melinka entre los 70 y 90 m.....	94
Tabla 21. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en el anclaje de Melinka entre los 95 y 115 m.....	95
Tabla 22. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en el anclaje de Melinka entre los 120 y 135 m.....	96
Tabla 23. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 70 y 90 m.....	109
Tabla 24. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 95 y 115 m.....	110
Tabla 25. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 120 y 140 m.....	111
Tabla 26. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 145 y 165 m.....	112
Tabla 27. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 170 y 185 m.....	113
Tabla 28: Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en el norte de Puyuhuapi entre 1 y 15 m.....	126
Tabla 29. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.....	127
Tabla 30. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 111 y 130 m.....	139
Tabla 31. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 135 y 155 m.....	140
Tabla 32. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 160 y 185 m.....	141-142

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ejemplo de la respuesta de las variables marinas durante un evento de floración de algas ocurrido durante febrero-marzo del 2015.....	178
Anexo 2: (a) Valores de clorofila-a obtenidos en la boya oceanográfica a 1 metro de la superficie del mar. (b) Validación de los registros de clorofila-a de la boya (línea de color negro) con mediciones in-situ de clorofila-a (puntos de color rojo), analizadas en el laboratorio del CIEP. (c) Promedio mensual de la clorofila-a con su desviación estándar.....	179
Anexo 3: Calibración del CTD.....	180-191
Anexo 4. (Panel superior) perfiles de OD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler. (Paneles inferior) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 9 de abril 2016 en Melinka.....	192
Anexo 5. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 2 de agosto 2016 en Melinka.....	193
Anexo 6. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 17 de noviembre 2016 en Melinka.....	194
Anexo 7. (Panel superior) perfiles de OD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler. (Paneles inferior) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 22 de febrero 2016 en el norte de Puyuhuapi.....	195
Anexo 8. (Panel superior) perfiles de OD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler. (Paneles inferior) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 23 de febrero 2016 en el sur de Puyuhuapi.....	196
Anexo 9. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 14 de junio 2016 en el norte de Puyuhuapi.....	197
Anexo 10. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 18 de junio 2016 en el sur de Puyuhuapi.....	198

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Anexo 11. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 25 de noviembre 2016 en el norte de Puyuhuapi.....	199
Anexo 12. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 24 de noviembre 2016 en el sur de Puyuhuapi.....	200
Anexo 13. Relación estadística entre los resultados obtenidos por el método Winkler y los registros de sensores de OD modelo MiniDot instalados en los diferentes anclajes. Los resultados de Melinka corresponden al MiniDot instalado a 10 metros del fondo durante enero, abril, agosto y noviembre 2016. Mientras, que los resultados de Puyuhuapi AN (norte) se elaboraron con los registros de los meses de junio y noviembre usando los niveles de 5, 30 y 120 metros. En Puyuhuapi AS (sur) se utilizaron los niveles de 5, 30 y 10 metros cerca del fondo para los meses de febrero, junio y noviembre del 2016.....	201
Anexo 14. Corrientes superficiales obtenidas de altimetría satelital durante marzo del 2016.....	202
Anexo 15. Correlación cruzada realizada en los datos filtrados de la presión atmosférica en Melinka y la corriente U y V de las series de corrientes del ADCP a 80 m y 120 m.....	203
Anexo 16. Correlación cruzada realizada en los datos filtrados de la presión atmosférica en Puyuhuapi y la corriente U y V de las series de corrientes del ADCP a 80 m y 120 m en el sector de Puyuhuapi sur.....	204
Anexo 17. Correlación cruzada realizada en los datos filtrados de la presión atmosférica en Puyuhuapi y la corriente U y V de las serie de corriente del ADCP a 120 m en el sector de Puyuhuapi norte.....	205

Determinación de la presencia natural de aguas de bajo contenido de oxígeno disuelto, en zonas utilizadas para el cultivo de salmones. Zona norpatagónica Chilena.

Objetivos

Objetivo general

Determinar la variabilidad espacio temporal de las aguas de bajo contenido de OD en la zona norpatagónica y su posible asociación con eventos de mortalidad por carencia de OD en centros de cultivo de peces.

Objetivos específicos

1. Determinar la variabilidad espacial y temporal de la temperatura, salinidad y concentración de OD en la columna de agua, en las zonas donde se presenta el AESS (Canales Moraleda, Jacaf y Puyuhuapi).
2. Estimar el efecto del viento, corrientes, y mareas, sobre la variabilidad temporal y espacial de la distribución de temperatura, salinidad, densidad y OD presente en la zona de estudio.
3. Recopilar información sobre eventos de mortalidad de peces por carencia de oxígeno disuelto, sobre la base de los informes que los centros de cultivos aledaños a la zona de estudio entregan a SERNAPESCA. Se espera además, que ellos aporten voluntariamente otra información pertinente que puedan disponer.
4. Estimar la posible asociación entre la presencia, ubicación e intensidad del mínimo de OD del AESS y los eventos de mortalidad de peces en cultivo por carencia de oxígeno disuelto, que pudiesen haber ocurrido durante el periodo de estudio.

SOBREOFERTAS

1. Análisis histórico de perfiles de CTD (SOBREOFERTA 1)
2. Análisis de nutrientes en agua de mar (SOBREOFERTA 2)
3. Instalación de ADCP-300 kHz en anclaje 1 (SOBREOFERTA 3)
4. Análisis de la información histórica del agua superficial (SOBREOFERTA 4)
5. Análisis de la información histórica de las condiciones atmosféricas locales (SOBREOFERTA 5)

1. INTRODUCCION

En el presente Pre-informe final se describen los resultados obtenidos de los anclajes oceanográficos instalados en el fiordo Puyuhuapi y zona suroeste del Golfo de Corcovado en el periodo enero-noviembre 2016. Además, se incorpora una descripción detallada de las mediciones in-situ realizadas en cuatro campañas en la zona del Golfo de Corcovado y tres en el fiordo Puyuhuapi.

2. ANTECEDENTES

2.1. Análisis de la información histórica de perfiles de CTD en la zona colectada durante diferentes cruceros. Identificación y cuantificación de las masas de agua (SOBREFERTA 1)

En el análisis de las masas de agua de la región de estudio que abarcó el fiordo Puyuhuapi y la región de Melinka, se incluyeron un total de 396 estaciones (Figura 1a) (Tabla 1). Utilizando los valores de la salinidad absoluta, se distinguió el cuerpo de aguas estuarinas en los primeros 10 metros de la columna de agua (Figura 1b). Para un estudio en detalle de esta capa, se dividió en aguas dulces (salinidades de 0-11 g/kg), aguas estuarinas dulces (salinidades de 11-21 g/kg) y aguas estuarinas saladas (salinidades de 21-31 g/kg) (Sievers, 2006 y Sievers y Silva 2008). Este criterio ha sido usado por un gran número de autores en este tipo de estudio en la Patagonia (Schneider et al., 2014 y Pérez-Santos et al., 2014). A continuación se identificaron 3 masas de aguas hasta ~700 metros de profundidad (Figura 1c): el agua Subantártica modificada (ASAAM, salinidad entre 31-33 g/kg), el agua subantártica (ASAA, Salinidades entre 33-33.9 g/kg) y el agua Ecuatorial Subsupsuperficial (AESS, salinidades mayores a 33.9) (Guzmán y Silva, 2002).

El agua dulce representó el 0.1% del total de los registros y se ubicó en los primeros metros de la columna de agua (~1-2 m), seguida del agua estuarina dulce con 0.5 % y el agua estuarina salada con 5.9 % (Figura 1b). En promedio este cuerpo de agua tuvo una temperatura y salinidad de 10.7° C y 27.9 g/kg, respectivamente. Representando el 32.5 % de los datos obtenidos, se encontró el ASAAM a una profundidad promedio de 55 m, con una salinidad de 32.2 g/kg y temperatura de 10.1° C (Figura 1c). Esta masa de agua se origina debido a la mezcla entre las aguas estuarinas y las oceánicas (Sievers y Silva 2008; Pérez-Santos et al., 2014). Debajo del ASAAM se localizó al ASAA, que representando el 29.5 %. En promedio esta masa de agua fue más salada (33.4 g/kg) que la ASAAM y menos cálida (~9.8° C). Al final de los registros y en una profundidad promedio de 211 metros fue observada el AESS con un 31.5 % de ocurrencia. Su salinidad promedio fue de 34.1 g/kg con temperatura de 8.9° C. Las mayores variabilidades (desviaciones estándares 4.8 g/kg) de la salinidad fueron registradas en el cuerpo de aguas estuarinas debido a los cambios en la estacionalidad de los aportes de agua dulce provenientes del derretimiento de glaciares y el aporte de ríos.

Usando esta base de datos y uniéndola con la base de datos de oxígeno disuelto (OD) registrado con equipos CTD y medidos mediante análisis Winkler de los cruceros CIMAR, se realizó una relación entre el comportamiento de los cuerpos de aguas estuarinas, las masas de aguas y sus concentraciones de OD (Figura 2). En general las aguas estuarinas están más ventiladas que el resto debido a su interacción con la atmósfera

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

y por qué se ubican en las profundidades donde ocurre mayor actividad fotosintética. El valor promedio de OD fue de 5.7 ± 0.8 mL/L, con un máximo absoluto de 8.7 mL/L (Figura 2b). En la medida que se desciende en profundidad el OD disminuye, registrándose para la posición de la ASAAM un valor promedio de 4 ± 0.6 m/l. Los valores mínimos fueron registrados en el AESS cerca del fondo donde se detectó hipoxia con registros de oxígeno cercanos a 1 mL/L. En promedio el OD en el AESS fue de 1.8 ± 0.3 mL/L (Figura 2c). En este reporte se entiende por hipoxia el límite óxico para organismos superiores (<2 mL/L) (Silva y Vargas, 2011).

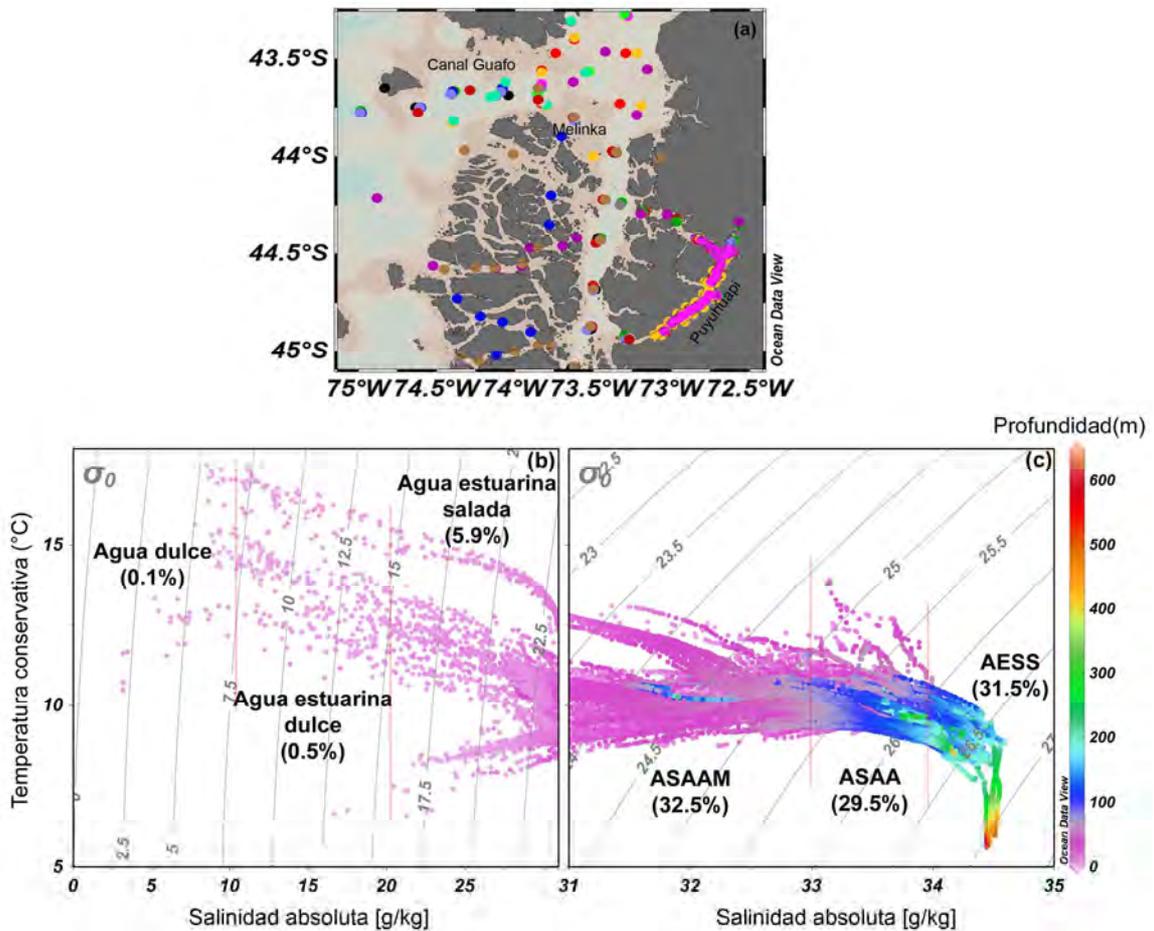


Figura 1. (a) Área de estudio seleccionada para la identificación de los cuerpos de agua estuarinos y masas de agua usando (b-c) diagrama temperatura conservativa / salinidad absoluta / profundidad. Se incluye la ubicación de cada masa y cuerpo de agua, con su porcentaje de participación.

Tabla 1. Cruceros oceanográficos realizados en la región de estudio.

No.	Expediciones	Fecha	Epoca	Estaciones
1	CIMAR-1	8/10-11/11/1995	Primavera	28
2	CIMAR-4I	26/9-9/10/1998	Primavera	10
3	CIMAR-4II	25/2-8/3/1999	Summer	10
4	CIMAR-7I	7-21/7/2001	Invierno	23
5	CIMAR-7II	12-27/11/2001	Primavera	21
6	CIMAR-8I	1-26/07/2002	Invierno	30
7	CIMAR-8II	16/11/2002	Primavera	21
8	CIMAR-9I	12/08/2003	Invierno	14
9	CIMAR-9II	9/11/2003	Primavera	11
10	CIMAR-10I	17/08-3/09/2004	Invierno	10
11	CIMAR-10II	8-26/11/2004	Primavera	10
12	CIMAR-11 II	21/11/2005	Primavera	6
13	CIMAR-12 I	18/07/2006	Invierno	3
14	CIMAR-12 II	10/11/2006	Primavera	6
15	CIMAR-13 I	27/07-06/08/2007	Invierno	13
16	CIMAR-13II	2/11/2007	Primavera	16
14	Puyuhuapi I	14-17/11/2008	Primavera	34
15	Puyuhuapi II	27/02/2009	Verano	29
21	Puyuhuapi III	14/11/2010	Primavera	36
22	Puyuhuapi IV	9/09/2011	Invierno	41
24	Puyuhuapi V	27-29/9/2012	Invierno	24
Total				396

Un análisis en mayor detalle del comportamiento de la presencia de hipoxia, permitió distinguir que estos valores se han registrado en las aguas profundas del fiordo Puyuhuapi (Figura 3, panel superior). La hipoxia comienza desde aproximadamente los 100 metros de profundidad hasta llegar a valores cercanos a 1 mL/L cerca del fondo. Este comportamiento ha sido registrado a lo largo de todo el fiordo (Silva et al., 1997; Silva y Vargas, 2011; Schneider et al., 2014). En la zona de Melinka los datos de los crucero CIMAR 1, 7-I, 7-II, 9-I, 9-II, 13-I, 13-II, no reportaron hipoxia en esta zona (Figura 3, panel inferior).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

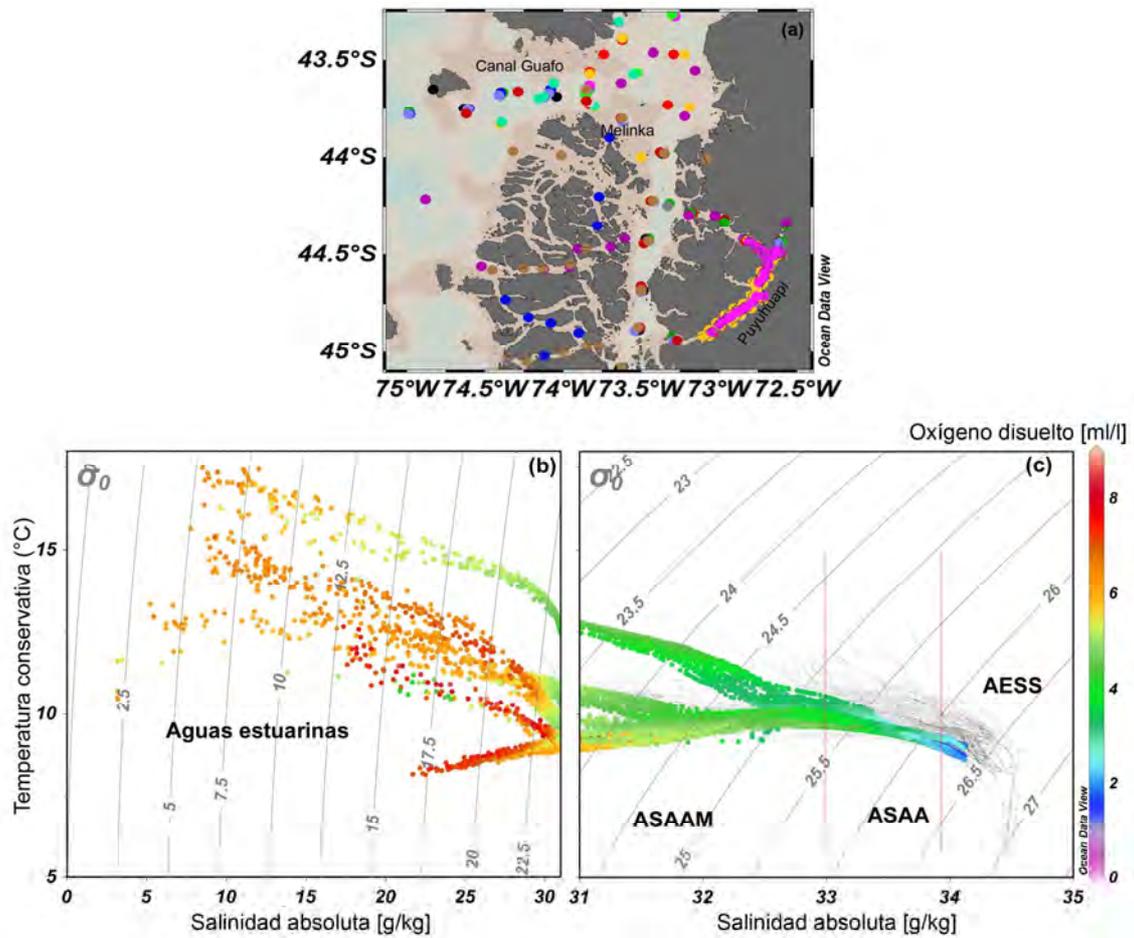


Figura 2. (a) Área de estudio seleccionada para establecer la relación entre los cuerpos de agua estuarinas y masas de agua con el oxígeno disuelto. (b-c) Diagrama temperatura conservativa / salinidad absoluta / oxígeno disuelto.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

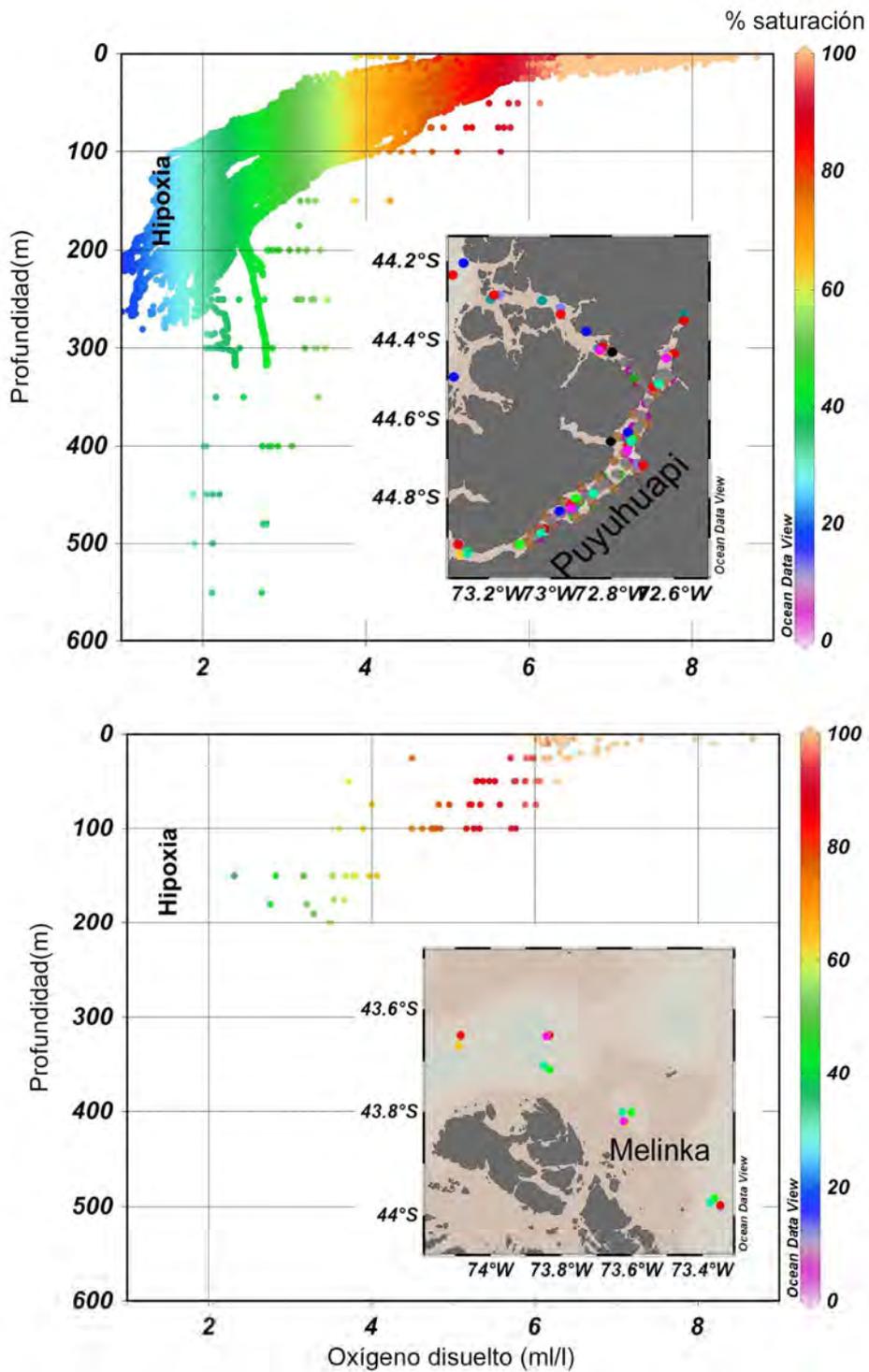


Figura 3. Panel superior. Distribución vertical del OD y el porcentaje de saturación en el fiordo Puyuhuapi y canal Jacaf. Panel inferior. Distribución vertical del OD y el porcentaje de saturación en la zona de Melinka.

2.2. Análisis de la información histórica del agua superficial obtenidos con la boya y estaciones meteo-oceánicas (SOBREFERTA 4).

En el análisis de la información histórica se utilizó la información proveniente de una boya oceanográfica instalada en la zona norte del fiordo Puyuhuapi en el marco del proyecto COPAS Sur-Austral PFB 31/2007 (Figura 4). Además, se incorporó la información colectada por 2 estaciones HOBO U-30 UTH instaladas al sur del fiordo Puyuhuapi y en el canal Jacaf, en el marco de un proyecto INNOVA-CORFO 11BPC-10191. En esta sección se describirán los resultados obtenidos de estas series de tiempo.

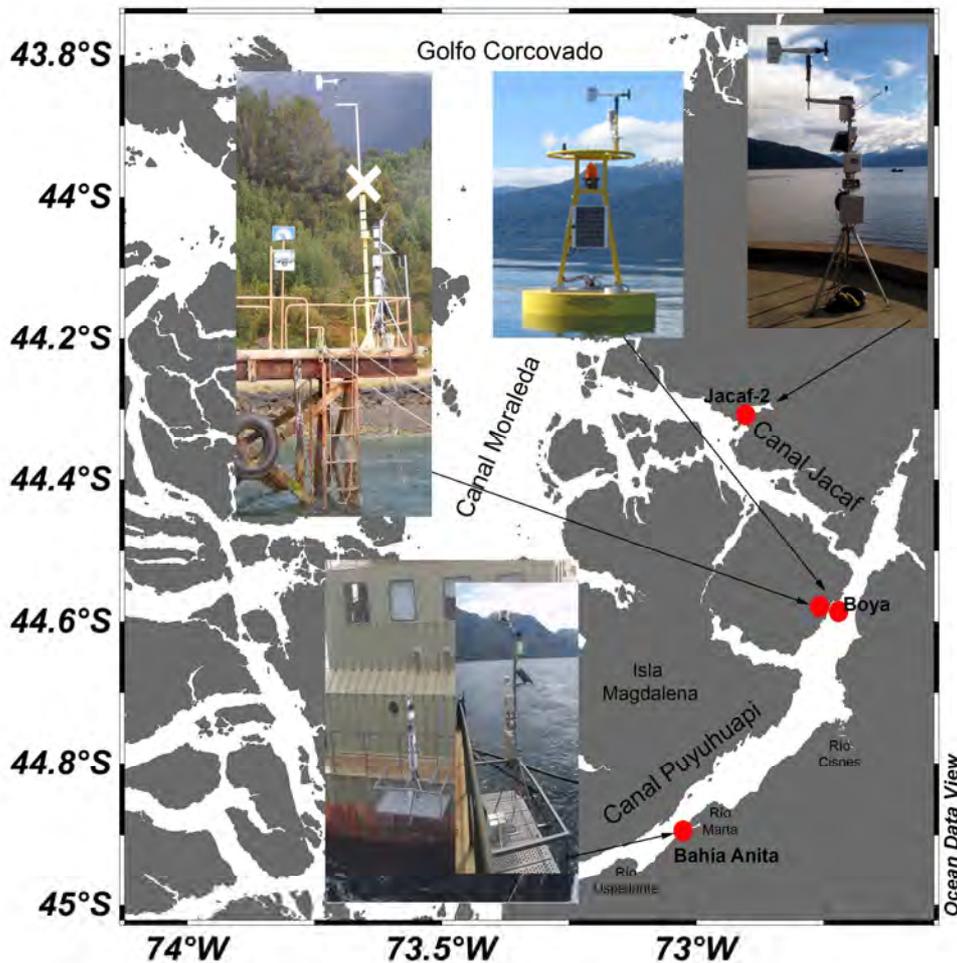


Figura 4. Posición de las estaciones oceanográficas fijas y boya oceanográfica.

La serie más extensa de parámetros oceanográficos obtenidos en el nivel de superficie de un fiordo Patagónico, ha sido registrada por una boya oceanográfica instalada en la región norte del fiordo Puyuhuapi ($44^{\circ} 35.286'$ Sur y $72^{\circ} 43.625'$ Oeste, Schneider et al., 2014). La boya quedó fondeada en una profundidad de 190 metros y a una distancia de la costa de 900 metros y está equipada con una sonda multiparamétrica modelo YSI 6600-V4 que tiene sensores ópticos de oxígeno disuelto, clorofila-a y sensores analógicos de

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

temperatura del agua, conductividad y presión. La figura 5, muestra la serie de registros horarios a 1 m de la superficie del mar, de temperatura y salinidad del agua, el OD y la clorofila-a desde 2010 hasta los últimos datos registrados en febrero 2016. Además, se muestra el promedio mensual de cada parámetro donde se destaca su ciclo anual.

Los valores más altos de la temperatura del agua se registraron durante la primavera y verano en un rango entre 12-17 °C. Mientras, los valores mínimos se observaron en otoño e invierno, siendo julio el mes más frío (5-7° C). En la serie de tiempo el verano más cálido fue en 2013, donde la temperatura del agua alcanzó los 24.7 °C.

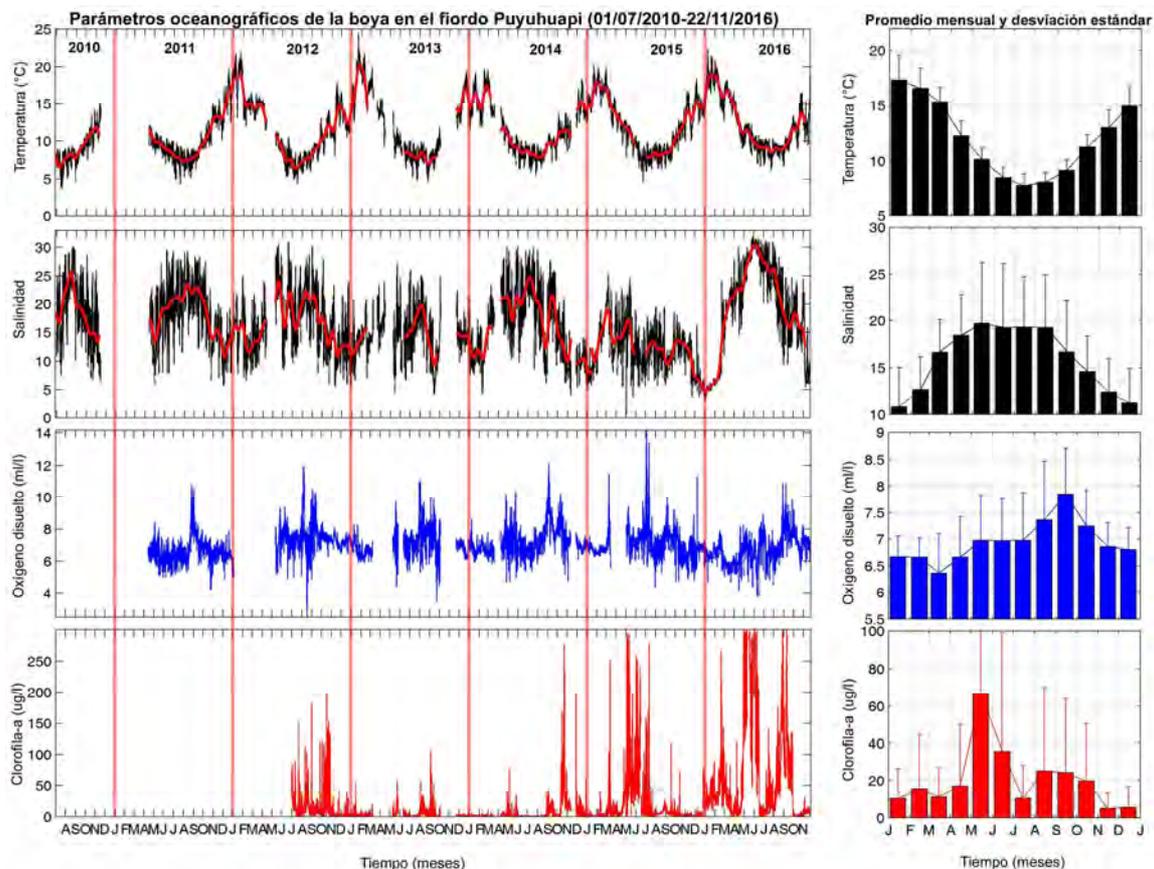


Figura 5. Panel derecho, serie de tiempo de temperatura, salinidad, OD y clorofila a 1 m de profundidad (2010 – 2016), registradas en la boya oceanográfica. Panel izquierdo, promedios mensuales con sus desviaciones estándares.

La salinidad del agua también muestra un ciclo anual, con máximos durante otoño e invierno (15-20) y mínimos en primavera y verano (10-15) (Figura 5). Este comportamiento obedece a la relación entre los aportes de agua dulce por precipitaciones y los de derretimiento de hielo, siendo estos últimos los que dominan el régimen de descarga del río Cisnes (régimen nival) (Schneider et al., 2014). Por otro lado, el OD varió entre 6.5 y 8 mL/L en promedio, registrando máximos absolutos entre 12 mL/L durante la época productiva. Durante agosto y septiembre se presentaron los máximos coincidiendo con el momento del año donde ocurren los valores mayores de producción primaria (Montero et al., en preparación). La serie de tiempo del OD muestra un ciclo anual en la ocurrencia de

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

estos eventos productivos en el fiordo. Los aumentos del OD correspondieron con aumentos de la clorofila-a. En el promedio mensual de la clorofila-a aparece mayo mostrando un máximo absoluto, seguido de los meses de finales del invierno y comienzo de la primavera (Figura 5). En el anexo 1 se muestra un ejemplo de la respuesta del OD y la clorofila-a esta durante la ocurrencia de un evento de floración de algas durante el verano del 2015. En el anexo 2 se presenta la validación de los registros de clorofila-a de la boya con datos in-situ.

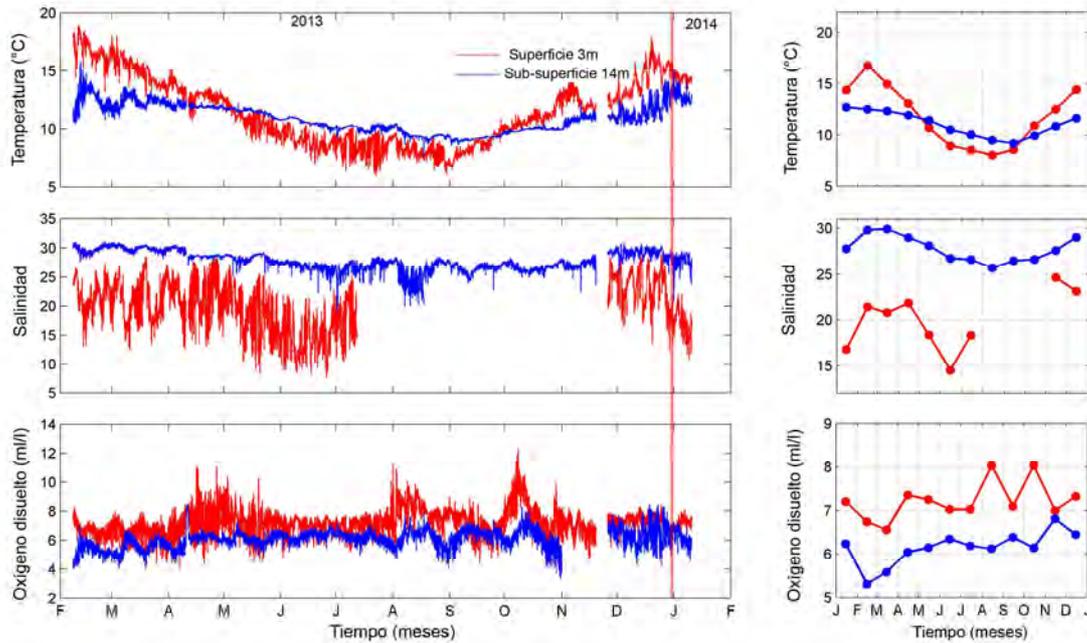


Figura 6. Panel izquierdo. Serie de tiempo de temperatura, salinidad y OD obtenida de la estación Bahía Anita (HOB0 U30-ETH) desde febrero 2013 hasta enero 2014. La estación se ubicó al sur de canal Puyuhuapi ($44^{\circ} 54.95'$ Sur y $73^{\circ} 01,65'$ Oeste) y los sensores a una profundidad de 3 y 14 m. Panel derecho. Promedios mensuales de cada variable.

Los registros de temperatura, salinidad y OD obtenido en el sur del fiordo Puyuhuapi durante el 2013 y 2014 a una profundidad de 3 y 14 m, mostraron patrones similares a los obtenidos en la boya situada en la zona norte del mismo fiordo (Figura 6). En ambos niveles de registro, el OD no disminuyó de 4 mL/L (5.72 mg/l). La estación se instaló en un pontón rodeado de jaulas con salmones a una distancia de los centros de cultivo de ~500 metros.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

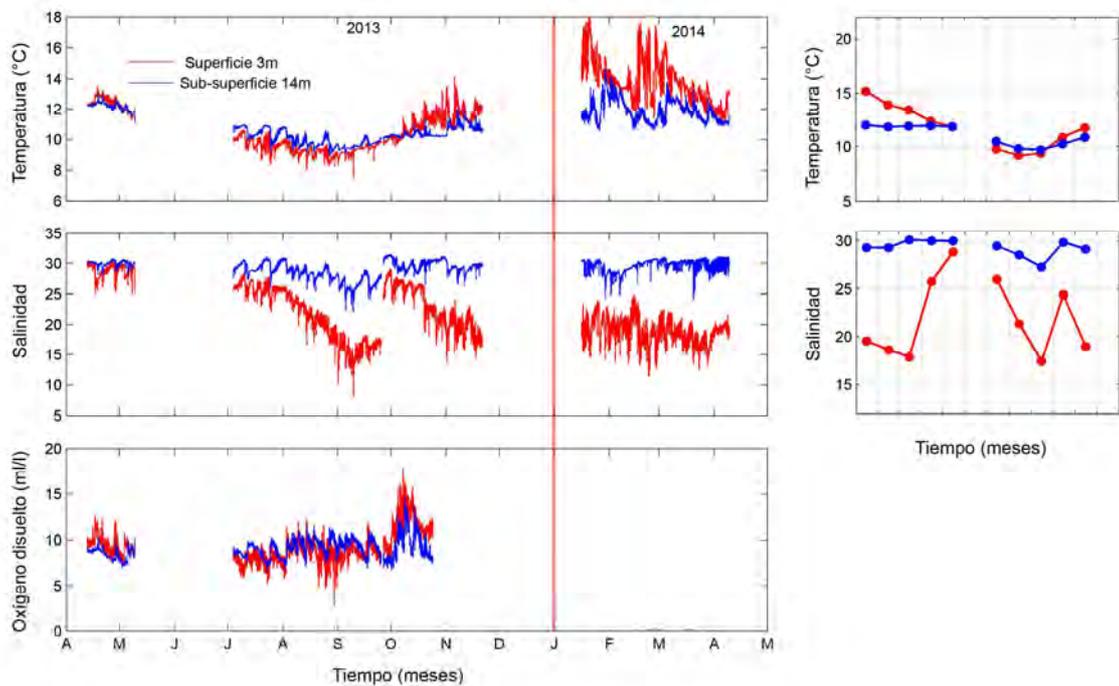


Figura 7. Panel izquierdo. Serie de tiempo de temperatura, salinidad y OD obtenida de la estación Jacaf-2 (HOBO U30-ETH) desde febrero 2013 hasta enero 2014. La estación se instaló al oeste del canal Jacaf ($44^{\circ} 19.436$ Sur y $72^{\circ} 53.858$ Oeste) y los sensores a una profundidad de 3 y 14 m. Panel derecho. Promedios mensuales de cada variable.

En el extremo oeste del canal Jacaf (canal que se comunica con el fiordo Puyuhuapi por su extremo este), también se registró una serie de tiempo de temperatura, salinidad y OD durante el 2013 y 2014. Sin embargo, los registros fueron afectados por la alta presencia de incrustaciones biológicas, dificultando el registro continuo de datos. En general, los patrones de todos los parámetros se mantuvieron con respecto a los resultados mostrados por la boya y la estación Bahía Anita, donde se observó una coincidencia en la ocurrencia del máximo de OD durante octubre 2013 (Figura7).

2.3. Análisis de la información histórica de las condiciones atmosféricas locales obtenidas de la boya y estaciones meteo-oceánicas (SOBREFERTA 5).

Los primeros datos obtenidos del comportamiento del viento en el fiordo Puyuhuapi (Figura 8), fueron obtenidos con sensores eólicos instalados en una boya. Las rosas de vientos construidas para cada estación del año muestran que el viento predominante fue a lo largo del eje del fiordo (componentes SW y NE). La componente SE, también tuvo una frecuencia importante durante todo el tiempo, lo que indican la influencia de los vientos catabáticos que soplan desde el valle de río Cisnes. Las intensidades máximas fueron del orden de 12-14 m/s.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

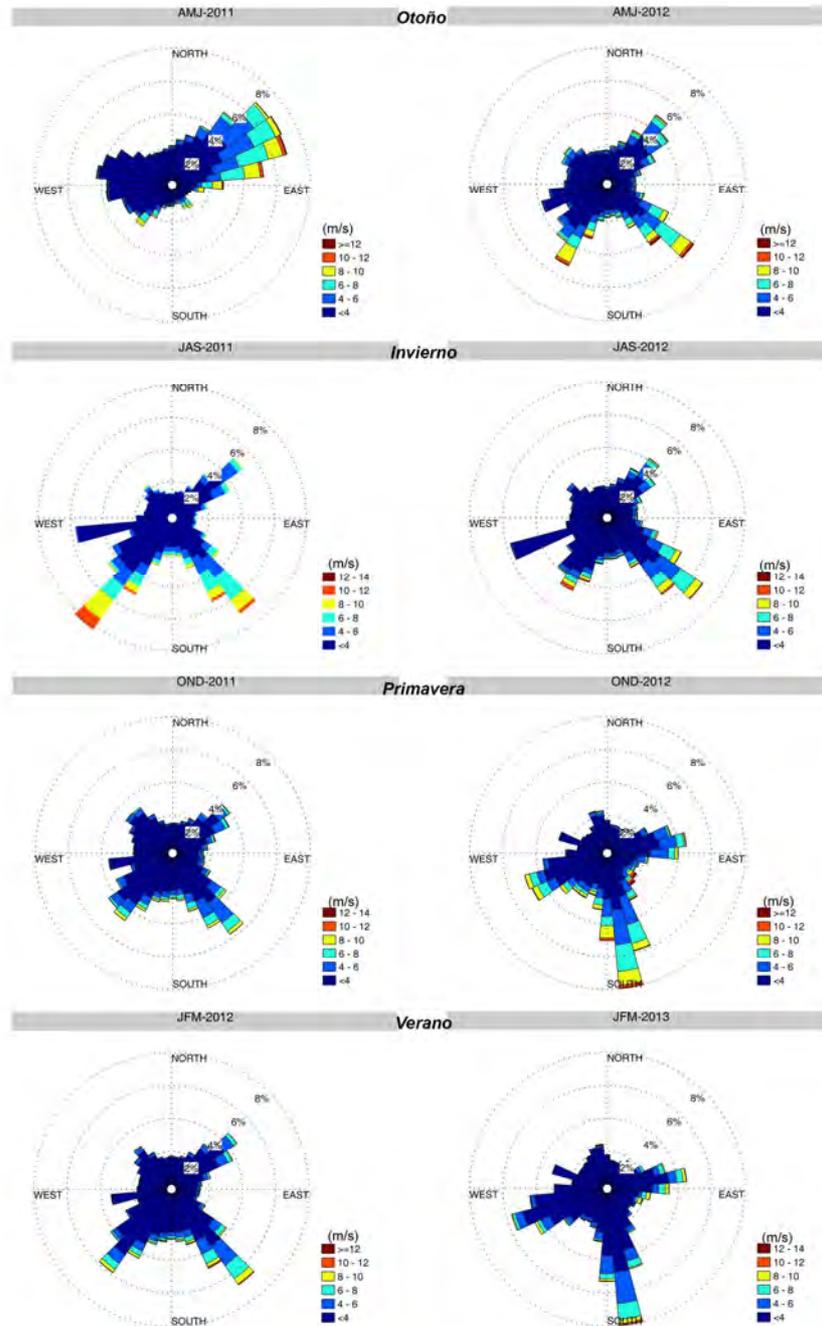


Figura 8. Rosas de viento estacional de la boya oceanográfica instalada el fiordo Puyuhuapi ($44^{\circ} 35.286'$ Sur y $72^{\circ} 43.625'$ Oeste) en el periodo abril 2011 a marzo 2013. La interpretación de la dirección del viento fue de acuerdo a la convención meteorológica (de donde viene el viento).

En la estación Bahía Anita el viento mostró preferentemente una dirección nortesur, por lo que parece no estar afectada por vientos catabáticos ya que esta zona está situada muy lejos del valle del río Cisnes (Figura 9). Sin embargo, la intensidad del viento fue

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

mayor que en la boya, alcanzándose vientos cercanos a los 22 m/s de componente sur. Es importante destacar que el sensor de viento de esta estación quedo ubicado a ~10 m de altura del nivel del mar, mientras los sensores de la boya estuvieron a 2.5 m/s de altura.

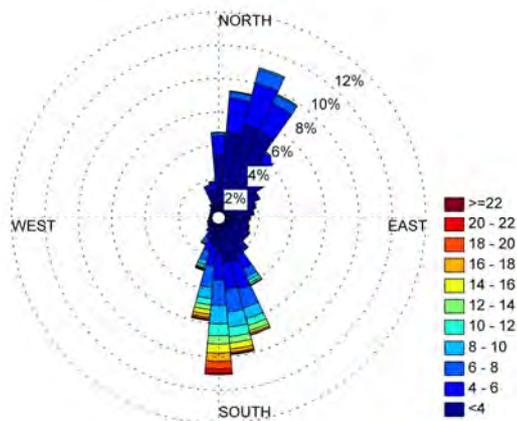


Figura 9. Rosa de viento de la estación Bahía Anita instalada en el sur del fiordo Puyuhuapi ($44^{\circ} 54.95'$ Sur y $73^{\circ} 01.65'$ Oeste), durante febrero 2013 a enero 2014. La interpretación de la dirección del viento fue de acuerdo a la convención meteorológica (de donde viene el viento).

En el muelle de la isla Magdalena, situado en el borde oeste del fiordo Puyuhuapi se instaló una estación meteorológica (antigua Bahía Anita) (Figura 4). En esta estación los sensores de viento quedaron instalados a ~10 metros del nivel del mar. Las componentes vientos siguen destacando el viento a lo largo del fiordo. Sin embargo, en este punto también se registraron los vientos del Oeste debido a las cercanías de esta estación con la isla.

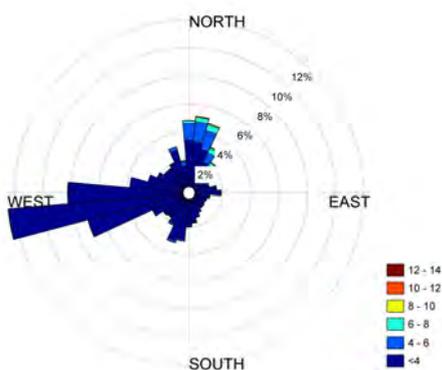


Figura 10. Rosa de viento de la estación Isla Magdalena ($44^{\circ} 35' 28''$ Sur y $72^{\circ} 44' 13''$ Oeste) instalada en el muelle de la isla Magdalena a 900 metros de la boya. Periodo de datos de abril 2014 a febrero 2016. La interpretación de la dirección del viento fue de acuerdo a la convención meteorológica (de donde viene el viento).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Los registros atmosféricos obtenidos de la estación isla Magdalena, presentaron las temperaturas del aire más alta (20-25° C) durante los meses de verano (Figura 11). Mientras, durante el invierno se registraron las más bajas (0-5° C) con mínimos absolutos cercanos a 0° C. El ciclo anual de la temperatura del aire estuvo en fase con el ciclo anual de la temperatura del agua (Figura 5). La radiación solar fue máxima en primavera y verano entre 1000-1300 W/m² y los mínimos se registraron en otoño e invierno entre 100-500 W/m². La presión atmosférica presentó un periodo de valores mínimos durante parte del otoño y el invierno, debido presuntamente al paso de los sistemas de bajas presiones. En general, no se observaron periodos de calma de los vientos, siendo las intensidades medias cercanas a 2 m/s, mientras el viento máximo (rachas) se mantuvieron en promedio entre 3-4 m/s, con máximos absolutos entre 15-30 m/s (Figura 11).

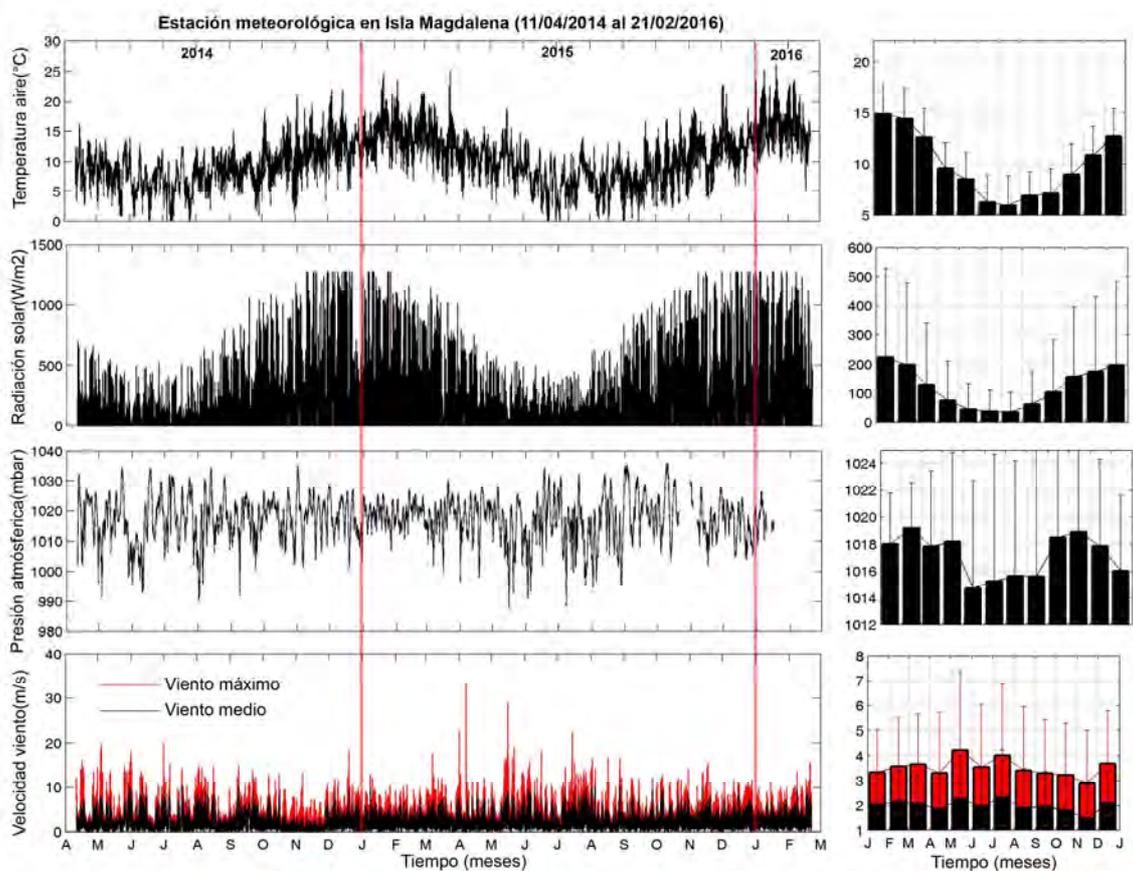


Figura 11. Parámetros atmosféricos obtenidos de la estación isla Magdalena. Periodo abril 2014 a febrero 2016.

2.4. Revisión bibliográfica de antecedentes oceanográficos relacionados con la baja de OD en fiordos.

La concentración de OD en los ecosistemas acuáticos es gobernada por el intercambio que existe entre la superficie del agua con la atmósfera, el transporte físico de masas de agua y los procesos biogeoquímicos que modulan el balance entre la producción de oxígeno (a través de la fotosíntesis) y el consumo de este (a través de la respiración) en la columna de agua y los sedimentos (Silva, 2006; Peña et al., 2010; Zhang et al., 2010). La interacción de estos procesos otorga una gran variabilidad en la concentración disuelta en el agua de este elemento tanto en escalas temporales como espaciales. Los cambios que puede experimentar el OD (aumento o disminución) generan grandes impactos en los ecosistemas, los recursos vivos y los ciclos biogeoquímicos (Rabalais et al., 2010).

Durante las últimas décadas, bajas concentraciones de OD y tendencias negativas en la concentración de este elemento han sido reconocidas a nivel mundial en diferentes ecosistemas acuáticos (Andersson, 1996; Wu, 2002; Erlandsson et al., 2006; Díaz y Rosenberg, 2008; Rabalais et al., 2010). Esta condición ambiental; conocida como hipoxia ($OD < 2 \text{ ml L}^{-1}$; Silva & Vargas 2014), trae consigo una serie de problemas ecológicos importantes, que entre otros incluyen masivas mortalidades de peces y animales marinos (Wu et al., 2002; Rabalais et al., 2010). La hipoxia ocurre principalmente cuando el OD es utilizado a una tasa más rápida que aquella a la cual se produce el reabastecimiento de este elemento en el agua (Erlandson et al., 2006; Rabalais et al., 2010). Si bien existen ambientes donde bajo condiciones naturales se produce una disminución de la concentración de OD en el agua (florecimientos/degradación de microalgas, estratificación); hay otros donde además de las condiciones naturales, la baja de OD observada es cercanamente relacionada con el desarrollo de actividades antropogénicas (Wannamaker y Rice, 2000; Díaz y Rosenberg, 2008; Rabalais et al., 2010; Zhang et al., 2010).

2.4.1. Disminución de los niveles de OD en fiordos.

La zona de fiordos y canales chilenos se extiende desde los 41° hasta los 56°S, pudiendo dividirse en tres grandes áreas separadas por características geográficas mayores: a) la zona norte que se extiende desde Puerto Montt hasta la Península de Taitao, b) la zona central ubicada desde el Golfo de Penas hasta el estrecho de Magallanes y c) la zona sur comprendida entre el estrecho de Magallanes y el Cabo de Hornos (Pickard, 1971; Silva and Vargas, 2014). Esta zona está caracterizada por condiciones oceanográficas extremas, donde actúan la influencia de las aguas oceánicas, el aporte fluvial producto de la alta pluviosidad y el constante deshielo de glaciares (Silva y Calvete, 2002). Por otra parte, debido a que los fondos de estos canales son generalmente irregulares, suelen presentar umbrales que actúan como barreras para la circulación de las aguas más profundas (Pickard 1971; Silva et al., 1997; Silva y Vargas, 2014; Schneider et al., 2014). De acuerdo con la capacidad de renovación de las aguas y a la cantidad de materia orgánica que estas cuencas puedan recibir, se pueden generar zonas con condiciones de hipoxia o incluso anoxia dentro de la columna de agua (Silva y Calvete, 2002). Silva y Vargas (2014) después de analizar las concentraciones de OD que muestra la columna de agua en al menos 1200 estaciones de muestreo dentro de un área que incluyó 90 fiordos, canales y golfos de la Patagonia Chilena, pudieron identificar solo cuatro zonas hipóxicas; una de ellas localizada en la

Patagonia central (Golfo Almirante Montt) y las 3 restantes ubicadas en la zona de la Patagonia norte (canal Jacaf, fiordo Puyuhuapi y la cabeza del fiordo Aysén). El resto de las estaciones de muestreo analizadas mostraron valores sobre el umbral hipóxico y ninguna zona anóxica fue encontrada dentro del área de estudio. Algunas de las principales causas de la disminución del oxígeno en fiordos son descritas a continuación:

2.4.2. Fitoplancton y producción de materia orgánica.

Los organismos fitoplanctónicos son los principales productores de materia orgánica y representan la base de las tramas tróficas en los ecosistemas acuáticos. La producción de materia orgánica (producción primaria, PP) la realizan a través de la fotosíntesis, que además incluye la liberación de oxígeno a la columna de agua durante el proceso, OD que se disuelve en el agua circundante a las microalgas. Altas abundancias de fitoplancton (principalmente diatomeas) son asociadas a altas tasas de PP y altos niveles de oxígeno disuelto. Sin embargo el consumo de la materia orgánica por parte de los organismos heterótrofos, trae asociado la utilización del OD disponible en el agua y por lo tanto genera una disminución en su concentración. Grandes fluctuaciones de OD pueden observarse durante un ciclo diario bajo condiciones de florecimiento de microalgas, donde la oxigenación de la columna de agua se mueve entre la sobresaturación diurna y la subsaturación nocturna (Peña et al., 2010). Aquí, altos niveles de materia orgánica producidos por el fitoplancton durante el día resultan en niveles sobresaturados de oxígeno, mientras que en la noche el proceso de respiración por parte de la comunidad microbiana agota el suministro de OD conduciendo a la subsaturación (Shen et al., 2008).

Bajo condiciones normales (no florecimiento o eutrofización), la cantidad de material orgánico generado en la columna de agua está supuestamente en equilibrio con los procesos de pastoreo y degradación (Granelli et al., 1990). La presión de pastoreo es usualmente uno de los principales factores que controla la abundancia del fitoplancton; y que además, contribuye al flujo vertical de materia orgánica que se exporta desde los estratos superficiales hacia los sedimentos. Estudios en fiordos muestran que en primavera, los elevados niveles de PP y la alta presión de pastoreo por parte del zooplancton sobre el fitoplancton (dominado por diatomeas), resultan en elevadas tasas de sedimentación de materia orgánica que pueden traducirse en un déficit de OD en aguas profundas (González et al., 2010). Contrariamente en invierno, cuando organismos de pequeño tamaño dominan el fitoplancton y bajos niveles de materia orgánica son obtenidos, la PP es principalmente remineralizada en los estratos superficiales de la columna de agua sin sedimentar hacia el fondo (Gray et al., 2002).

Los ecosistemas patagónicos han sido descritos como zonas de alta producción biológica (Montero et al., 2011; Jacob et al., 2014; Montero et al., submitted), donde algunos de los valores reportados son perfectamente comparables con aquellos obtenidos en el ecosistema de surgencia a lo largo de Chile (Iriarte et al., 2007). Cuando la alta cantidad de materia orgánica disponible en la columna de agua está altamente acoplada con los procesos de respiración de la comunidad heterótrofa (Montero et al., 2011), un rápido consumo del OD disponible puede ocurrir (Silva y Vargas, 2014).

Dado lo anterior, la biomasa fitoplanctónica presente en el sistema puede ser un buen indicador de las variaciones de oxígeno. Fluctuaciones en la extensión y duración de los eventos de bajo contenido de oxígeno disuelto, pueden causar un significativo impacto económico y ecológico en distintos ecosistemas acuáticos (Peña et al., 2010).

2.4.3. Estratificación de la columna de agua.

Producto de la interacción que ocurre entre el agua oceánica y dulce, la hidrografía de la columna de agua en fiordos es usualmente caracterizada por una fuerte estratificación vertical, donde la capa superficial menos densa flota sobre una profunda de mayor salinidad (Silva y Calvete, 2002; Sievers, 2006; Sievers y Silva, 2008). En los diferentes fiordos, canales, estuarios y cuencas de la Patagonia chilena, la capa superficial de la columna de agua es fuertemente influenciada por la permanente entrada de agua dulce proveniente de las persistentes precipitaciones, escorrentía y el derretimientos, fortaleciendo la estratificación, que además se ve influenciada por el calentamiento/enfriamiento que provoca la fluctuación anual de la radiación de temperatura y la advección de aguas exteriores más frías o más calientes (Schneider et al., 2014).

La estratificación de la columna de agua en fiordos es producto del balance entre las fuerzas de boyantes y las de mezcla. Mientras la boyantes tiende a estabilizar verticalmente la columna de agua a través del enfriamiento y calentamiento de esta, como también a través de las diferencias en salinidades; la mezcla a través de ondas internas y el efecto de fricción de la fuerza del viento, tienden a romper la estratificación (Calvete y Sobarzo, 2011; Ross et al., 2014). En aguas estratificadas principalmente aquellas ubicadas en las cercanías de las desembocaduras de ríos, la barrera de densidad causada por las diferencias en temperatura, salinidad o ambos, dificulta la difusión del OD desde una capa superficial más oxigenada hacia una profunda con menos disponibilidad de este elemento. Aquí la mezcla vertical (que podría romper la estratificación) juega un importante rol en balancear la concentración de OD entre una capa y otra (Peña et al., 2010; Zhang et al., 2010).

Distintos perfiles verticales de temperatura y salinidad pueden encontrarse en fiordos dependiendo de la ubicación geográfica y la época del año. En el canal de Puyuhuapi durante primavera la estratificación de la columna de agua puede ser principalmente controlada por el ingreso de agua dulce, mientras que en verano actúa tanto el ingreso de agua de menor salinidad como el efecto de la temperatura (Schneider et al., 2014). En el fiordo Reloncaví durante invierno, estas mismas dos variables influyen la estratificación observada (Castillo et al., 2016). Los perfiles de temperatura cambian a través de un ciclo anual; siendo en general positivamente correlacionados con la profundidad en invierno y negativamente en verano (Oppedal et al., 2007). En esta época del año, el aumento de temperatura además de aumentar la estratificación de la columna de agua provoca una reducción en la capacidad del agua para disolver el oxígeno (Johansson et al., 2006).

2.4.4. Características topográficas y masas de aguas oceánicas.

Cuerpos de agua semi-cerrados como los fiordos son naturalmente susceptibles a bajas concentraciones de OD debido a sus características topográficas; que en la mayoría de los casos, no permiten una renovación rápida de las aguas en profundidad o impiden la circulación (Zhang et al., 2010). Altos períodos de estancamiento de esta agua profunda podrían favorecer la condición de hipoxia dentro del ecosistema (Erlandsson et al., 2006). La lenta renovación de aguas de fondo o el impedimento de la circulación de aguas profundas, es comúnmente visto en cuencas que presentan un umbral somero (Silva y Vargas, 2014).

En la zona norte de la Patagonia (41°-47°S) la presencia de umbrales someros como

la constricción de Meninea y Desertores; impiden que el AESS con bajo contenido de oxígeno disuelto, ingrese desde el océano hacia los fiordos y canales que se encuentran más al norte o más al sur de estas barreras topográficas. Así, las microcuencas ubicadas al norte de la constricción Desertores (Ancud-Reloncaví) y al sur de la constricción de Meninea (Aysén-Elefantes), no cuentan con la presencia de AESS y por el contrario son áreas ventiladas (aunque de forma lenta) por la bien oxigenada ASAA que fluye desde el océano y se hunde al otro lado del umbral debido a su mayor densidad (Silva y Vargas, 2014). En el caso de los canales Moraleda, Jacaf y Puyuhuapi; ubicados antes de la constricción de Meninea, la masa de AESS ingresa desde el océano llenando de agua pobremente oxigenada las capas más profundas de estos sectores (Sievers y Silva, 2008; Silva y Vargas, 2014). No obstante Schneider et al. (2014) sugieren que los umbrales ubicados al sur del Canal de Puyuhuapi (170 metros) y en la cabeza del canal Jacaf (100 metros) actuarían como barrera, impidiendo el flujo libre de aguas de bajo contenido de oxígeno (AESS) en la cuenca del Puyuhuapi. En la zona central (47°-52°S) y sur de la Patagonia (52°-56°S), el avance de la bien oxigenada ASAA hacia el interior de los canales y fiordos llena la mayoría de las micro-cuencas interiores, ventilándolas (Silva y Vargas, 2014).

2.4.5. Materia orgánica alóctona.

Los altos aportes de agua dulce sumados a la alta cantidad de materia orgánica alóctona que ingresa a los fiordos desde los ríos, favorecen la ocurrencia de zonas con bajo contenido de OD principalmente en la parte de la cabeza de algunos fiordos, donde la estratificación y aporte de partículas orgánicas es mayor de la que generalmente se observa hacia la boca. Esto principalmente ocurre en la zona del fiordo Reloncaví, canal Puyuhuapi, Fiordo Aysén y canal Baker (Silva y Vargas, 2014), donde la alta descarga de los ríos Puelo, Cisnes, Aysén y Baker; respectivamente, representan una fuerte entrada de material alóctono a la columna de agua y sedimentos (Silva y Prego, 2002). Estudios previos indican que los sedimentos superficiales de los fiordos Reloncaví, Puyuhuapi y Aysén tienen un alto contenido de carbón orgánico, que disminuye a menos del 10% a medida que se avanza hacia la sección oceánica (Silva et al., 2011; Quiroga et al., 2013). En el caso del canal Baker; pese a la alta descarga de agua dulce que posee el río Baker dentro del fiordo y a la degradación que se ejerce sobre la materia orgánica alóctona y/o autóctona, la ventilación que ocurre debido a procesos físicos es suficientemente importante para mantener el OD arriba del umbral hipóxico (Silva y Vargas, 2014).

La mayor disposición de materia orgánica (alóctona + autóctona) en la columna de agua y/o sedimentos aumenta el consumo de OD durante la respiración de la comunidad microplanctónica, siendo común observar aguas con bajo contenido de este elemento en la mayoría de las cabezas de fiordos de la zona norte (Castillo et al., 2016). Al respecto, Montero et al. (2011) reportan un metabolismo heterótrofo (producción primaria < respiración comunitaria) dentro de la sección de la cabeza del fiordo Reloncaví, donde se consume más carbón orgánico del que es producido localmente por el fitoplanctónica (materia orgánica autóctona). Tasas de respiración comunitaria mayores que las de producción primaria han sido también observadas en la sección central del fiordo Puyuhuapi (Montero et al., 2015 submitted), en la cabeza del fiordo Aysén y en la zona del fiordo Steffen/Baker (Montero, data sin publicar).

La ausencia de zonas de bajo contenido de OD en la cabeza de los fiordos de la Patagonia central (47°-52°S); sin considerar la fuerte condición de hipoxia que muestra el

Golfo Almirante Montt ($0.2-2 \text{ ml L}^{-1}$) debido a la baja tasa de renovación de las aguas profundas (Silva y Vargas, 2014), puede ser explicada debido a la baja producción de materia orgánica in situ que se registra en esta zona (Jacob et al., 2014) y/o a una menor entrada de materia orgánica alóctona al sistema comparada con la zona norte (Lafon et al., 2014). En la Patagonia sur se observa una muy baja descarga de agua proveniente de los ríos (Dávila, 2002), que además limita la entrada de materia orgánica alóctona a los diferentes canales y fiordos (Silva y Prego, 2002). Esto sumado a las bajas tasas de producción primaria que mantiene el área, permite observar micro-cuencas bien oxigenadas que muestran valores mínimos de OD bien arriba del umbral hipóxico (Silva y Vargas, 2014)

El desarrollo de actividades antropogénicas puede también proveer adicionales entradas de materia orgánica alóctona a los ecosistemas acuáticos. La acuicultura es una de estas actividades que involucra la descarga directa de productos orgánicos (alimento no consumido, fecas) al medio, contribuyendo al enriquecimiento orgánico de los sedimentos que a su vez reduce la disponibilidad de oxígeno tanto en la columna de agua como en aguas de fondo y sedimentos (Silva y Vargas, 2014). El sedimento se hace menos cohesivo, más susceptible a la re-suspensión y contribuye a la turbidez del estrato de agua suprayacente, que sucesivamente reduce el potencial de crecimiento fotosintético de la comunidad microfítobentónica y la generación del oxígeno dentro de la columna de agua (Rabalais et al., 2010). El impacto del enriquecimiento orgánico en la comunidad bentónica provoca una reducción en la diversidad de especies, el incremento de especies oportunistas y especies tolerantes a la contaminación y finalmente la completa ausencia de especies (Quiroga et al., 2013). Holmer et al., (2005) señalan que bajo las jaulas de cultivo de los peces el enriquecimiento orgánico del sedimento incrementa la actividad microbial y puede alterar la estructura de la comunidad bentónica debido a la progresiva disminución de oxígeno disuelto. En un escenario ideal la jaula de cultivo debiera ser localizada en un sitio que presente activa circulación hidrodinámica, de tal manera de dispersar la materia orgánica que sedimenta y evitar acumulación bajo la jaula (Soto y Norambuena, 2004). En Chile un estudio realizado en la zona de cultivo de salmón ubicada entre Chiloé y Aysén, concluye que el mayor impacto de esta actividad está restringido a la sombra de la jaula cuando la materia orgánica logra alcanzar el sedimento, ya que en la columna de agua pareciera existir un rápido proceso de utilización y reciclaje de esta (Soto y Norambuena, 2004).

2.4.6. Eutrofización.

La alta cantidad de materia orgánica alóctona y de nutrientes que reciben los ecosistemas de fiordos y canales y en general los sistemas costeros, pueden resultar en fuertes procesos de eutrofización y bajos niveles de oxígeno dentro de la columna de agua (Kemp et al., 2005; Díaz y Rosenberg, 2008). El incremento que se ha producido durante las últimas décadas en el ingreso de estos materiales a los ecosistemas acuáticos es principalmente atribuible a la acuicultura, la agricultura, la aplicación de fertilizantes, la deforestación y la descarga de aguas residuales domésticas (Gray et al., 2002; Wu et al., 2002; Díaz y Rosenberg, 2008; Korpinen y Bondsdorff, 2015). La eutrofización fomenta el aumento de la biomasa de los organismos autótrofos a niveles excesivos, debido principalmente al aumento en la cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo) que ingresa a los sistemas acuáticos (Boesh, 2008). El fitoplancton sintetiza estos nutrientes produciendo

también una alta cantidad de materia orgánica que sumada a la materia orgánica autóctona que puede ingresar al sistema ofrecen una gran cantidad de alimento a los consumidores primarios, que en el proceso de degradación utilizarán el OD disponible del agua pudiendo conducir a la hipoxia y/o en casos extremos, a una condición anóxica (Gray et al., 2002; Korpinen y Bondsdorff, 2015). La materia orgánica que no alcance a ser consumida o degradada en la columna de agua alcanzará el sedimento, donde las mismas condiciones de hipoxia y/o anoxia pueden presentarse (Gray et al., 2002). Eventos sistemáticos de agotamiento de OD representan la primera señal que un sistema ha alcanzado un punto crítico de eutrofización, que en combinación con procesos físicos que estratifican la columna de agua pueden conducir a una condición permanente de hipoxia (Díaz y Rosenberg, 2008). La respuesta del ecosistema frente a las bajas concentraciones de OD depende en general de las características físicas y geomorfológicas que presente el área afectada, por lo tanto algunos lugares mostrarán síntomas más claros de hipoxia que otros (Korpinen y Bondsdorff, 2015).

El aumento en la abundancia del fitoplancton y en los niveles de producción de materia orgánica, es una manifestación temprana de la eutrofización en muchos ecosistemas acuáticos (Smith, 2003). Cambios en la concentración de nutrientes con el subsecuente cambio en la composición de la comunidad fitoplanctónica (desde diatomeas hacia especies no-silíceas) y sus modelos estacionales, que muchas veces resultan en un cambio hacia especies oportunistas y de rápido crecimiento y/o en un incremento en la frecuencia de aparición de florecimientos de microalgas nocivas o tóxicas (Kemp et al. 2005; Korpinen y Bondsdorff, 2015), son también una respuesta del ecosistema microplanctónico frente al enriquecimiento de nutrientes en la columna de agua.

El fitoplancton responde rápidamente a los cambios en los niveles de concentración de nutrientes, por lo tanto la biomasa y la composición de especies fitoplanctónicas que muestre un determinado lugar con el avance del tiempo, pueden ser buenos indicadores del grado de eutrofización que pueda mostrar un ecosistema. En fiordos patagónicos se sugiere que el notorio incremento de la diatomea *Rhizosolenia pungens* en los sedimentos puede estar asociado a la disminución del flujo de ácido silícico desde los ríos (Rebolledo et al., 2011) y/o a la mayor cantidad de nitrato en la columna de agua producto del desarrollo de actividades acuícolas (Iriarte et al., 2012). Esta especie con bajos requerimientos de ácido silícico para su crecimiento es capaz de aprovechar la mayor concentración de nitratos y transformarse en un grupo dominante dentro de la comunidad fitoplanctónica, que además en condiciones de florecimiento provoca daños nocivos en peces de cultivo.

La hipoxia costera provocada por la eutrofización se ha descrito a través de una secuencia de eventos; inicia con el incremento en la deposición de materia orgánica, que sucesivamente promueve el crecimiento microbial y la respiración produciendo una gran demanda por el oxígeno disuelto. Los niveles de OD se agotan si la columna de agua está estratificada. En la segunda etapa la hipoxia ocurre transitoriamente, acompañada de masivas mortalidades de animales bentónicos. Con el tiempo y el aumento de nutrientes y materia orgánica en los sedimentos, una tercera fase es iniciada, y la hipoxia se vuelve estacional o periódica con ciclos de auge y caída en la población animal. Si la hipoxia persiste por años y la materia orgánica y nutrientes continua acumulándose en los sedimentos, se entra a una cuarta fase, durante la cual la zona de hipoxia se extiende y como la concentración de OD continua cayendo, la anoxia es establecida (Díaz y Rosenberg, 2008). Cuando el OD es agotado en el agua de fondo; se llega a producir la sulfato reducción generándose ácido sulfhídrico que es tóxico se acumula en el sedimento,

el sedimento se vuelve casi uniformemente negro y no hay señales de vida aeróbica (Rabalais et al., 2010).

2.4.7. Cambio climático.

La expansión de las zonas de hipoxia dependerá de cómo el cambio climático afecte la estratificación de la columna de agua y de cómo la entrada de nutrientes a los sistemas acuáticos afecte la producción de materia orgánica. Los modelos de circulación general predicen que el cambio climático por si solo podría disminuir los niveles de OD en el agua, al cambiar los patrones de precipitación e incrementar los niveles de temperatura, estratificación y la entrada de agua dulce. Contrariamente si el clima muestra un cambio en la frecuencia e incrementa la intensidad en los patrones de vientos y tormentas, la estratificación disminuirá debido a la mezcla, que a su vez oxigenará la columna de agua (Díaz y Rosenberg, 2008). En este sentido, el cambio climático con sus múltiples estresores interactúan en una compleja forma, pudiendo exacerbar; o bajo algunas condiciones, aliviar la hipoxia (Boesch, 2008; Rabalais et al., 2010).

Un aumento en la temperatura y en la entrada de agua dulce a sistemas costeros tiene el potencial de fortalecer la pycnoclina estratificando la columna de agua. Una fuerte pycnoclina resulta en una menor difusión de OD desde la columna de agua superior a la profunda, reduciendo al mínimo la cantidad de OD en aguas de fondo (Rabalais et al., 2010). El impacto que podría provocar el cambio en la frecuencia e intensidad de los vientos, está muy asociado con la época del año en que se produzcan estos cambios; ya que si el viento intensifica durante el verano, la columna de agua será mezclada disminuyendo la estratificación. Por el contrario, si durante el verano los vientos se debilitan la estratificación se fortalecerá impidiendo la oxigenación de las aguas profundas (Rabalais et al., 2010). El incremento de la precipitación puede resultar en una mayor cantidad de agua, sedimentos y nutrientes alcanzado el borde costero. Estos ingresos de material extra probablemente se traducirán en una alta estratificación de la columna de agua, que además pueden fortalecer las condiciones para un aumento o inicio de eutrofización dentro del ecosistema dado el aumento en la carga de nutrientes y sedimentos (Rabalais, 2004). Por el contrario, reducidas precipitaciones disminuirán la cantidad de agua y de nutrientes que ingresan a la zona costera, minimizando la estratificación y manteniendo la columna de agua oxigenada. No obstante, la reducida entrada de agua dulce a los ecosistemas también disminuirá el suministro de ácido silícico, alterando la composición de la comunidad fitoplanctónica hacia un incremento en la proporción de organismos flagelados y/o hacia distintas especies no silificadas (Olsen et al., 2014). Este cambio en la composición del fitoplancton podría alterar la productividad del ecosistema, disminuyendo sus niveles de producción de materia orgánica.

3. DATOS Y METODOLOGÍAS

3.1. Campañas de mediciones.

El periodo de mediciones y registro de datos continuos se extendió desde el 10 enero al 22 de noviembre del 2016. En total se realizaron 7 campañas, 4 en la zona de Melinka (suroeste del Golfo de Corcovado) y 3 en el fiordo Puyuhuapi (Figura 12). En la tabla 2 se presentan las fechas de cada campaña.

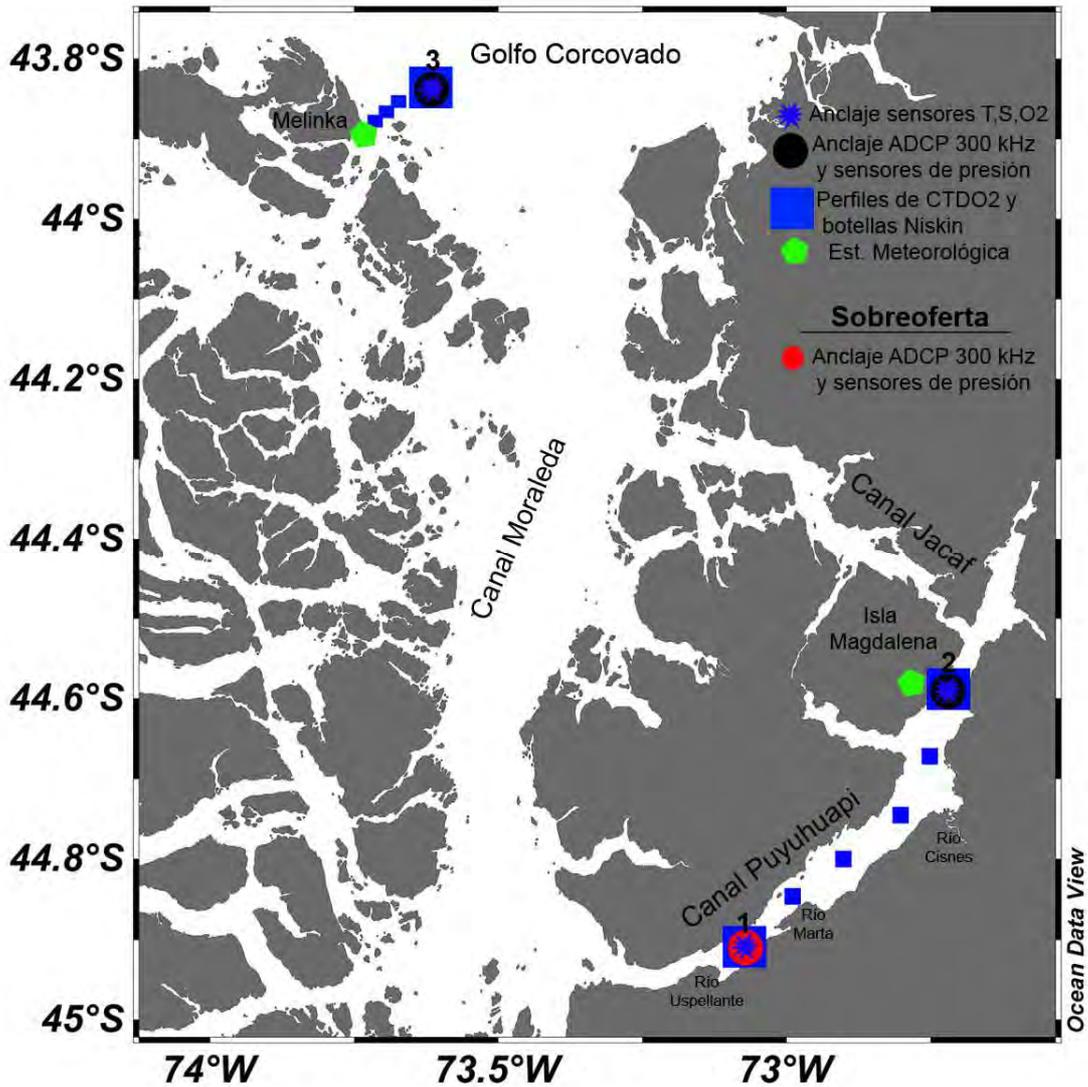


Figura 12. Sistema de anclajes y mediciones realizados durante la ejecución del proyecto. En color rojo se muestran las mediciones adicionales y anclajes de instrumentos que se realizaron como sobreofertas de trabajo.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 2. Calendario de ejecución de las campañas de mediciones y salva de datos.

Campañas	Melinka	Fiordo Puyuhuapi
1	7 al 11 de enero	-
2	-	16 al 25 de febrero
3	7 al 13 de abril	-
4	-	13 al 20 de junio
5	23 de julio al 6 de agosto	-
6	15 al 19 de noviembre	-
7	-	21 al 26 de noviembre

3.2. Datos recolectados.

En la tabla 3, se resumen los datos colectados en cada zona de estudio. Además, se adicionó el porcentaje de éxito por cada instrumento y del proyecto.

Tabla 3. Cobertura de datos colectados durante el proyecto

Actividades/datos	Meses de ejecución del proyecto-2016										
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N
Anclaje 1: Puyuhuapi sur											
Mediciones con CTD (T, S, OD, Fluo)											
Botelleo con Niskin (OD, nutrientes, salinidad)											
Nutrientes (NO ₃ , NO ₂ , PO ₄ , SiO)											
OD Winker											
Salinidad											
Registros de marea											
Corrientes ADCP-300 kHz (u, v)											
MicroCat fondo (T, S)		T	T	T	T	T	T,S	T,S	T,S	T,S	T,S
MiniDOT fondo (OD, T)											
MiniDOT/HOBO (T, S, OD)-30 m											
MiniDOT/HOBO (T, S, OD)-5 m											
Anclaje 2: Puyuhuapi norte											
Mediciones con CTD (T, S, OD, Fluo)											
Botelleo con Niskin (OD, nutrientes, salinidad)											
Nutrientes (NO ₃ , NO ₂ , PO ₄ , SiO)											
OD Winker											
Salinidad											
Registros de marea											
Información meteorológica (Ta, P.at, u,v)											
Corrientes ADCP-300 kHz (u, v)											

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Corrientes ADCP-600 kHz (u, v)												
MicroCat fondo (T, S)		T,S	T,S	T,S	T,S	T,S	T	T	T	T	T	T
MiniDOT fondo (OD, T)												
MiniDOT-120 m												
MiniDOT/HOBO (T, S, OD)-30 m												
MiniDOT/HOBO (T, S, OD)-5 m												
Boya (T, S, OD, Chl-a)-1 m												
Anclaje 3: Melinka												
Mediciones con CTD (T, S, OD, Fluo)												
Botelleo con Niskin (OD, nutrientes, salinidad)												
Nutrientes (NO ₃ , NO ₂ , PO ₄ , SiO)												
OD Winker												
Salinidad												
Registros de marea												
Información meteorológica (Ta, P.at, u,v)												
Corrientes ADCP-300 kHz (u, v)												
Corrientes ADCP-600 kHz (u, v)												
MicroCat fondo (T, S)												
HOBO (T y S)-30 m												
YSI 6600 / HOBO U26 (T, S, OD, Chl-a)-5 m												

3.3. Mediciones hidrográficas.

Las mediciones hidrográficas se realizaron en las cercanías de los anclajes 1, 2 y 3, durante los momentos de fondeo y salva de datos. Además se diseñó un muestreo en forma de transecta que se realizó de forma estacional en la zona de Melinka y durante junio en Puyuhuapi (Figura 12, cuadrados amarillos). En total se realizaron 73 estaciones (Tabla 3).

Para cumplir con estas mediciones, se utilizó un CTD SBE 25 que tiene sensores adicionales de OD y fluorescencia. En el anexo 3 se adjuntan los certificados de calibración del equipo.

A continuación se describen las principales características del CTD SBE 25:

- Equipado con sensor de temperatura (SBE 3F), de conductividad (SBE 4C), de presión (SBE 29), oxígeno (SBE 43) y fluorescencia (WeTLabs).
- Bomba sumergible de titanio (SBE 5P)
- Carcasa de aluminio hasta 6800 metros
- Memoria 8 MB
- Resolución de muestreo continua 8 Hz

Tabla 4. Características técnicas de los sensores instalados en el SBE 25.

Equipo	Sensores	Rango de medición	Resolución de los sensores
SBE 25	Presión	0-7000 m	0.015% de escala
	Temperatura	-5 a 35 °C	0.0003°C
	Conductividad	0-7 S/m	0.00004 S/m
	Oxígeno disuelto	0-120% saturación	2%
	Fluorescencia (WeTlabs)	0-125 µg/l	0.02 µg/l

3.4. Determinación del OD y salinidad.

Se obtuvieron muestras de agua de mar mediante botellas Niskin colocadas a diferentes profundidades para la medición del contenido de OD y la salinidad en la columna de agua. En la zona de Melinka se realizaron 4 perfiles de toma de muestras en las profundidades de: 0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150 metros y fondo. Mientras en Puyuhuapi se realizaron 3 perfiles en la zona sur en las profundidades de: 0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150 y 195 metros de profundidad y 3 perfiles en la zona norte en las profundidades de: 0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150 metros y fondo.

Las muestras para la determinación del contenido de OD se tomaron en enlarmeyers de 125 mL, para posteriormente analizarse mediante el método Winkler (Williams & Jenkinson 1982; Knap *et al.* 1993). Una vez tomadas, fueron fijadas de inmediato mediante la adición de 1 ml de solución de Cloruro de Manganeso ($MnCl_2$) seguido por 1 ml de solución, compuesta por Yoduro de Sodio (NaI) e Hidróxido de Sodio (NaOH). Posteriormente, las muestras fueron acidificadas adicionandoles 1 ml de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4), para liberar una cantidad de yodo equivalente al contenido de OD de la muestra. El yodo liberado fue determinado por yodometría mediante una solución de tiosulfato de sodio de concentración conocida, mediante una bureta motorizada (Dosimat 865). Para la determinación del punto final, se usó un sistema de titulación automática (AULOX), el que entrega directamente la concentración de oxígeno de la muestra.

Las mediciones de la salinidad in-situ se realizaron usando un salinómetro Guildline, modelo Autosal 8400B. Rango de medida: $0,004-76 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, equivalentes a 0.005 a 42 unidades prácticas salinas, con una resolución de $\pm 0,0001 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (a $S=35^\circ\text{C}$ y 15°C). Exactitud $\pm 0,003$ unidades de salinidad práctica. Las mediciones del salinómetro Autosal se estandarizan con muestras de agua de mar estándar, según lo establecido por la Asociación Internacional para ciencias Físicas del Océano (IAPSO, siglas en Inglés).

3.5. Análisis de los nutrientes.

Las muestras para el análisis de los nutrientes (Nitrato, Nitrito, Fosfato y ácido Silícico) se tomaron desde las botellas Niskin, después de la toma de las muestras para los análisis de oxígeno disuelto y salinidad. Las muestras, se guardaron sin filtrar, en botellas asépticas de polietileno de alta densidad, a -20°C (Metodología WOCE-JGOFS: Gordon *et al.*, 1993). Posteriormente, el Nitrato, Fosfato y ácido Silícico fueron analizados en el laboratorio de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso mediante un autoanalizador de nutrientes, de acuerdo a Atlas *et al.* (1971). Simultáneamente, se tomaron muestras adicionales para la medición de Nitritos, las que fueron analizadas en laboratorio del CIEP a través de espectrofotometría, de acuerdo a la metodología descrita en Strickland and Parsons (1968).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

3.6. Anclaje de estaciones oceanográficas.

3.6.1. Melinka.

El anclaje de instrumentos en la zona de Melinka (Figura 12) se extendió desde el 8 de enero al 16 de noviembre del 2016. En total los registros abarcaron 304 días y se realizaron 4 procesos de salva de datos separados cada 3 meses aproximadamente (Tabla 5). En la tabla 6 y 7 aparecen las características técnicas de los instrumentos instalado y en la figura 13 y 14 el diseño y fotos de las operaciones de trabajo.

Tabla 5. Información del anclaje de Melinka y salva de datos.

Fecha Instalación	Profundidad (metros)	Latitud (sur)	Longitud (oeste)	Instalación de sensores			
				~7 m	~30m	~40 m	10m del fondo
08/01/2016 13:30	161	43°52.866'	73°31.700'	HOBO U-26 YSI 6600	HOBO U-24	ADCP 600 ADCP 300	MicroCat MiniDO ₂ T
10/04/2016 13:50	170	43°52.905'	73°31.121'	HOBO U-26 YSI 6600	HOBO U-24	ADCP 600 (roto) ADCP 300	MicroCat MiniDO ₂ T
02/08/2016 11:30	168	43°52.870'	73°31.337'	Perdida	Perdida	ADCP 300	MicroCat MiniDO ₂ T
16/11/2016 13:55	Leva de anclaje			Perdida	Perdida	ADCP 300	MicroCat MiniDO ₂ T

Tabla 6. Características técnicas de los equipos instalados en el anclaje de Melinka.

Equipos	Sensores	Intervalo de Medición (minutos)	Rango de medición	Resolución de los sensores
HOBO U-24-002-C	Temperatura	60	-2 a 36 °C	0.01°C
	Conductividad	60	-100 a 10000 µS/cm -5000 a 55000 µS/cm	2 µS/cm
MiniDO ₂ T	Temperatura	60	0 a 30 °C	0.01°C
	Oxígeno disuelto	60	0-150 % saturación	0.05 µmol/l
MicroCat SBE 37	Temperatura	20	-5 a 45 °C	0.0001°C
	Conductividad	20	0-70000 µS/cm	0.1 µS/cm
	Presión	20	0-350 m	0.002% del rango
YSI 6600 V2-4	Temperatura	60	-5 a 50 °C	0.01°C
	Conductividad	60	0-100000 µS/cm	1 µS/cm
	Presión	60	0-200 m	0.001 m
	Clorofila-a	60	0-400 µg/l	0.1 µg/l

Tabla 7. Especificaciones técnicas de los ADCP instalados en el anclaje de Melinka.

Especificaciones técnicas/configuración	ADCP, RDI	
	600 kHz (anclaje 3)	300 kHz (anclaje 1, 2 y 3)
Rango de velocidad	±20 m/s máximo	±20 m/s máximo
Resolución de velocidad	0.1 cm/s	0.1 cm/s
Precisión de la velocidad	0.3% relativo a velocidades de ±0.3 cm/s	0.5% relativo a velocidades de ±0.5 cm/s
Tamaño de celda	1 m	1 m
Rango de medición	50 m	119 m
Desviación estándar	1.8 cm/s	3.7 cm/s
Intervalo de medición	60 minutos	60 minutos
Orientación del equipo	Hacia arriba	Hacia abajo
Cantidad de pines	240	240
Columna de agua a medir	50 m	120 m

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

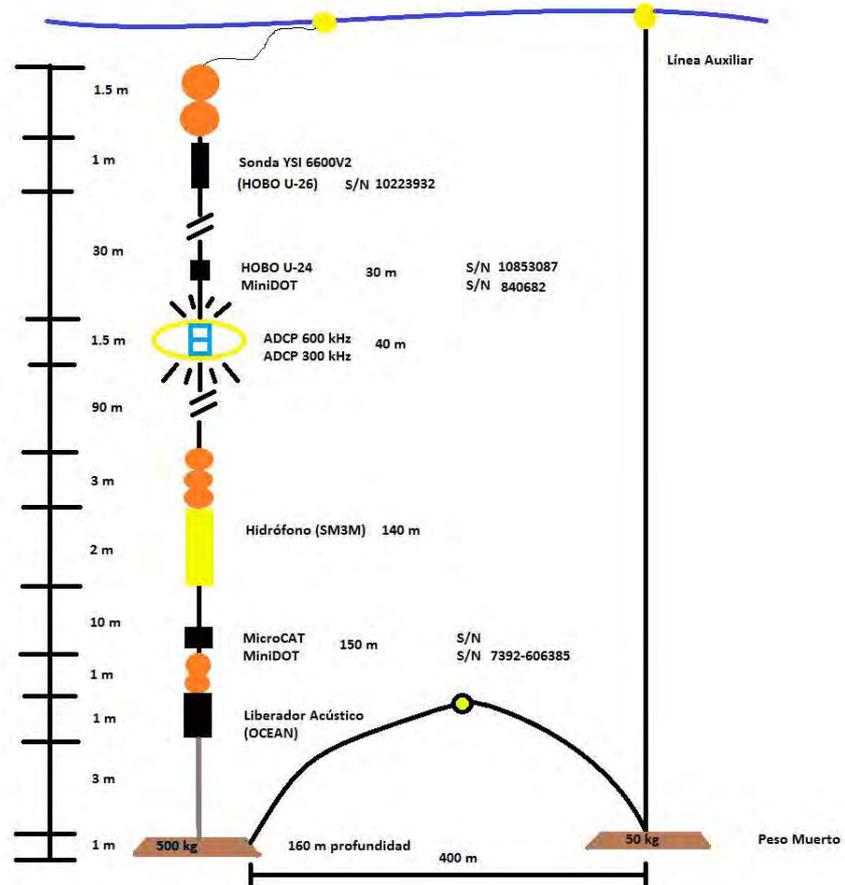


Figura 13. Diseño del anclaje oceanográfico en Melinka. El ADCP de 600 presentó problemas.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



Figura 14. Fotos que muestran la instalación de la estación meteorológica en Melinka, la maniobra del anclaje oceanográfico y del muestreo in-situ.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

3.6.2. *Fiordo Puyuhuapi.*

El anclaje de instrumentos en el fiordo Puyuhuapi (Figura 12) se realizó entre el 19 y 20 de febrero del 2016. En total los registros abarcaron 280 días aproximadamente y se realizaron 2 procesos de salva de datos separados cada 5 meses (Tabla 8 y 9). En la tabla 6 y 7 aparecen las características técnicas de los instrumentos instalados y en las figuras 15 y 16 se presenta el diseño de los anclajes.

Tabla 8. Información del anclaje sur.

Fecha/hora	Prof. (metros)	Latitud (sur)	Longitud (oeste)	Instalación de sensores			
				~4 m	~30m	~70 m	~198 m
19/02/2016 07:00	208	44° 55.308'	73° 06.631'	HOBO U-24 MiniDOT	HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 300	MicroCat MiniDOT
15/06/2016 16:00	204	44° 55.500'	73° 06.820'	HOBO U-24 MiniDOT	HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 300	MicroCat MiniDOT
24/11/2016 17:27	Leva de los instrumentos			HOBO U-24 MiniDOT	HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 300	MicroCat MiniDOT

Tabla 9. Información del anclaje norte.

Fecha/hora	Prof. (metros)	Latitud (sur)	Longitud (oeste)	Instalación de sensores				
				~3 m	~30m	~94 m	~120 m	~210 m
20/02/2016 07:00	220	44° 35.343'	72° 42.488'	HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 600 HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 300 HOBO U-22	MiniDOT	MicroCat MiniDOT
16/06/2016 15:30	240	44° 35.250'	72° 42.400'	HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 600 HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 300 HOBO U-22	MiniDOT	MicroCat MiniDOT
25/11/2016 21:00	Leva de los instrumentos			HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 600 HOBO U-24 MiniDOT	ADCP 300 HOBO U-22	MiniDOT	MicroCat MiniDOT

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

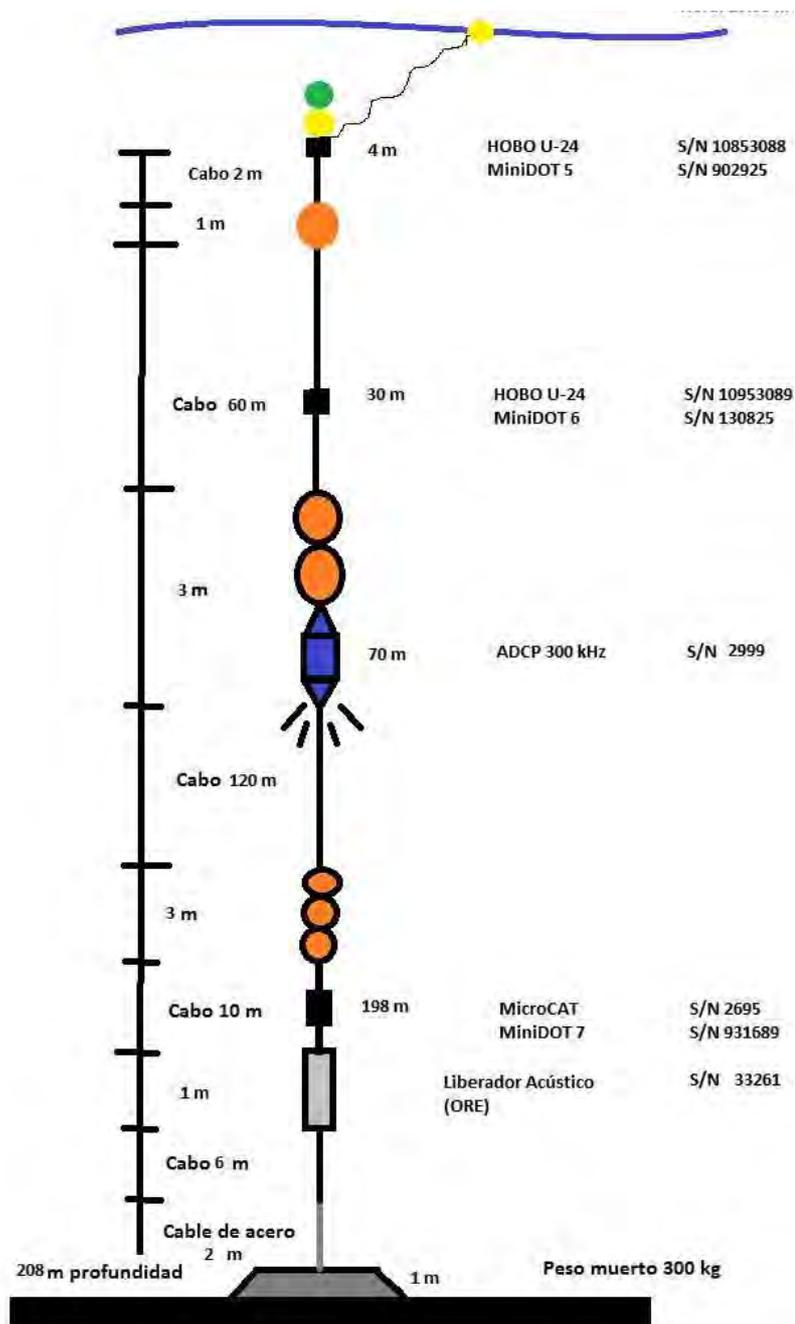


Figura 15. Diseño del anclaje oceanográfico en el sur del fiordo Puyuhuapi

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

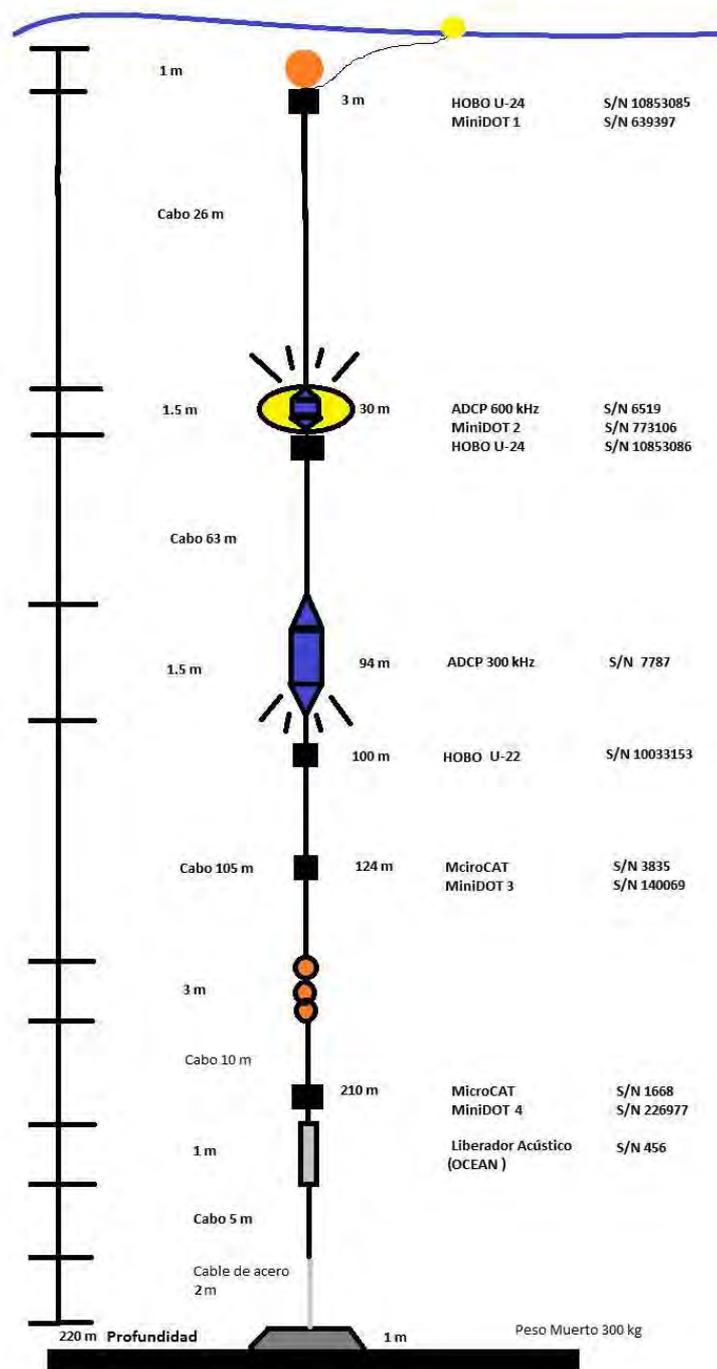


Figura 16. Diseño del anclaje oceanográfico en el norte del fiordo Puyuhuapi

3.7. Mediciones de marea.

Para el estudio del comportamiento de la marea en la región de Melinka se extrajeron los datos de del sensor de presión del MicroCat SBE-37 instalado a 10 metros del fondo. Los datos fueron colectados en tres series: (1) a 147 metros de enero a marzo, 2016, (2) de marzo a agosto en 150 metros y (3) de agosto a noviembre a 143 metros. Las series fueron normalizadas y se logró formar una serie continua del nivel del mar para su posterior análisis. Las coordenadas de las series corresponden al anclaje de Melinka (tabla 5).

En el fiordo Puyuhuapi se instalaron sensores de presión tipo HOBO U20-001-03 (rango de profundidad, 0-76.5 m y resolución de 0.86 cm). En la tabla 10 aparecen la información de este fondeo.

Tabla 10. Información de la instalación de sensores de presión en el fiordo Puyuhuapi.

Sector sur (5 metros)			Sector norte (6 metros)		
Fecha/hora	Latitud (sur)	Longitud (oeste)	Fecha	Latitud (sur)	Longitud (oeste)
19/02/2016 16:30	44° 54' 36.2"	73° 06' 52.3	21/02/2016 13:30	44° 35' 28.9"	72° 44' 13.1"

En el cálculo de la amplitud y fase de la marea se utilizó la metodología descrita por Pawlowicz et al., (2002), donde considera además los algoritmos de Godin (1972, 1988) y Foreman (1977, 1978), utilizando álgebra compleja. El error empleado en el análisis armónico fue el lineal, obteniendo la amplitud y frecuencia de los armónicos con 95 % de intervalo de confianza. El régimen de marea se cálculo a través de la relación de las amplitudes de cuatro de las principales constantes armónicas (O_1 , K_1 , M_2 , S_2), según SHOA PUB 3013.

3.8. Mediciones meteorológicas.

El estudio de las condiciones meteorológicas en el fiordo Puyuhuapi se realizó utilizando la información proveniente de una estación meteorológica instalada actualmente en el muelle de la Isla Magdalena (44° 35' 28'' Sur y 72° 44' 13'' Oeste). La estación meteorológica es del tipo HOBO U-30 y se encuentra trabajando con resolución temporal de 15 minutos desde el 10 de abril del 2014 (Tabla 11). En la región de Melinka se instaló una estación similar en enero del 2016 en el muelle de la Capitanía de Puerto de Melinka (43°53'48.80"S/ 73°44'57.44"O).

Tabla 11. Características técnicas de la estación meteorológica HOBO U-30.

Estación HOBO U30-UTH	Sensor	Modelo	Unidad de medida	Precisión
Módulo atmosférico	Velocidad viento	Young 05106	m/s	0.3
	Dirección viento	Young 05106	grados	± 3
	Temperatura del aire	S-THB-M002	°C	± 0,2
	Humedad relativa	S-THB-M002	%	2.5
	Presión	S-BPB-CM50	mb	0.1
	Radiación solar	S-LIB-M003	W/m2	0.1
	Precipitación	S-RGB-M002	mm	0.2

3.9. Análisis de datos de corriente marinas de ADCP.

En la zona de Melinka, se instaló un arreglo de correntómetros con la finalidad de efectuar la descripción de las corrientes del sector. A una profundidad de 40 m desde la superficie se instaló un correntómetro perfilador acústico Doppler (ADCP) Teledyne RD Instruments modelo WH-300, el cual registró hasta una profundidad de 160 m el comportamiento de las corrientes (Figura 13). En el fiordo Puyuhuapi se instalaron tres perfilador acústico Doppler (ADCP) Teledyne RD Instruments, dos del modelo WH-300 y uno del modelo WH-600. El diseño y posición de los instrumentos se puede observar en las figuras 15 y 16. Con los vectores de corrientes se efectuaron análisis estadísticos utilizando la nomenclatura expuesta en la tabla 12.

Tabla 12. Rangos de direcciones consideradas en este reporte.

Rumbos	dirección >	dirección ≤	Marca de clase (°)
N	337.5	22.5	0
NE	22.5	67.5	45
E	67.5	112.5	90
SE	112.5	157.5	135
S	157.5	202.5	180
SW	202.5	247.5	225
W	247.5	292.5	270
NW	292.5	337.5	315

Los análisis realizados correspondieron, en general, a un análisis de frecuencia y dirección de las corrientes y un análisis de dispersión de las componentes ortogonales U (Este-Oeste) y V (Norte-Sur). Además, se incluyeron los diagramas de vector progresivo (PVD) y el comportamiento de los vectores corrientes en el tiempo (Diagramas de Trazos). La densidad espectral de las componentes se estimó mediante el cálculo del espectro de Welch (1967). En este método se estimó el espectro promedio de “n” trozos, de esta forma los grados de libertad son iguales a dos veces el número de trozos. Todas las estimaciones espectrales se efectuaron con 12 grados de libertad en una ventana espectral de 5 días aproximadamente.

Para una descripción más detallada de las corrientes del sector se graficaron los contornos de las componentes U y V y los perfiles de corrientes media asociados. La importancia de las mareas se estimó mediante el ajuste armónico sugerido por Foreman (1992) y modificado por Pawlowicz et al., (2002). Con el objetivo de efectuar un análisis de las corrientes sin la influencia de la marea se procedió a suavizar las series con un filtro pasa bajos Coseno-Lanczos de amplitud media de 40 horas, las series filtradas se presentan como contornos de intensidad de las componentes U y V.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

El análisis de las corrientes consideró únicamente magnitudes mayores a 1 cm/s. Además, las direcciones (inicialmente orientadas al norte magnético) fueron corregidas por la desviación magnética local (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/Declination.jsp>). Los datos de ADCP presentan una serie de controles de calidad internos dados por el fabricante. Sin embargo, los datos escapados pueden eventualmente presentarse. Para eliminar outliers se procedió a analizar la magnitud de cada una de las celdas. El informe presenta los resultados resumidos de algunas celdas representativas (8 ó 12), las cuales tienen como criterio mostrar el comportamiento de las corrientes en diferentes sectores de la columna de agua.

Se usaron los datos de presión atmosférica de las estaciones meteorológicas instaladas en Melinka y la isla Magdalena para establecer la relación de los forzantes atmosféricos con las corrientes profundas. Todas las series de tiempo fueron filtradas para eliminar la influencia de la marea, utilizando un filtro pasa bajos Coseno-Lanczos de amplitud media de 40 h. Completado este paso se realizó una correlación cruzada. Las correlaciones positivas se han graficado en rojo, y las negativas en azul. La línea segmentada negra indica el background de correlación.

3.10. Información de mortalidad de SERNAPESCA y otras fuentes.

En coordinación con SERNAPESCA se obtuvo un catastro de los centros de cultivo que fueron afectados con mortalidades de peces debido a las bajas concentraciones de oxígeno disuelto. Los datos pertenecen en su mayoría al fiordo Puyuhuapi (Figura 17) y fueron colectados durante los años 2014, 2015 y 2016 (Tabla 13). La información analizada corresponde al promedio del número de peces y mortalidad que se registró por cada semana, en cada uno de los centros afectados. Sin embargo, no fue posible acceder a la información de los valores de OD que generaron las mortalidades reportadas.

Tabla 13. Empresas reportadas por SENAPESCA con eventos de mortalidades por baja de OD en el fiordo Puyuhuapi.

Empresas	Código de los centros de cultivos afectados	Reporte de mortalidades por baja de oxígeno disuelto		
		2014	2015	2016
Acuícola Puyuhuapi S.A.	110106	x		
Aqua Chile S.A.	110111,111873,110110	x	x	x
Exportadora Los Fiordos Ltda.	10201,110703, 110068, 110059, 110131,110069,110058,110071, 110294,11074	x	x	x
Salmones Multiexport S.A.	110726,110519,110268		x	
Tornagaleones S.A.	110152, 110692, 110106,11021	x	x	x
Puerto Aguirre S.A.	110302		x	

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

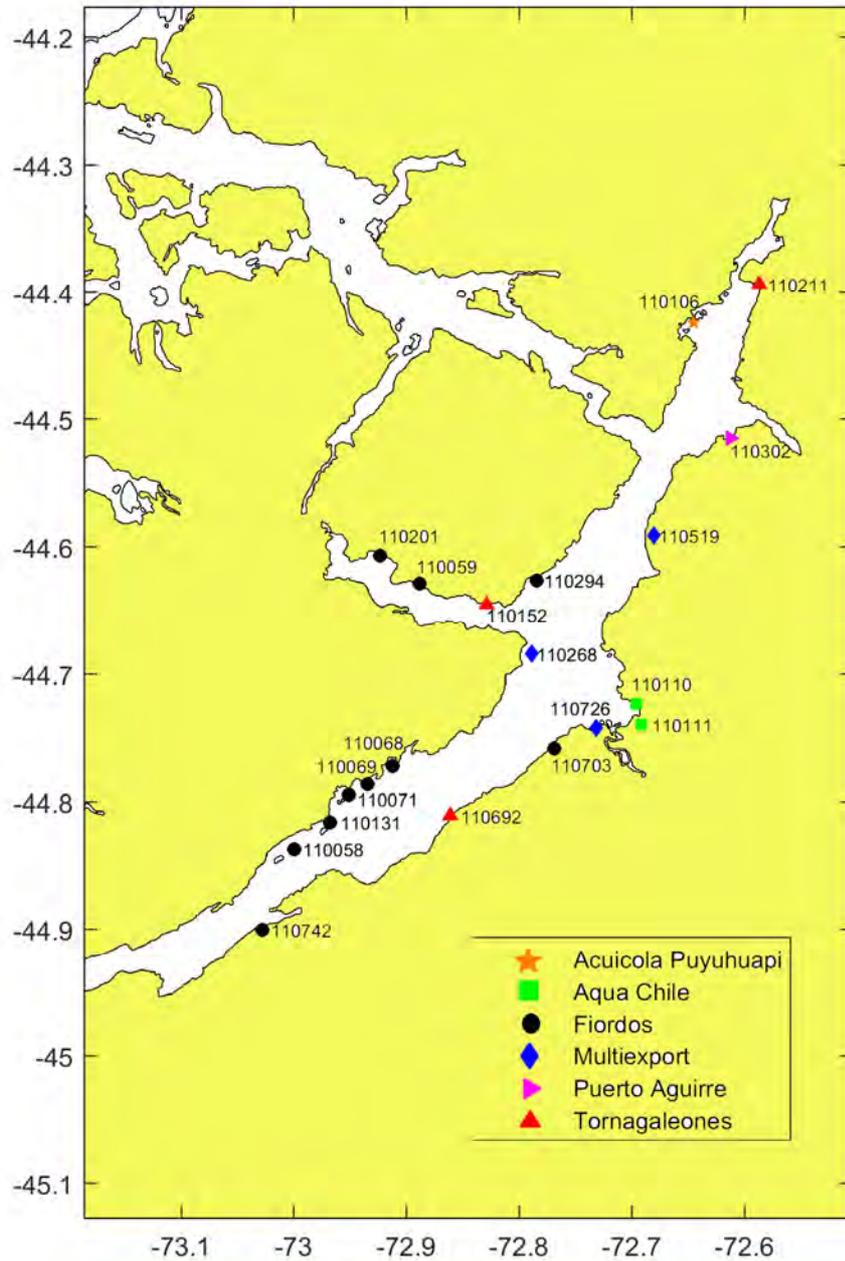


Figura 17. Ubicación geográfica de los centros de cultivo identificados con mortalidad de peces por baja de oxígeno en el área de estudio durante el año 2014, 2015 y 2016.

4. RESULTADOS

4.1. Características hidrográficas obtenidas en las cercanías de Melinka.

Los muestreos alrededor del punto de fondeo cubrieron las cuatro temporadas del año 2016, realizando en total 12 estaciones hasta la profundidad aproximada de 160 metros (Figura 18). La posición de los perfiles se mantuvo alrededor de los $43^{\circ} 52' 50''$ $73^{\circ} 31' 40''$.

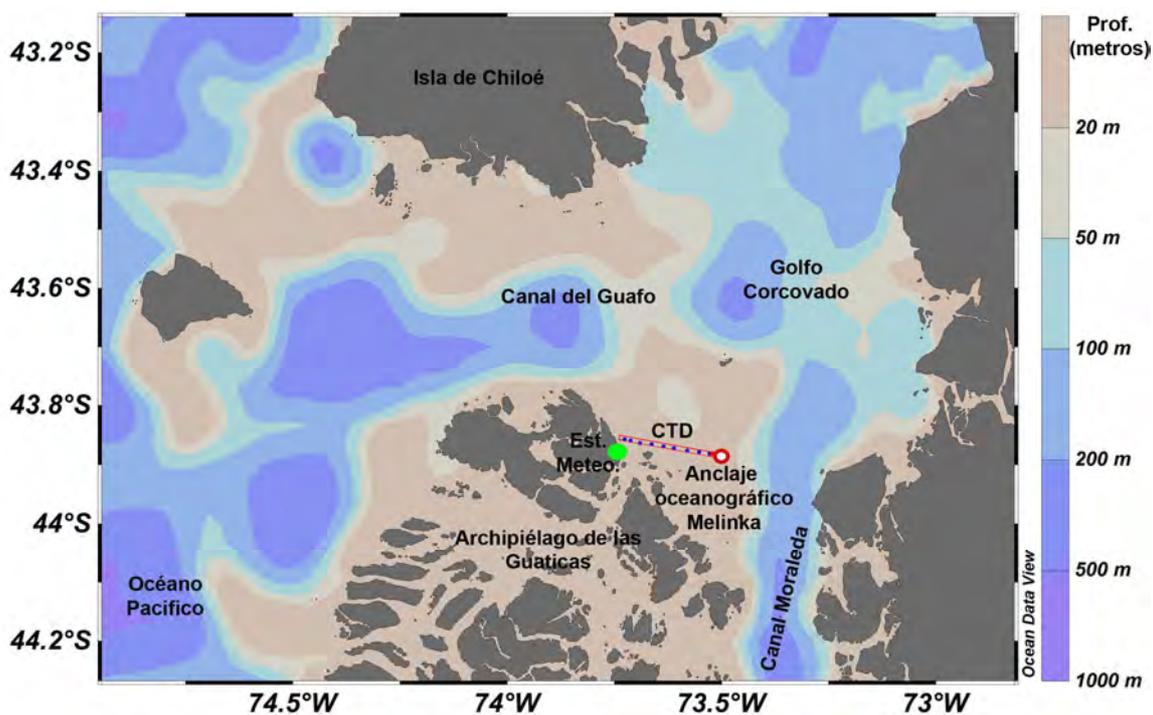


Figura 18. Zona de muestreo en la región de Melinka. En círculo rojo aparece la posición del anclaje oceanográfico, en azul la transecta de CTD y en verde la estación meteorológica.

Los perfiles hidrográficos realizados en la zona suroeste del Golfo del Corcovado mostraron claras diferencias estacionales (Figura 19). Las temperaturas más altas en superficie se registraron durante el verano con valores entre los $13-15^{\circ}$ C. En esta misma estación se destacó un incremento sub-superficial de la temperatura entre los 40-60 m, debido presuntamente a la advección de aguas cálidas desde el océano adyacente. Con la profundidad la temperatura del agua descendió hasta $\sim 9^{\circ}$ C cerca del fondo (160 m). Durante el invierno el perfil de temperatura del agua registro un comportamiento homogéneo con valores alrededor de los 10° C.

La salinidad del agua se incrementó desde la superficie hasta el fondo (30-34.3 g/kg) y el agua estuarina salada solo ocupó los primeros 5 metros de la columna de agua durante el verano. A partir de este nivel y hasta los ~ 60 m se situó el ASAAM y después hasta los ~ 100 m el ASAA, con la excepción del otoño y el invierno donde el ASAA estuvo

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

en la superficie. Desde los 100 m y hasta el fondo (~160 m), el AESS se hizo presente. Sin embargo, en invierno no se observó, siendo los valores de salinidad inferiores a 34.

El OD fue alto en la superficie durante el verano, con un rango entre 7-8 mL/L y porcentaje de saturación por encima de 100%. Con la profundidad sus valores descienden hasta llegar a valores cercanos a la hipoxia (2 mL/L, 30 % de saturación) en el verano y el otoño, coincidiendo con la presencia del AESS. En invierno, nuevamente las condiciones cambian y el OD profundo aumento hasta 4 mL/L y 60 % de saturación, evidenciando un proceso de ventilación profundo que se mantiene hasta la primavera, pero concentraciones más bajas (3 mL/L).

La fluorescencia del agua fue significativamente alta en primera y verano (40-50 mg/m³). Sin embargo, lo más notorio fue el espesor que alcanzó la capa de valores altos de fluorescencia, extendiéndose hasta ~40 metros. Durante otoño e invierno los valores fueron muy bajos, cercanos a los 5 mg/m³.

Para el análisis del OD se tomaron muestras de agua usando botellas Niskin en los niveles 0, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 200 m. En cada nivel se tomaron 4 réplicas. Posteriormente se realizaron los análisis en el laboratorio del Centro de Investigaciones de Ecosistemas de la Patagonia (CIEP). En la figura 31 se muestran los resultados obtenidos en Melinka durante la toma de datos de CTD. Como se puede observar la similitud de ambos resultados es alta sobre todo para los registros cerca del fondo.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

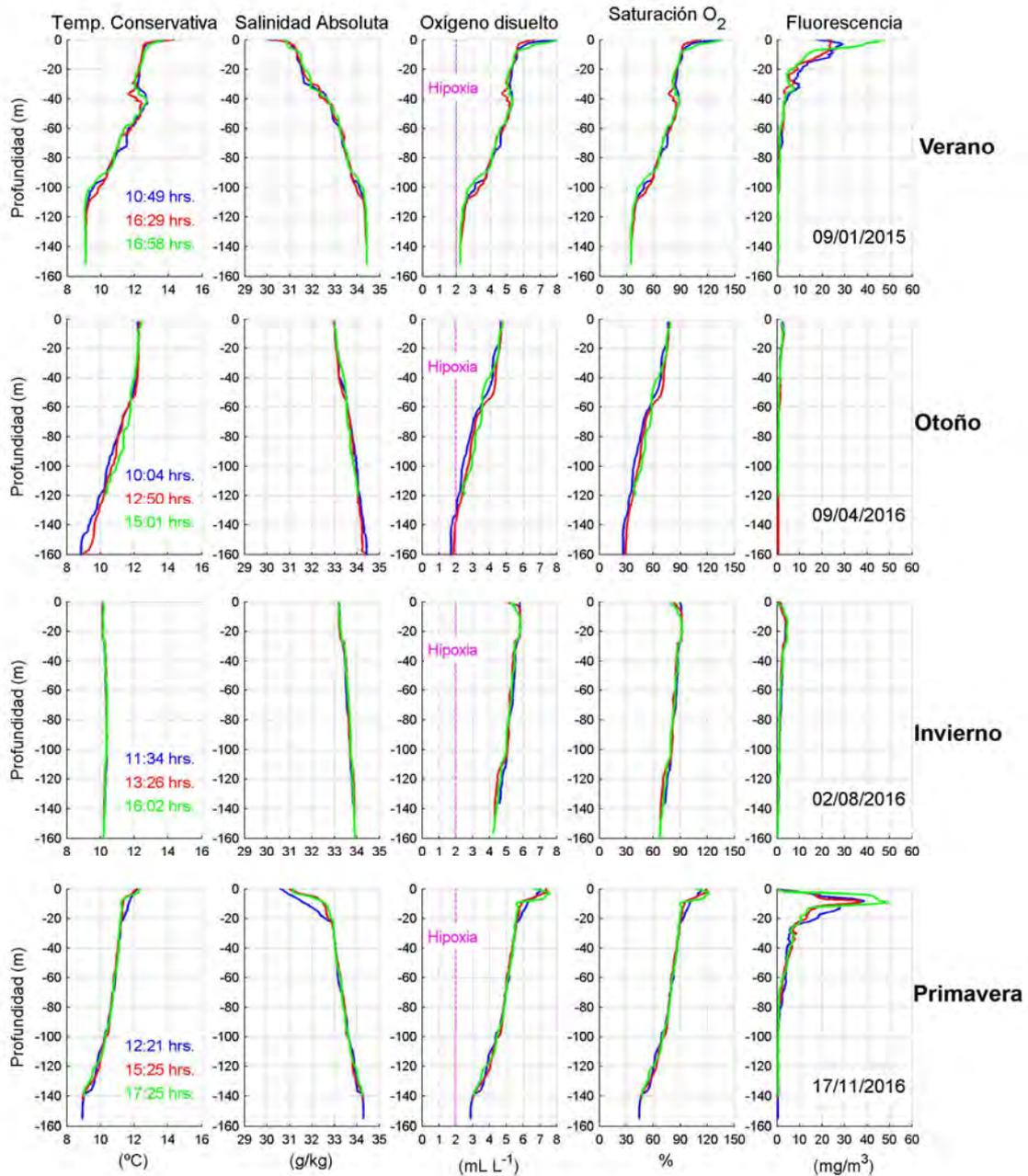


Figura 19. Perfiles de la temperatura conservativa, salinidad absoluta, OD y fluorescencia obtenidos durante las cuatro estaciones del año 2016 en las cercanías de isla de Melinka al sur oeste del Golfo de Corcovado.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

En la figura 20 se muestran los resultados obtenidos del OD y la salinidad del CTD en la campaña de enero del 2016 en la zona de Melinka. Conjuntamente con estas mediciones y cumpliendo con unas de las actividades de este proyecto, se corrigieron los perfiles de ambas variables usando el método de Winkler para el OD y las mediciones en laboratorio de la salinidad. El proceso de corrección de los datos se basó en un ajuste del tipo lineal. Los valores de la regresión lineal estuvieron altos con $r^2=0.95$ y 0.98 , por tanto el resultado final fue muy satisfactorio, indicando la calidad y confiabilidad de los datos entregados por el CTD utilizados en las 7 campañas hidrográficas. Este proceso se repitió en las campañas restantes, obteniéndose de igual forma valores de r^2 altos (Anexos 4-6).

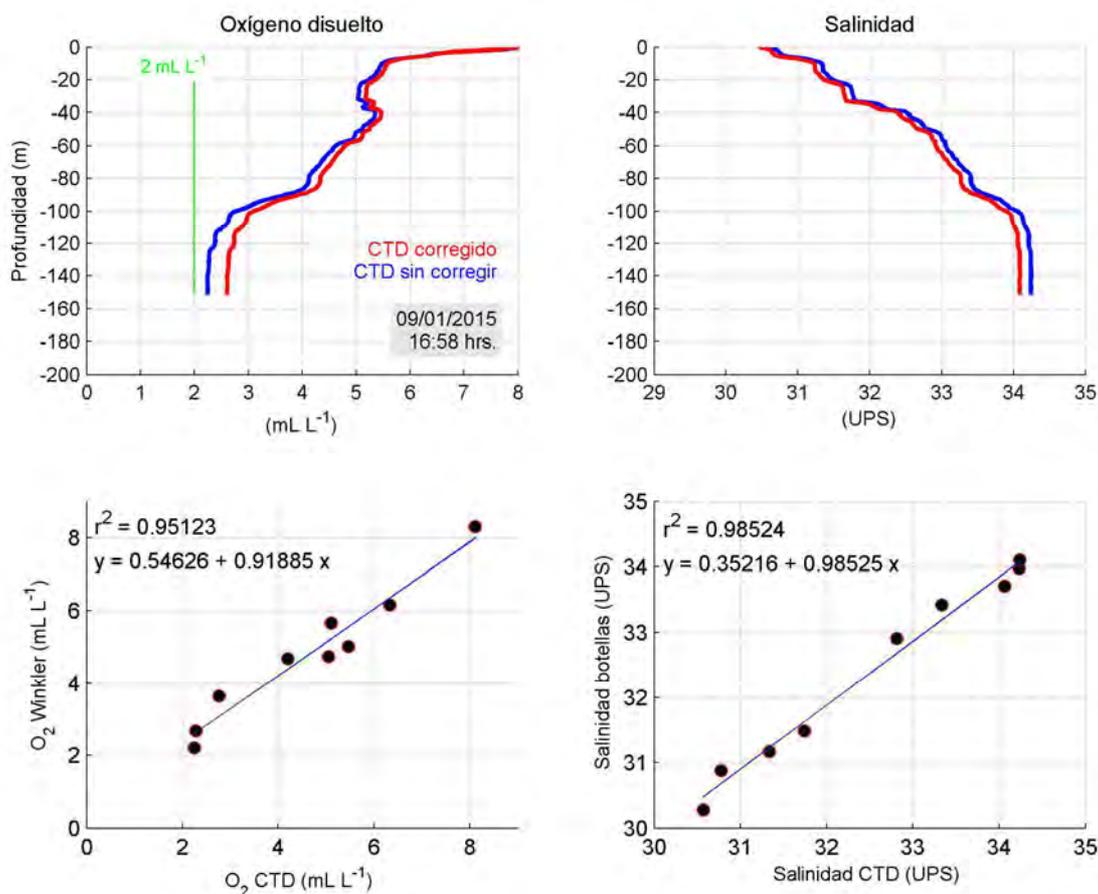


Figura 20. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 9 de enero 2016 en la campaña Melinka-1.

Como complemento a las mediciones hidrográficas en este punto se decidió realizar un transecta hidrográfico desde la posición del anclaje hasta la costa (Figura 21). La idea de estas mediciones fue observar el comportamiento vertical y espacial de los valores bajos de OD asociados al AESS. El máximo de estaciones realizadas fue 9, reduciéndose a 7 en algunas campañas debido a las condiciones del tiempo. Es importante destacar que estas mediciones fue un trabajo extra realizado por el grupo de investigadores del proyecto, no estando contemplado estos resultados como Sobreoferta.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

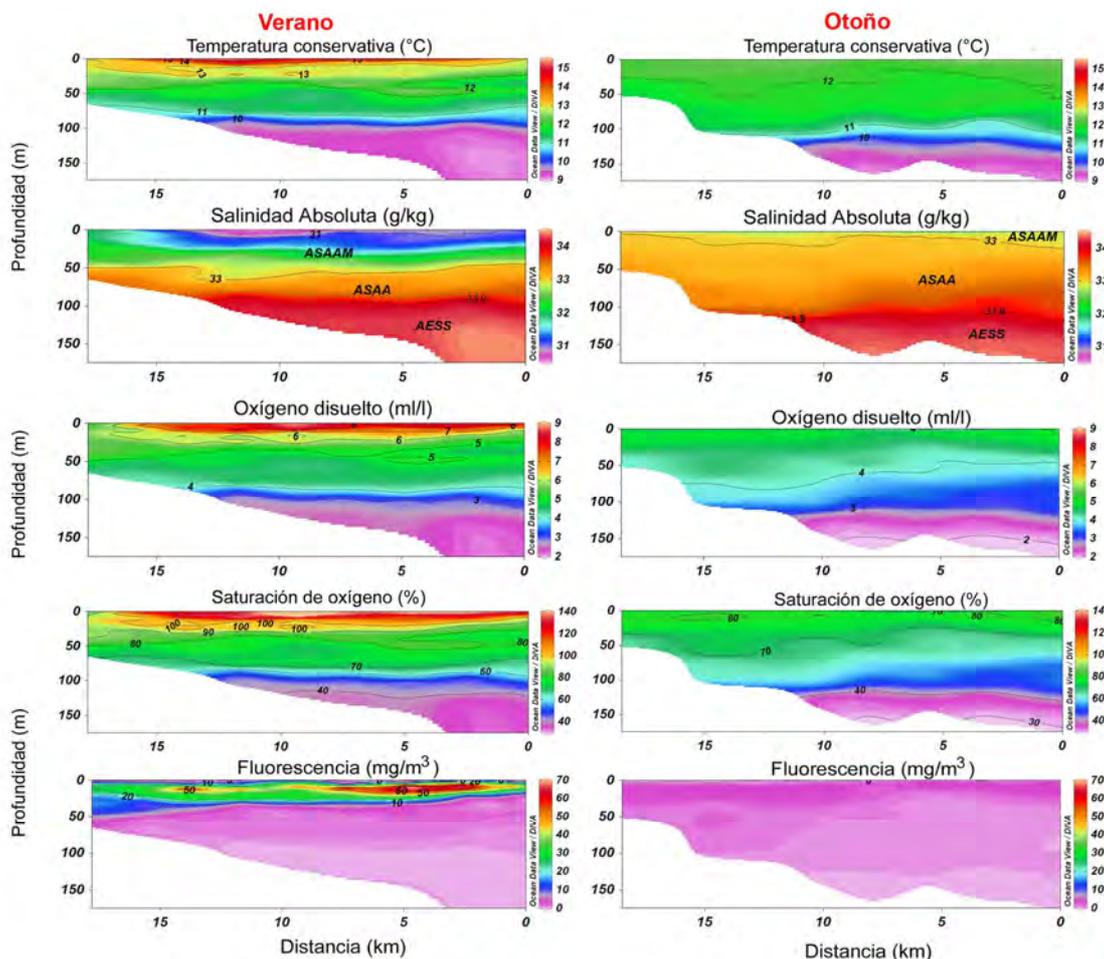


Figura 21. (Panel izquierdo), transecta hidrográfico realizado desde el punto del anclaje hacia la costa el 10 de enero del 2016 en las cercanías de la isla de Melinka. (Panel derecho) el mismo transecta pero realizado el 11 de abril 2016. El criterio usado para la definición de las masas de agua fue la salinidad (Guzmán y Silva, 2002; Sievers, 2006 y Sievers y Silva 2008), definiéndose el agua Subantártica modificada (ASAAM, salinidad entre 31-33 g/kg), el agua subantártica (ASAA, Salinidades entre 33-33.9 g/kg) y el agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS, salinidades mayores a 33.9).

El muestreo estacional en la sección anclaje-costa mostró en general las mismas diferencias estacionales registradas en los perfiles cerca del anclaje (Figura 21 y 22). La situación más peculiar sigue siendo la estación de invierno, donde las condiciones homogéneas de la columna de agua se observaron en toda la zona medida. El ASAA dominó toda la columna de agua con valores entre 33 y 33.8 y el OD profundo mostró valores de saturación entre los 60 y 70 % muy lejos de la hipoxia. Por otro lado, los valores bajos de OD cercanos a la hipoxia (verano) y debajo de la hipoxia (otoño) se mantuvieron cerca del fondo y no mostraron un ascenso hacia la costa. Durante el verano y el invierno los valores bajos de OD coincidieron con la posición del AESS. Sin embargo, durante la primavera también se observó la presencia del AESS y los valores de OD estuvieron entre

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

3-4 mL/L con 50-70 % de saturación. Otro de los aspectos significativos fue el espesor mostrado por la capa de valores altos de fluorescencia que se extendió durante el verano hasta los 50 metros en la costa, con máximos de 68 mg/m³ (Figura 21). En primavera se localizaron igualmente los máximos en la zona oceánica cerca del anclaje con máximos de 49 mg/m³ (Figura 22).

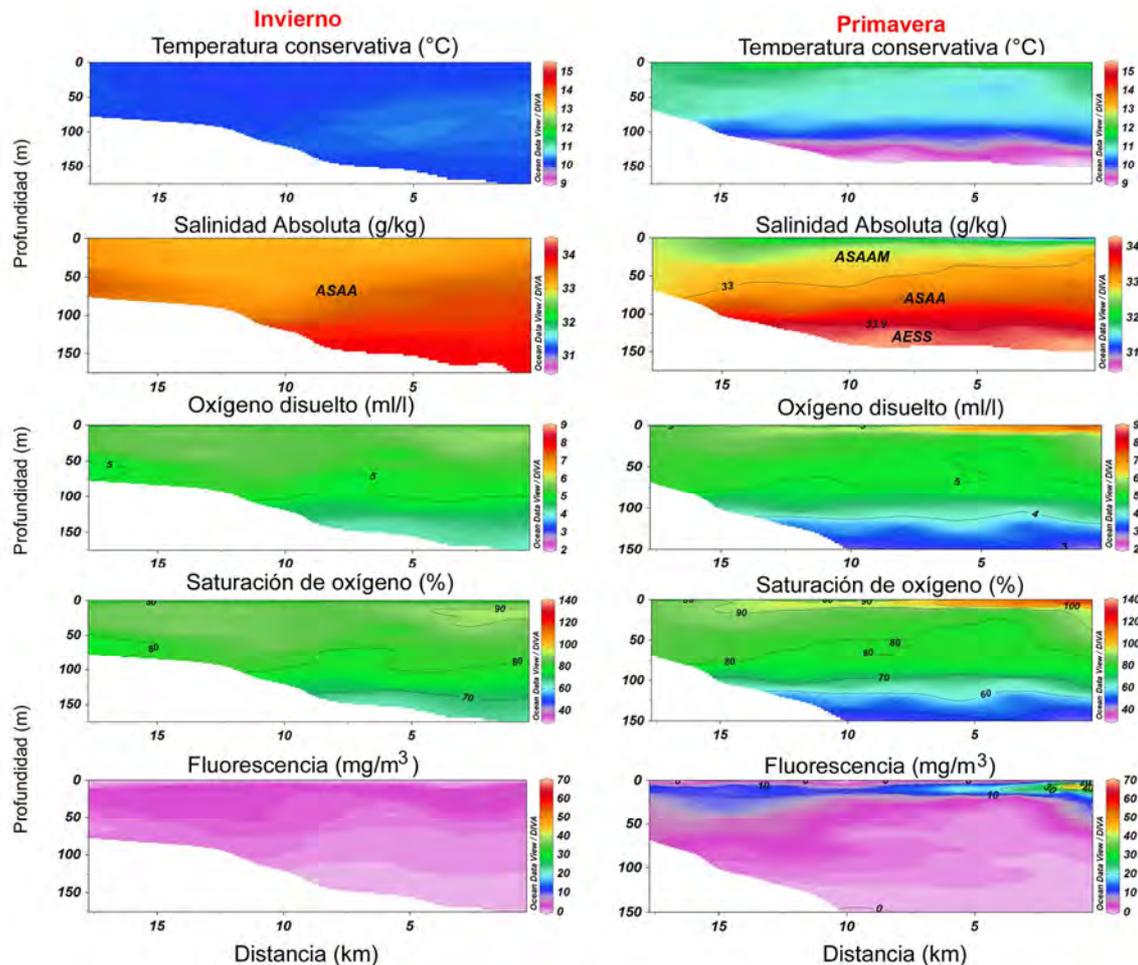


Figura 22. (Panel izquierdo), transecta hidrográfico realizado desde el punto del anclaje hacia la costa el 2 de agosto del 2016 en las cercanías de la isla de Melinka. (Panel derecho) el mismo transecta pero realizado el 17 de noviembre 2016. El criterio usado para la definición de las masas de agua fue la salinidad (Guzmán y Silva, 2002; Sievers, 2006 y Sievers y Silva 2008), definiéndose el agua Subantártica modificada (ASAAM, salinidad entre 31-33 g/kg), el agua subantártica (ASAA, Salinidades entre 33-33.9 g/kg) y el agua Ecuatorial Subsupsuperficial (AESS, salinidades mayores a 33.9).

4.2. *Características hidrográficas obtenidas en el fiordo Puyuhuapi.*

En el fiordo Puyuhuapi se realizó un muestreo puntual de la hidrografía en su zona sur (44.922° Sur / 73.11° Oeste), en los alrededores del anclaje oceanográfico ubicado en este sector (Figura 24). Siguiendo el mismo procedimiento se muestreo en la zona norte (44.586° Sur / 72.721° Oeste), alrededor del anclaje norte (Figura 23). En cada sitio se realizaron 3 perfiles desde la superficie hasta el fondo, abarcando los meses de febrero, junio y noviembre 2016. En total se realizaron 18 perfiles.

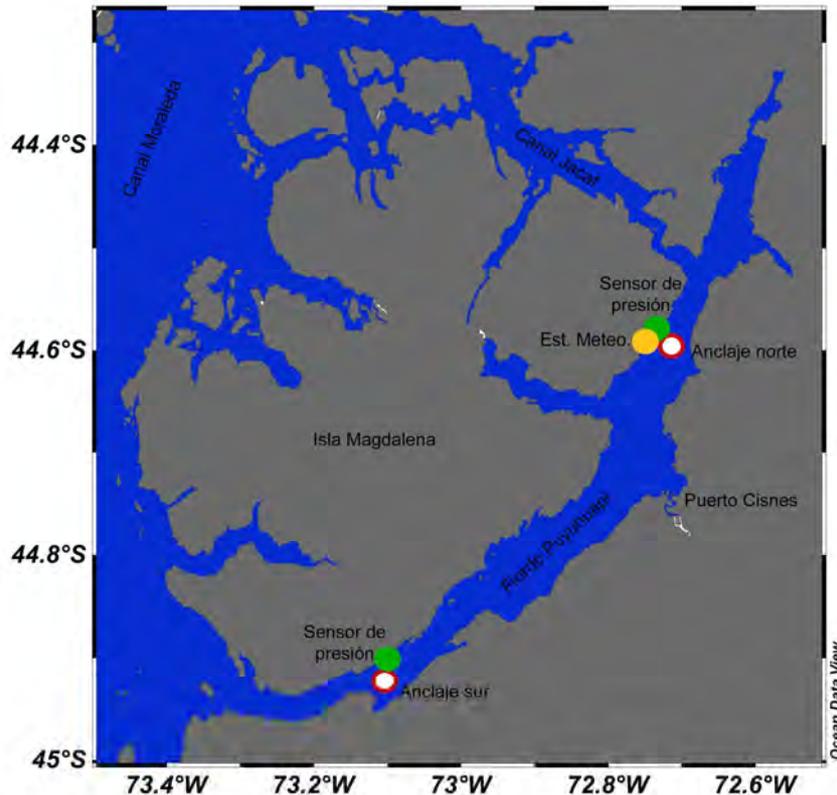


Figura 23. Ubicación de las estaciones oceanográficas en el fiordo Puyuhuapi.

En ambos lugares (norte y sur) la temperatura del agua tuvo un comportamiento similar en cada una de las estaciones del año muestreadas (Figura 24 y 25). Tanto en verano como en primavera, las temperaturas disminuyeron desde la superficie hasta el fondo de 16° C a 9° C. Tanto en verano como en la primavera se registraron los máximos térmicos en la superficie. Durante el otoño, debido a la pérdida de calor superficial y el aporte de aguas más frías de los ríos adyacentes, originó una inversión térmica en la superficie, que se observó hasta los ~ 20 m. En general, la salinidad aumentó desde la superficie hasta el fondo. Las salinidades más bajas (~ 15 g/kg) se reportaron en el sector norte en el verano y la primavera, debido a la influencia de las aguas del río Cisnes (Schneider et al., 2014). El perfil de salinidad de invierno fue muy similar en ambos puntos, con valores ligeramente menores en el sur, alrededor de 30 g/kg.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

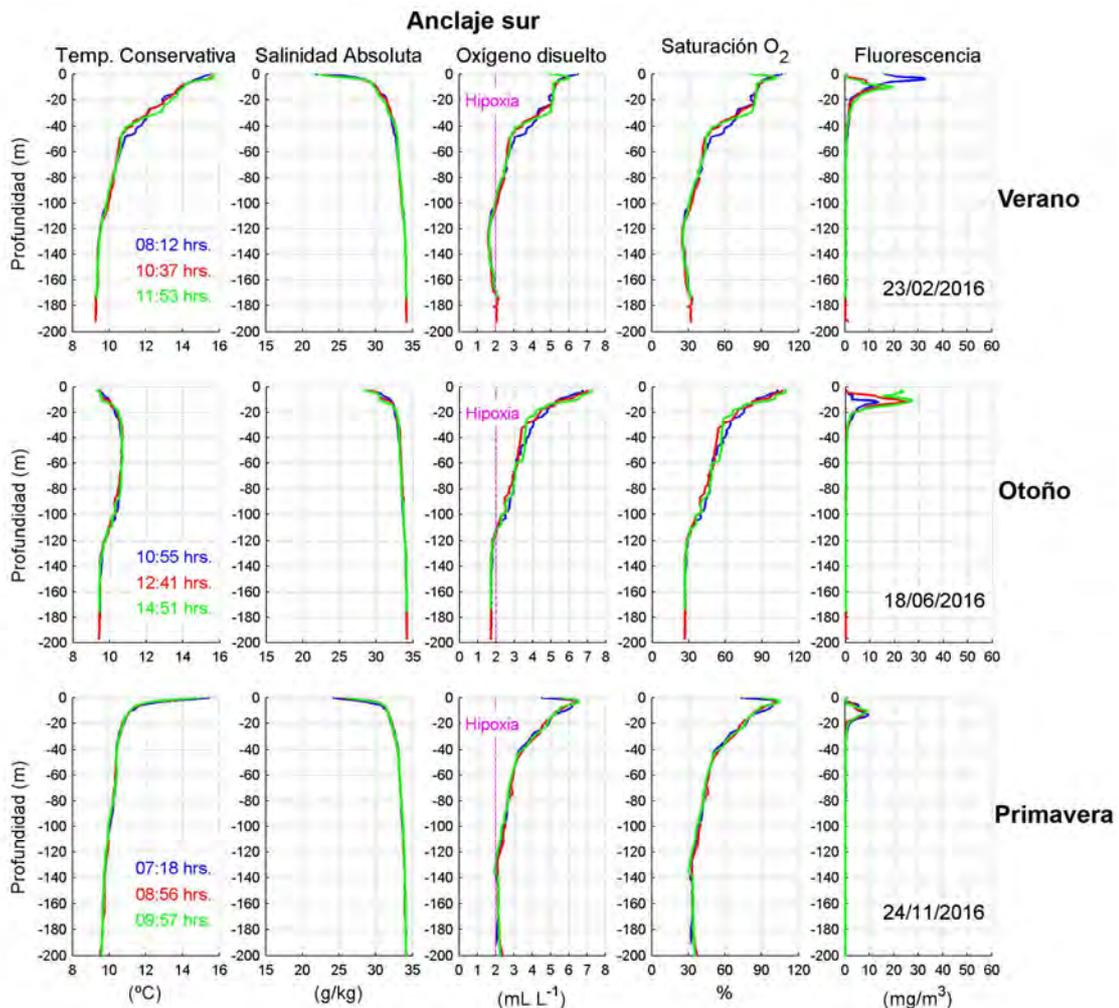


Figura 24. Perfiles de la temperatura conservativa, salinidad absoluta, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y fluorescencia obtenidos durante verano, otoño y primavera del 2016 en la zona sur del fiordo Puyuhuapi.

Los perfiles de OD mostraron una capa oxigenada entre la superficie y los primeros 20 metros de profundidad con un rango de 7 a 4 mL/L durante todas las épocas del año (Figura 24 y 25). Tanto en verano como en primavera, se registró un máximo de oxígeno disuelto bajo la superficie, centrado a alrededor de 5 – 10 m. Bajo la capa superficial, a partir de esta profundidad y hasta ~100 m el oxígeno disuelto decrece hasta 2 m/l. Desde este nivel y hacia el fondo se detectaron condiciones de hipoxia, llegando el oxígeno disuelto a valores de 1 mL/L en el anclaje norte durante el verano del 2016.

En general, los valores de fluorescencia fueron altos en todas las épocas del año, incluyendo al otoño donde a diferencia de los registros de Melinka (~4 mg/m³), en ambos sitios de Puyuhuapi los máximos estuvieron entre 30-40 mg/m³ (Figura 24 y 25). Por otro lado, el sitio norte presentó registros ligeramente más altos que el sur.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

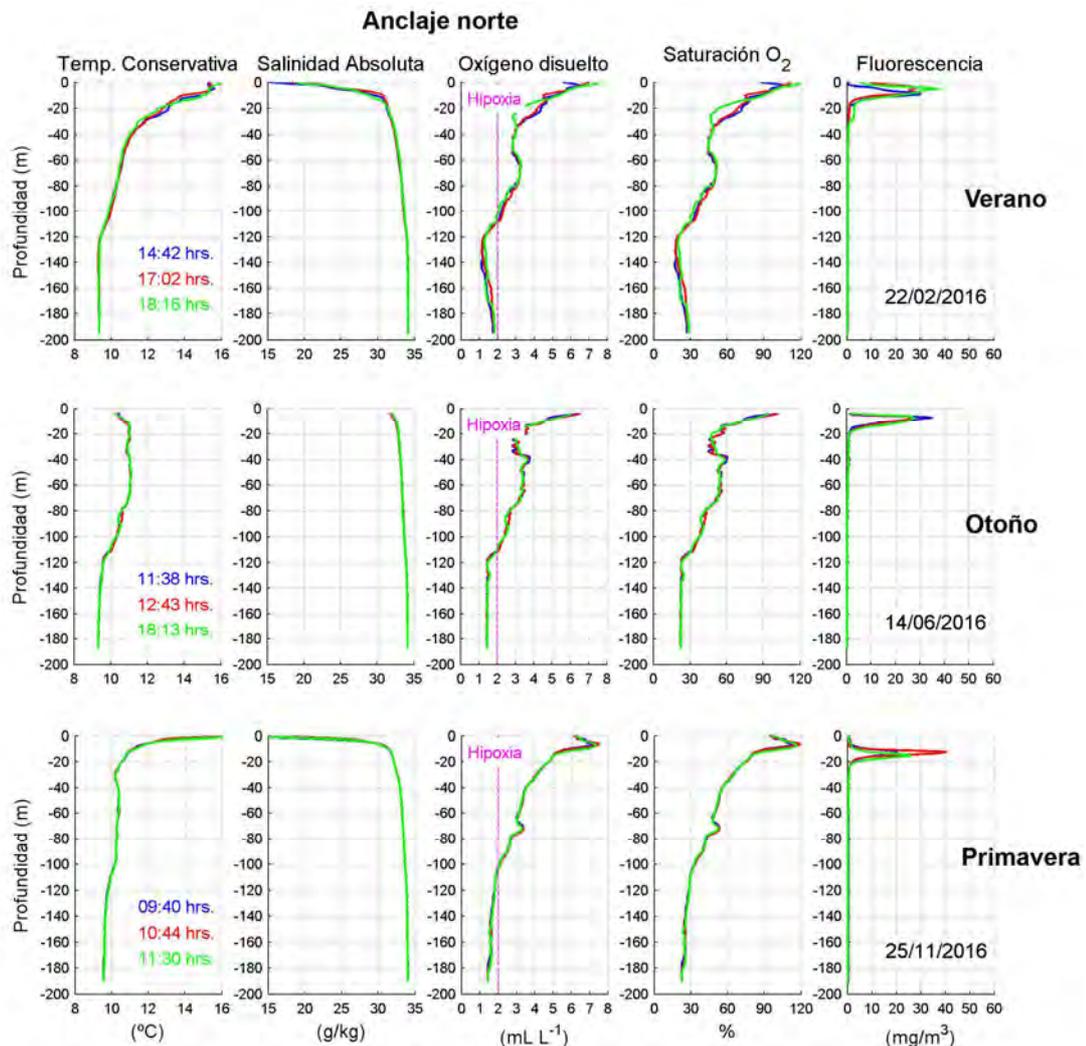


Figura 25. Perfiles de la temperatura conservativa, salinidad absoluta, oxígeno disuelto, porcentaje de saturación de oxígeno y fluorescencia obtenidos durante verano, otoño y primavera del 2016 en la zona norte del fiordo Puyuhuapi.

Con el objetivo de monitorear el desplazamiento vertical y horizontal de las condiciones de hipoxia en el fiordo Puyuhuapi, se realizó un transecta a lo largo de su eje central desde la posición del anclaje sur hasta el anclaje norte (Figura 26). Los registros de la distribución de OD mostraron que esta condición se situó debajo de los 120 m de profundidad, extendiéndose de forma homogénea y pareja a lo largo del fiordo. Los valores más bajos se localizaron hacia la zona norte profunda entre los 1-1.5 mL/L (20-30 %). El mínimo absoluto registrado por el CTD fue de 1.03 mL/L. La posición de la hipoxia coincidió con la distribución del AESS, representando un 61.5 %, mientras el resto se localizó en el borde inferior del ASAA con un 38.5 % del total de los registros de la hipoxia (Figura 27).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

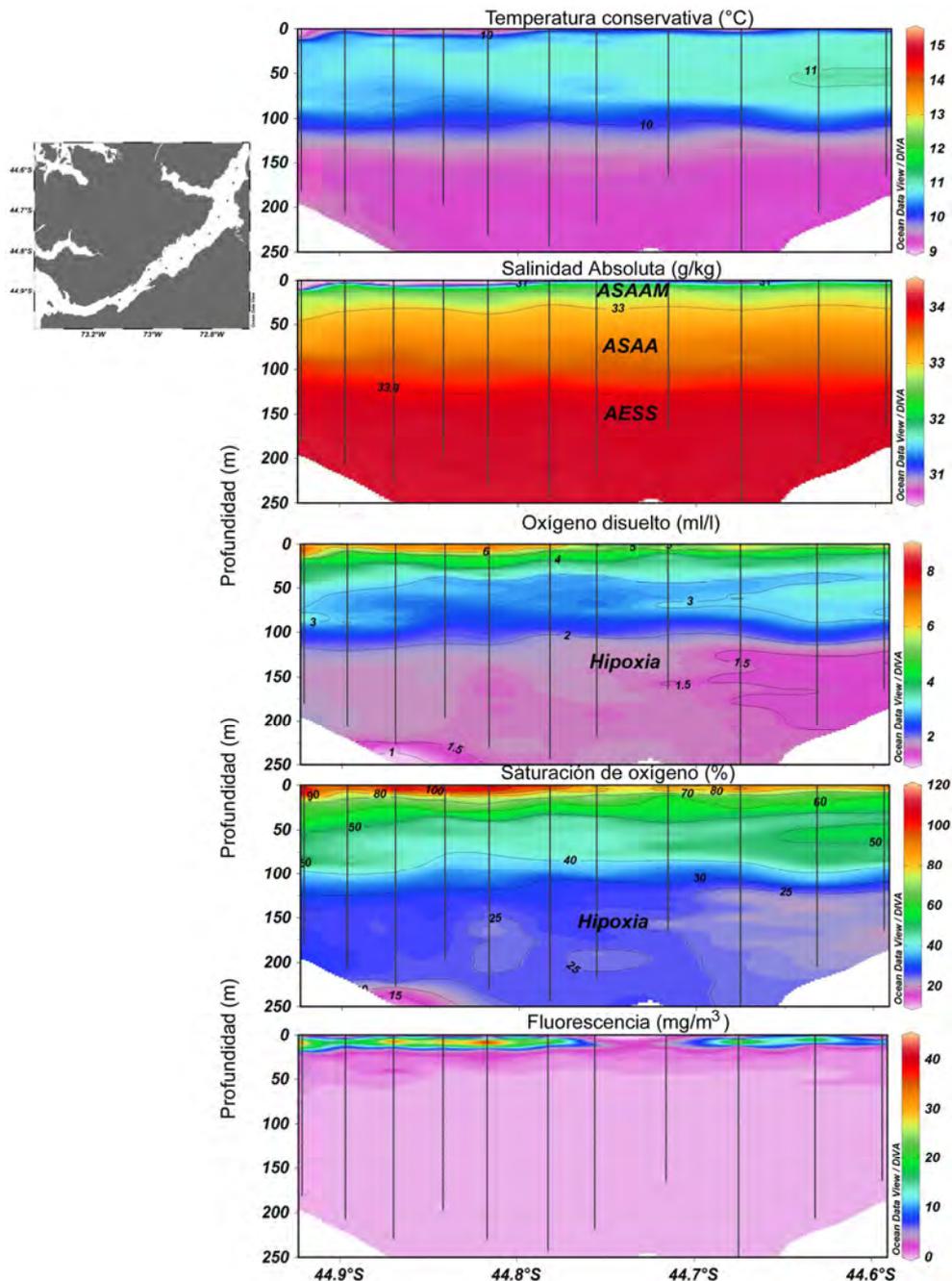


Figura 26. Sección hidrográfica realizada de sur a norte en el fiordo Puyuhuapi durante el 16 y 17 de junio del 2016. El criterio usado para la definición de las masas de agua fue la salinidad (Guzmán y Silva, 2002; Sievers, 2006 y Sievers y Silva 2008), definiéndose el agua Subantártica modificada (ASAAM, salinidad entre 31-33 g/kg), el agua subantártica (ASAA, Salinidades entre 33-33.9 g/kg) y el agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS, salinidades mayores a 33.9).

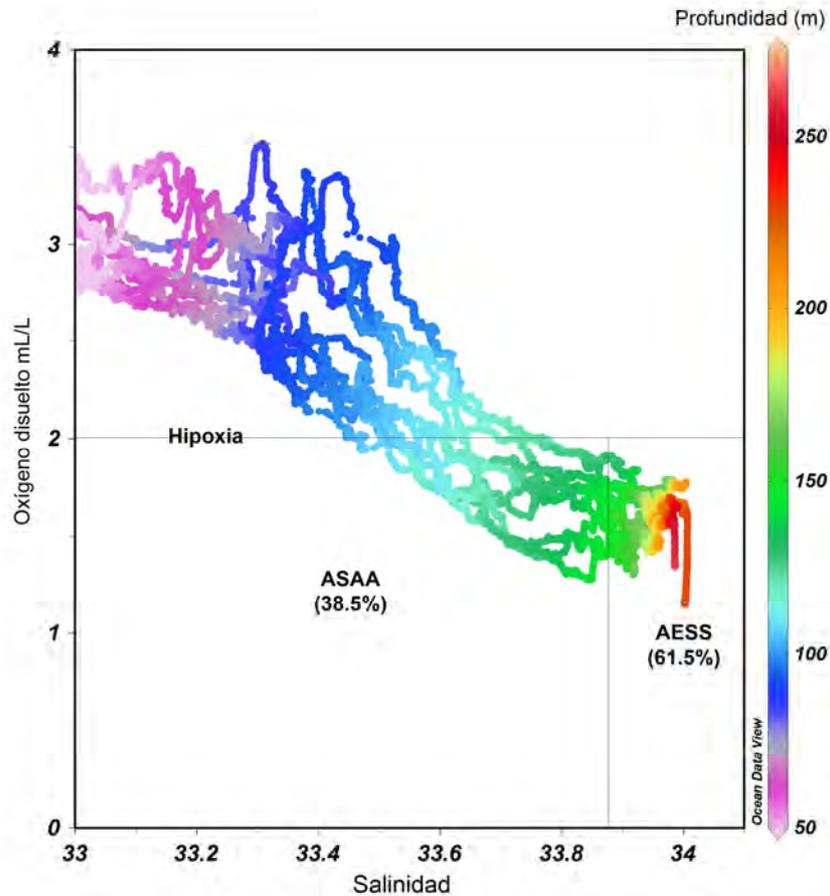


Figura 27. Relación entre oxígeno disuelto y la salinidad del agua obtenidos de la sección hidrográfica realizada de sur a norte en el fiordo Puyuhuapi durante el 16 y 17 de junio del 2016.

Al igual que en Melinka, se repitió el mismo método de toma de datos para comparar los valores de oxígeno disuelto del CTD con datos obtenidos del análisis mediante el método de Winkler, de muestras de agua tomadas a diferentes profundidades en la columna de agua. Estos resultados arrojaron valores satisfactorios que permiten a la corrección de las leves desviaciones de los registros continuos medidos con el CTD (Anexos 7-12). El mismo procedimiento se aplicó con los sensores OD MiniDot obteniéndose resultados satisfactorios (Anexo 13).

4.3. Comportamiento de los nutrientes.

Nutrientes en la zona de Melinka

La distribución vertical del contenido de nitrato, fosfato y ácido silícico en la estación de Melinka, presentaron, en general, una estructura de dos capas, una superficial (~ 0 - 25 m) y una profunda (~25 m - fondo). La capa superficial, presentó bajas concentraciones de nitrato, fosfato y ácido silícico con valores que fluctuaron entre 0,5 y 15 μM en nitrato, entre 0,38 y 2,30 μM en fosfato y entre 1 y 7 μM en el ácido silícico,

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

durante los muestreos de enero (verano) y de noviembre (primavera), con la menores concentraciones en superficie (Figura 28). En abril (otoño), la capa superficial fue más homogénea y de mayor concentración, entre 12 y 14 μM en nitrato y 1,13 y 1,30 μM en fosfato. En el caso del ácido silícico, este también aumentó levemente en alrededor de 1-2 μM respecto a enero y noviembre (Figura 28). En la capa profunda, tanto en enero como en noviembre, la concentración aumentó paulatinamente hacia el fondo, desde alrededor de 15 en nitrato, 2 μM en fosfato y 7 μM en ácido silícico, hasta alcanzar concentraciones de alrededor de 28, 2,4 y 17 μM respectivamente, a 150 m. En el caso de abril, la concentración de los tres nutrientes, también aumentaron hacia el fondo, solo que éste aumento no fue paulatino, sino que mostró algunos máximos y mínimos relativos en su distribución, lo que no ocurrió en los muestreos anteriores. Estas fluctuaciones en la concentración de nitrato, fosfato y ácido silícico, fueron simultánea, es decir hubo una co variación de los tres nutrientes, lo que se puede interpretar como el resultado de una fluctuación real en la estructura vertical.

El nitrito, no mostró una distribución vertical de dos capas con una superficial de baja concentración y una profunda de alta concentración, como ocurrió en el nitrato y fosfato. El nitrito presentó un máximo en los primeros 50 - 75 m, para luego disminuir rápidamente a mayor profundidad. Este máximo fue más intenso en enero y noviembre (0,5 y 0,7 μM respectivamente). En abril este máximo fue de 0,2 μM (Figura 28). Bajo los 75 m, las concentraciones de nitrito fueron menor de 0,1 μM y en general bajo el límite de detección.

Nutrientes Puyuhuapi

Al igual que en la estación de Melinka, la distribución vertical del contenido de nitrato, fosfato y ácido silícico en las estación anclajes norte y sur de Puyuhuapi, presentaron, en general, una estructura de dos capas, una superficial que fluctuó, en general, entre 0 y 50 m y una profunda bajo los 50 m, hasta el fondo. En invierno, esta capa fue menos profunda, llegando hasta alrededor de 20 m en ambas estaciones (Figura 28).

La capa superficial, presentó bajas concentraciones de nitrato y fosfato con valores que fluctuaron entre 0 (no detectado) y 20 μM en nitrato, entre 0 (no detectado) y 2,3 μM en fosfato, durante los muestreos de enero (verano), junio (otoño) y noviembre (primavera), con la menores concentraciones en superficie. En el caso del ácido silícico, la capa superficial tuvo un comportamiento diferente al del nitrato y fosfato, ya que en junio y noviembre presentó un máximo superficial ($>20 \mu\text{M}$), lo que a su vez dio origen a un mínimo somero (0 - 3 μM), centrado a alrededor de 10 m, para luego volver aumentar hasta la base de la capa superficial. Este máximo/mínimo superficial se presentó en Puyuhuapi norte en febrero, y noviembre y en Puyuhuapi sur solo en julio (Figura 28). Esto está asociado al aporte de aguas de los ríos locales, los que tienen más altas concentraciones de ácido silícico que el agua marina, lo que provoca que agua menos salina de la superficie presente el máximo descrito (Silva, 2008). En términos generales, el ácido silícico en la capa superficial fluctuó entre 0 (no detectado) y 15 μM . En la capa profunda, en febrero, junio y noviembre la concentración de los tres nutrientes aumentaron paulatinamente hacia el fondo, desde alrededor de 20 en nitrato, 2,3 μM en fosfato y 15 μM en ácido silícico, hasta alcanzar concentraciones máximas de alrededor de 28, 2,9 y 35 μM respectivamente, a 200 m

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

El nitrito, al igual que en la estación de Melinka, no mostró una distribución vertical de dos capas, con una superficial de baja concentración y una profunda de alta concentración, como ocurrió en el nitrato y fosfato. Este nutriente presentó un máximo en los primeros 50 m, alcanzando concentraciones máximas de 0,3 μM , para luego disminuir rápidamente a los 75 m. Bajo esta profundidad, las concentraciones de nitrito fueron menor de 0,1 μM y en general, bajo el límite de detección.

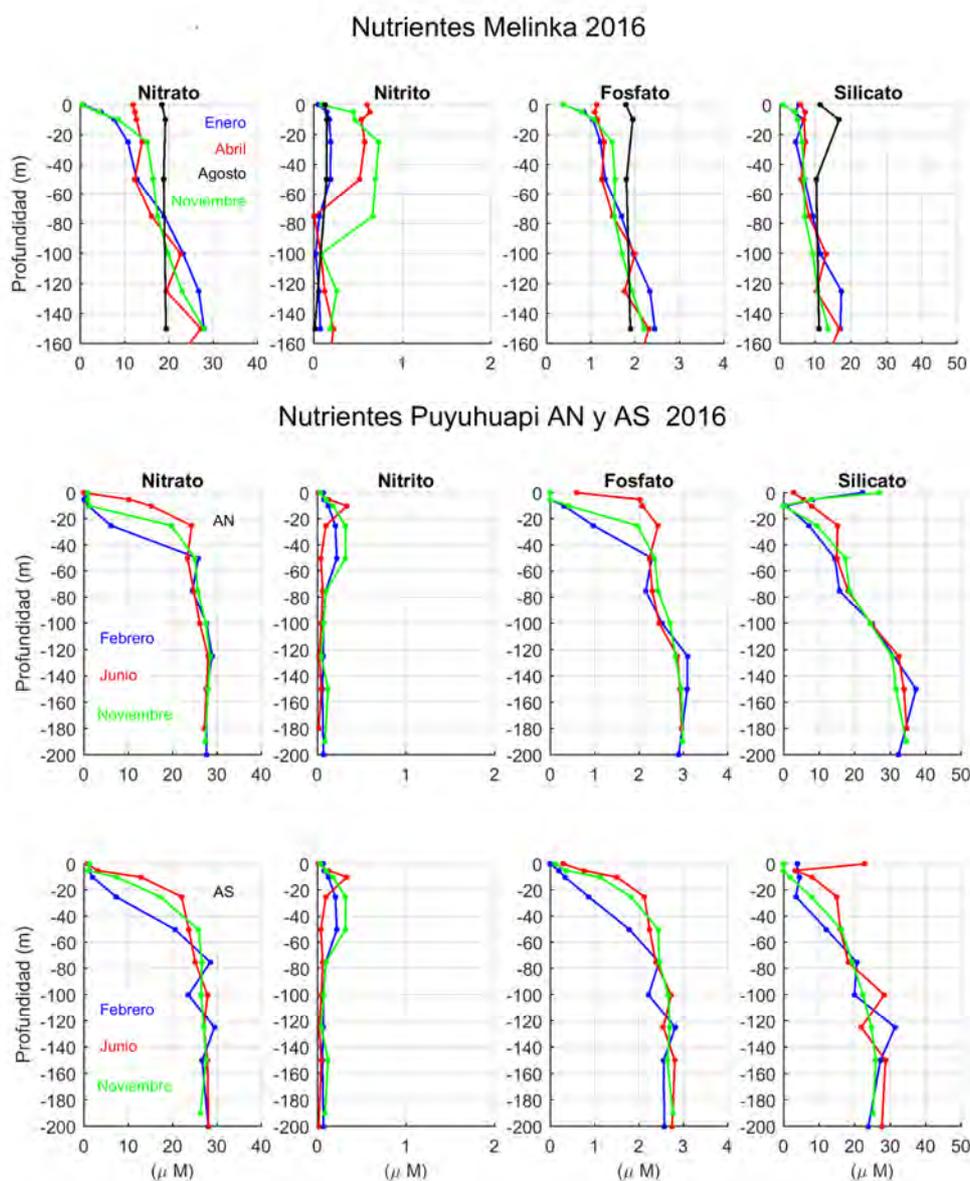


Figura 28. Comportamiento vertical de los nutrientes en Melinka y Puyuhuapi.

4.4. Condiciones meteorológicas.

Estación meteorológica en Melinka

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

La estación meteorológica instalada en Melinka en las dependencias de la Capitanía de puerto funciono de forma satisfactoria. La temperatura del aire fue elevada durante los meses de verano y en primavera, alcanzando máximos entre 20-25° C. A partir del verano la temperatura del aire comenzó a descender hasta el invierno, con valores mínimos en julio y agosto, cercanos a los 3° C (Figura 29a). La radiación solar mostró este mismo patrón, descendiendo de máximos 1200 W/m² durante el verano a 400 W/m² en invierno (Figura 29b). Sin embargo, se observaron varios días donde la radiación solar fue mínima, coincidiendo con periodos de precipitaciones altas (300 mm) y presión atmosférica baja (Figura 29c y 29b). Este comportamiento evidencio el paso de los sistemas de bajas presiones.

La intensidad promedio del viento fue de 2.5±1.8 m/s (línea de color negro). Mientras, la racha máxima registrada fue de 23.2 m/s (línea de color rojo) (Figura 29a). Los vientos del Oeste y del Noroeste dominaron en todo el periodo de estudio (Figura 30 a-c). Sin embargo, los vientos del Norte y del Sur también hicieron sentir su presencia. Los vientos del Sur, estuvieron relacionados con el paso de los sistemas de altas presiones (Figura 30b), que fueron más frecuentes durante el verano. Sin embargo, estos eventos de vientos ocurrieron en todos los meses, con mayor o menor duración. En la tabla 14 aparecen los resultados de la distribución de valores porcentuales para cada rumbo del viento de acuerdo a un rango de velocidades seleccionadas. La dirección Oeste del viento fue la que mostró mayor porcentaje de ocurrencia con 23.15%, seguida del Norte y Noroeste. En general los viento fueron débiles con el 81% en el rango de velocidades de 0-4 m/s, siendo la velocidad máxima extrema 14.42 m/s y la media de 2.56 m/s.

Tabla 14. Distribución de valores porcentuales de la dirección y velocidad del viento para la estación meteorológica instalada en Melinka.

Intervalos/dirección	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Total %
<4 (m/s)	22.73	9.10	4.86	2.70	9.03	5.00	16.46	11.12	81.00
[4,6[	0.24	0.02	0.21	0.19	4.18	0.38	4.05	3.55	12.83
[6,8[	0.00	0.00	0.04	0.02	0.97	0.09	1.82	1.76	4.71
[8,10[	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.64	0.49	1.17
[10,12[	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.12	0.27
12>=	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
Total %	22.98	9.12	5.12	2.91	14.20	5.48	23.15	17.04	100.00
Máximos (m/s)	6.04	4.68	7.02	6.63	8.58	8.58	14.42	12.86	14.42
Media (m/s)	1.75	1.30	1.84	1.77	3.49	2.16	3.13	3.24	2.56

Estación meteorológica en Isla Madgalena, fiordo Puyuhuapi.

Las figuras 31 y 32 presentan una actualización de los registros atmosféricos obtenidos de la estación Isla Magdalena presentada en la sección de antecedentes (Figura 10 y 11). En general, todas las variables mantuvieron un comportamiento de acuerdo a su ciclo anual, como fue descrito anteriormente. En la tabla 15 se muestran los resultados de la distribución de valores porcentuales para cada rumbo del viento. La dirección Oeste del viento fue la que mostró mayor porcentaje de ocurrencia con 35.89 %, seguida del Norte y Noreste. Los viento fueron débiles con el 90.42 % en el rango de velocidades de 0-4 m/s, siendo la velocidad máxima extrema 10.72 m/s y la media de 1.99 m/s.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 15. Distribución de valores porcentuales de la dirección y velocidad del viento para la estación meteorológica instalada en la Isla Magdalena, norte del fiordo Puyuhuapi.

Intervalos/dirección	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Total
<4 (m/s)	10.83	8.46	4.98	3.67	7.56	9.53	35.77	9.62	90.42
[4,6[	2.45	3.42	0.23	0.18	0.21	0.44	0.10	0.07	7.10
[6,8[	0.43	1.43	0.09	0.01	0.02	0.08	0.01	0.00	2.07
[8,10[	0.04	0.29	0.03	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.39
[10,12]	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
Total %	13.74	13.63	5.33	3.86	7.80	10.05	35.89	9.70	100.00
Máximos (m/s)	9.94	10.72	9.94	6.43	9.55	9.74	9.55	6.43	10.72
Media (m/s)	2.63	3.38	1.68	1.42	1.49	1.80	1.71	1.17	1.99

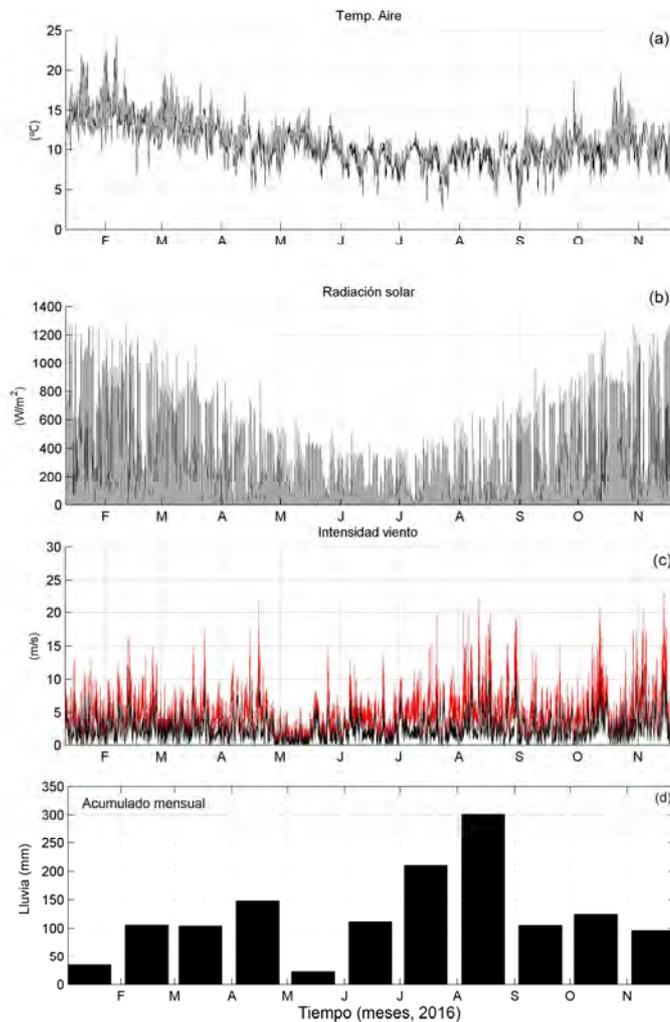


Figura 29. (a) Temperatura del aire, (b) radiación solar, (c) velocidad del viento y (d) acumulado mensual de precipitaciones, obtenidas en la estación meteorológica instalada en Melinka (43°53'48.80"S/ 73°44'57.44"O) durante enero-noviembre del 2016.

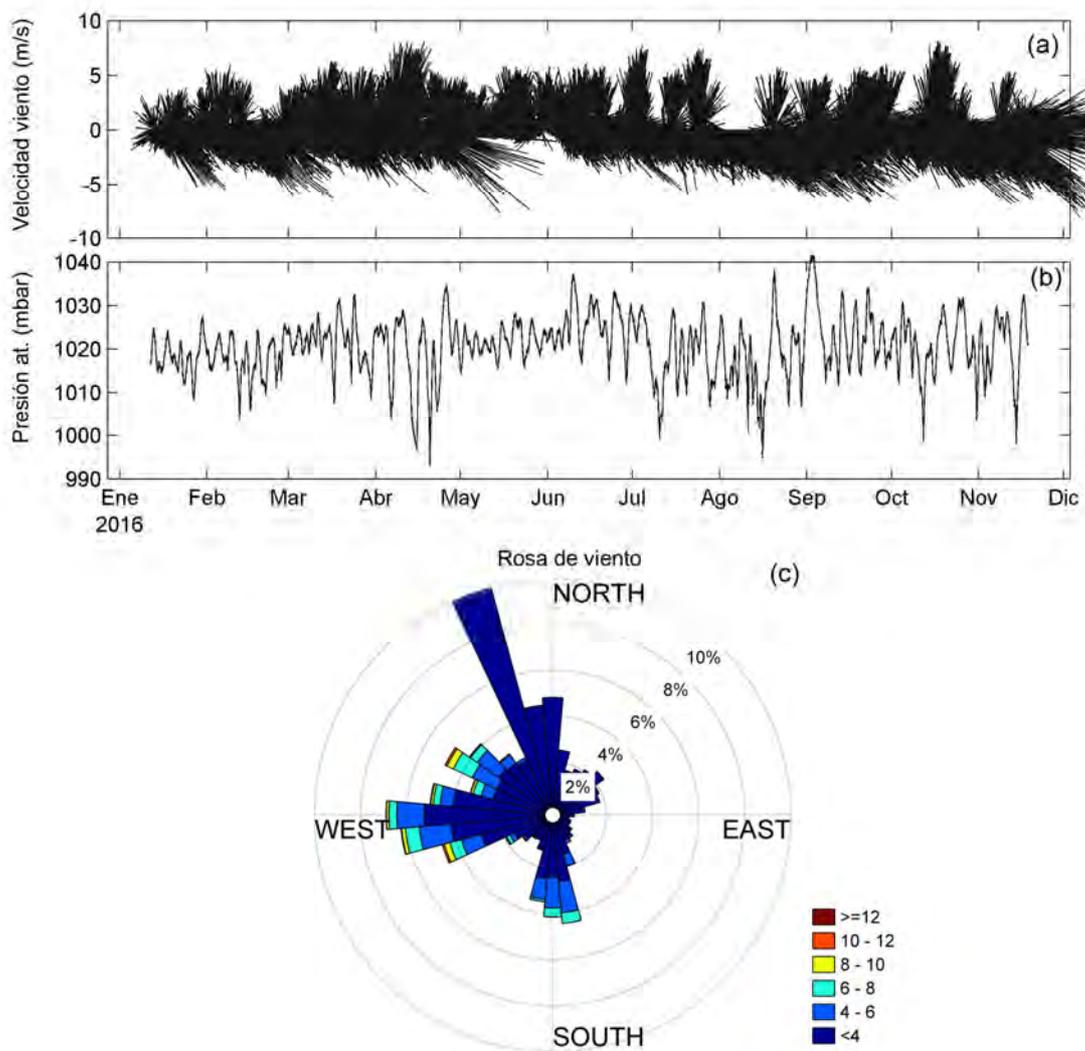


Figura 30. Datos de la estación de Melinka representando la (a) los vectores del viento indicando la velocidad y dirección durante todo el periodo de observaciones (dirección hacia dónde va el viento). (b) Presión atmosférica y (c) rosa de viento. La interpretación de la dirección del viento en la rosa fue de acuerdo a la convención meteorológica (de donde viene el viento).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

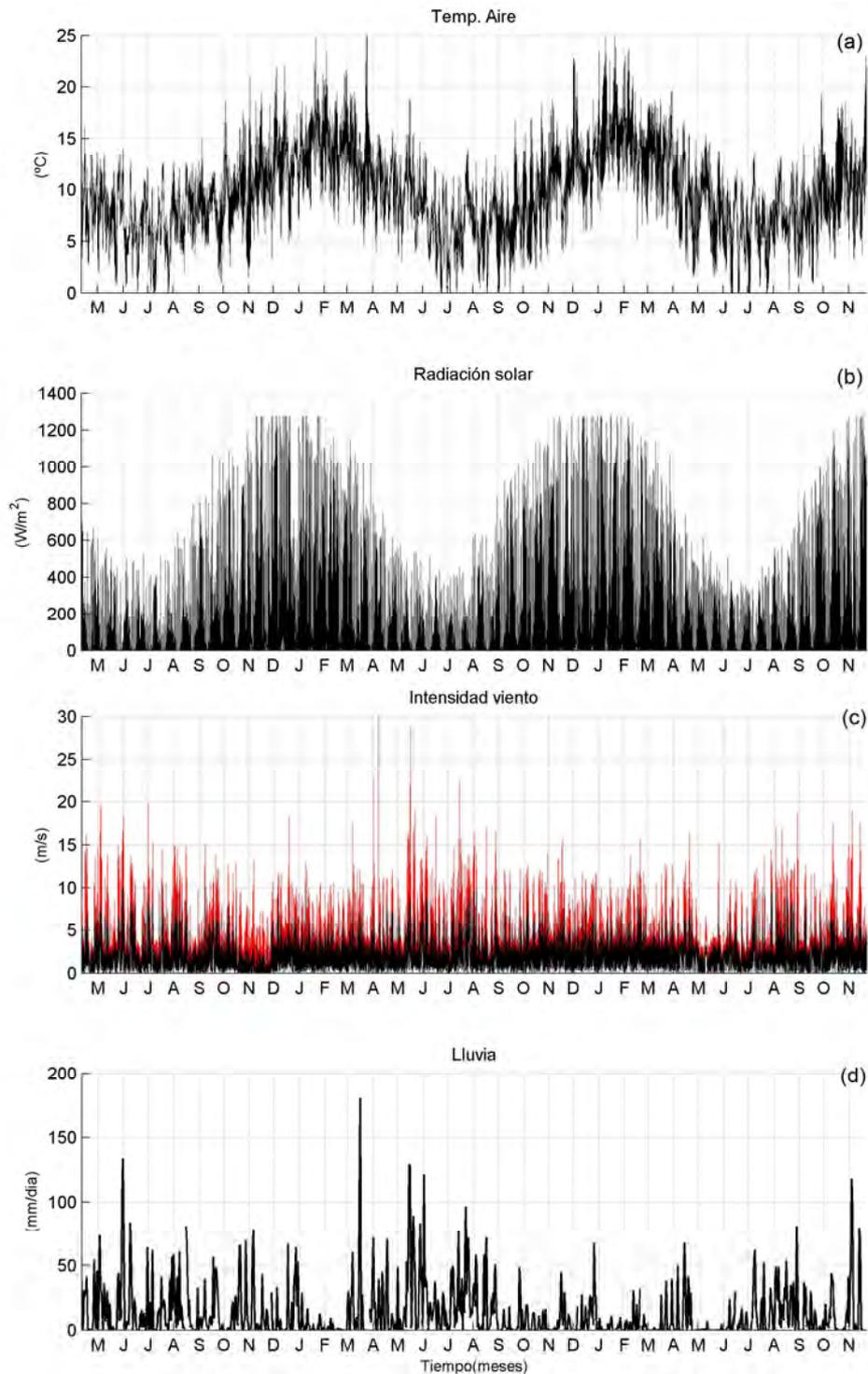


Figura 31. (a) Temperatura del aire, (b) radiación solar, (c) velocidad del viento y (d) precipitaciones, obtenidas en la estación meteorológica instalada en la Isla Magdalena, fiordo Puyuhuapi en el periodo abril 2014-noviembre del 2016.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

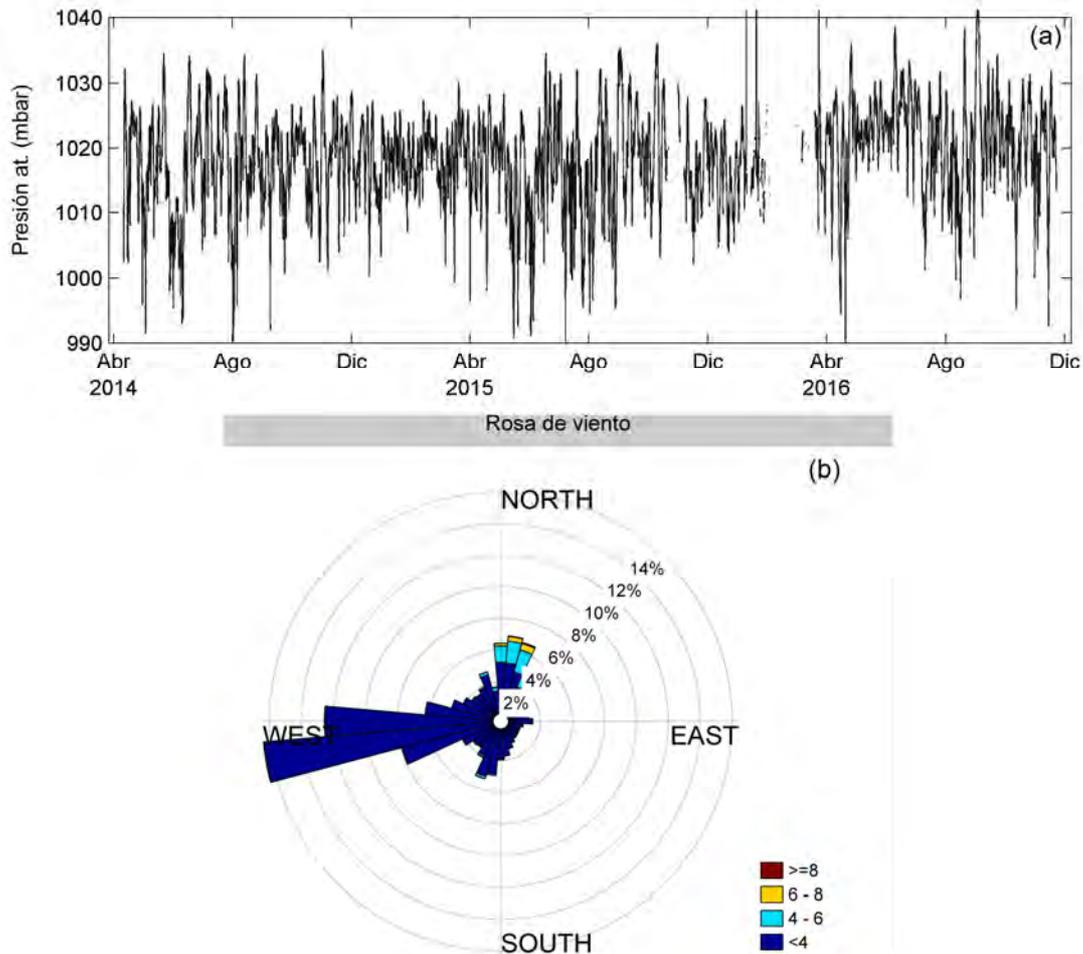


Figura 32. Datos de la estación Isla Magdalena en el fiordo Puyuhuapi representando la (a) la presión atmosférica y (b) la rosa de viento. La interpretación de la dirección del viento en la rosa fue de acuerdo a la convención meteorológica (de donde viene el viento). No se presentó el diagrama de vectores en esta figura pues la gran cantidad de datos impide una buena representación.

4.5. Régimen de mareas.

Melinka

El análisis armónico de la amplitud del nivel del mar en la zona del anclaje de Melinka abarcó el periodo del enero-noviembre 2016 (Figura 33a). La amplitud de la marea en este punto no sobrepasó los 4 metros. Sin embargo, durante octubre se observó un incremento en estos valores, pero estos fueron debido a la inclinación del anclaje. Es importante tener en cuenta que la amplitud de los armónicos obtenidos es relativa, debido al movimiento que experimenta el anclaje. Sin embargo, los datos son válidos para determinar la frecuencia de los armónicos de marea dominantes. La componente lunar principal

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

semidiurna (M_2 , con 12.4 horas) fue la que presentó la mayor amplitud. Las otras constituyentes fueron la N_2 , O_1 y K_1 . En la tabla 16 aparecen el resto de las constituyentes de marea con sus resultados. El cálculo del coeficiente determinante del régimen de marea (Courtier), (SHOA), obtenido a través de la relación de las amplitudes de cuatro de las principales constantes armónicas ($F=O_1+K_1/M_2+S_2$), arrojó un **Régimen mixto semidiurno (F=0.47)**.

Tabla 16. Valores de amplitud (relativos) y fase de los armónicos de marea que representaron el 95% de intervalo de confianza, en la zona de Melinka.

Armónicos marea	Tiempo (horas)	Amplitud (metros)	Error Amplitud (metros)	Fase (grados)	Error Fase (grados)
MM	657.27	0.0547	0.0618	48.9096	64.7073
MSF	354.10	0.0147	0.0618	215.2120	240.2724
Q1	26.88	0.0275	0.0108	174.3358	25.8562
O1	25.82	0.1000	0.0108	149.5621	7.0062
K1	23.93	0.1727	0.0108	298.9820	3.8557
N2	12.66	0.1028	0.0602	184.3335	32.8102
M2	12.42	0.4426	0.0602	178.9927	7.6005
S2	12.00	0.1326	0.0602	309.1452	26.0628
M4	6.21	0.0147	0.0043	249.0684	15.8780
M6	4.14	0.0036	0.0016	184.8639	23.3189

Puyuhuapi sur

El análisis armónico de la amplitud del nivel del mar en la zona sur del fiordo Puyuhuapi abarco el periodo del febrero-noviembre 2016 (Figura 33b). La amplitud de la marea en este punto no sobrepaso los 3 metros. La componente lunar principal semidiurna (M_2 , con 12.4 horas) fue la que presentó la mayor amplitud (0.83 m). Las otras constituyentes fueron la N_2 , O_1 y K_1 . En la tabla 17 aparecen el resto de las constituyentes de marea con sus resultados. El cálculo del coeficiente determinante del régimen de marea (Courtier), (SHOA), obtenido a través de la relación de las amplitudes de cuatro de las principales constantes armónicas ($F=O_1+K_1/M_2+S_2$), arrojó un **Régimen mixto semidiurno (F=0.285)**.

Tabla 17. Valores de amplitud (relativos) y fase de los armónicos de marea que representaron el 95% de intervalo de confianza en el anclaje sur de Puyuhuapi.

Armónicos marea	Tiempo (horas)	Amplitud (metros)	Error Amplitud (metros)	Fase (grados)	Error Fase (grados)
MM	657.27	0.0664	0.0820	109.5167	70.7973
MSF	354.10	0.0361	0.0820	82.5362	130.3090
Q1	26.88	0.0268	0.0034	357.7394	8.8356
O1	25.82	0.1347	0.0034	5.6831	1.7252
K1	23.93	0.1979	0.0034	160.1104	1.1000
N2	12.66	0.2061	0.0036	209.8963	0.9740
M2	12.42	0.8303	0.0036	219.0824	0.2430
S2	12.00	0.2965	0.0036	33.0695	0.7036
M4	6.21	0.0141	0.0012	208.8314	4.7346
M6	4.14	0.0057	0.0009	174.1953	7.9617

Puyuhuapi norte

El análisis armónico de la amplitud del nivel del mar en la zona norte del fiordo Puyuhuapi abarco el periodo del febrero-noviembre 2016 (Figura 33b). La amplitud de la marea en este punto fue ~3 metros. La componente lunar principal semidiurna (M_2 , con 12.4 horas) fue la que presentó la mayor amplitud (0.86 m). Las otras constituyentes fueron la N_2 , O_1 y K_1 . En la tabla 18 aparecen el resto de las constituyentes de marea con sus resultados. El cálculo del coeficiente determinante del régimen de marea (Courtier), (SHOA), obtenido a través de la relación de las amplitudes de cuatro de las principales constantes armónicas ($F=O_1+K_1/M_2+S_2$), arrojo un **Régimen mixto semidiurno ($F=0.282$)**.

Tabla 18. Valores de amplitud (relativos) y fase de los armónicos de marea que representaron el 95% de intervalo de confianza en el anclaje norte de Puyuhuapi.

Armónicos marea	Tiempo (horas)	Amplitud (metros)	Error Amplitud (metros)	Fase (grados)	Error Fase (grados)
MM	657.27	0.0148	0.0201	344.9252	78.0790
MSF	354.10	0.0061	0.0201	12.4123	188.4586
Q1	26.88	0.0276	0.0017	198.0061	4.4857
O1	25.82	0.1385	0.0017	25.3942	0.8832
K1	23.93	0.2032	0.0017	203.9458	0.5558
N2	12.66	0.2117	0.0040	92.2779	1.0384
M2	12.42	0.8610	0.0040	280.6965	0.2566
S2	12.00	0.3114	0.0040	63.5503	0.7367
M4	6.21	0.0154	0.0012	328.7474	3.9945
M6	4.14	0.0059	0.0008	358.2676	6.8714

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

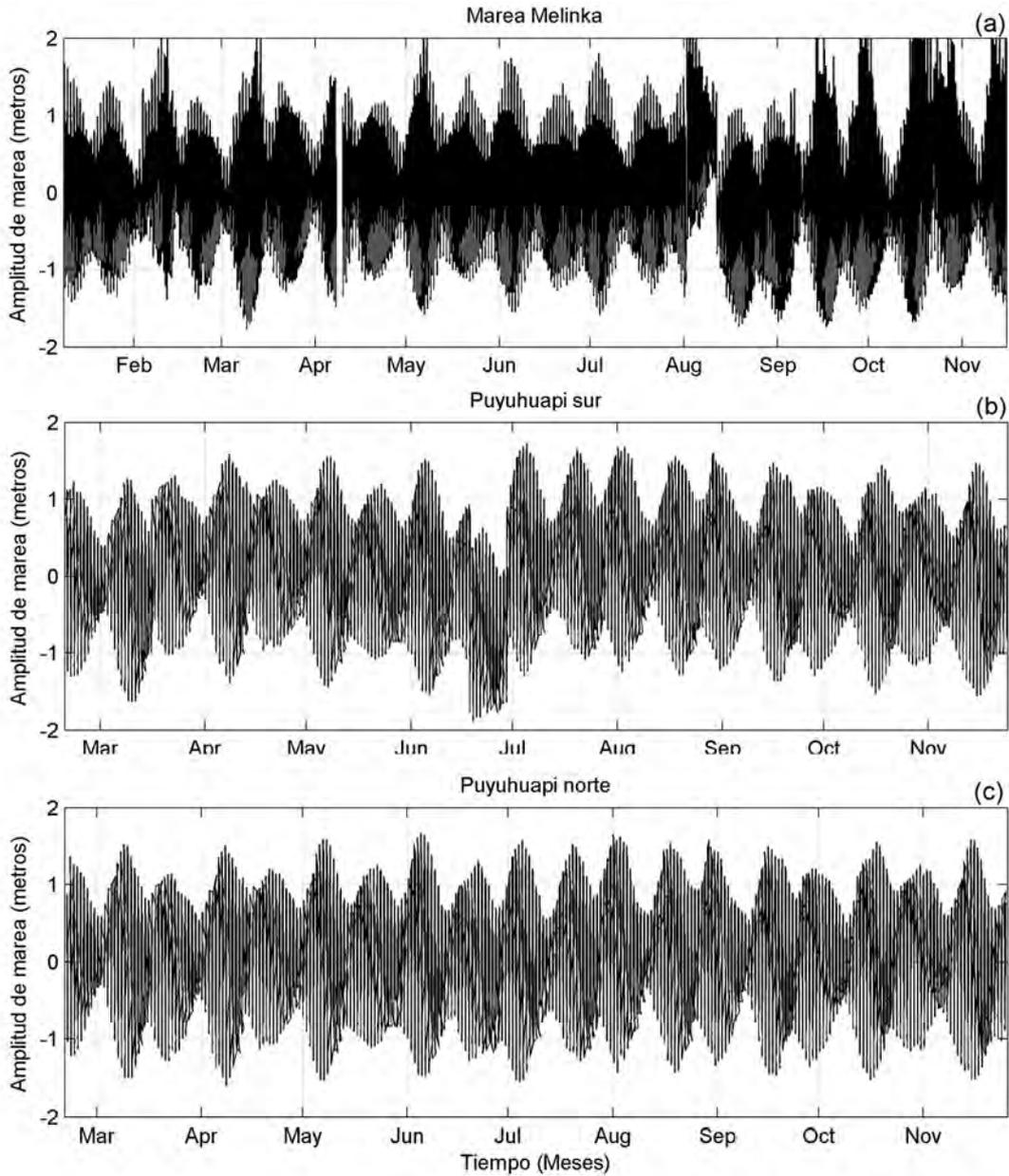


Figura 33. (a) Serie de nivel del mar obtenido del MicroCat SBE 37 instalado a 10 metros del fondo en el anclaje de Melinka. (b) Serie de nivel del mar de un equipo HOBO U-20 instalado en el borde costero del sector sur del fiordo Puyuhuapi. (c) Serie de nivel del mar de un equipo HOBO U-20 instalado en el muelle de la Isla Magdalena en el sector norte del fiordo Puyuhuapi.

4.6. Procesamiento y análisis de los datos series de tiempo del anclaje de Melinka.

4.6.1. Serie de tiempo hidrográfica del fondo (MicroCat y MiniDOT).

La variabilidad de la hidrografía profunda (temperatura, salinidad y el oxígeno disuelto-OD) en la zona de Melinka se obtuvo de un equipo MicroCat SBE-37 instalado a aproximadamente 10 metros del fondo. El registro de datos varió entre los 140-150 metros de profundidad debido al proceso de salva de datos y reubicación del anclaje (Figura 34a). La temperatura el agua mostró valores bajos durante el verano y la primavera entre los 8.5-9.5° C. Mientras, los registros se incrementaron del otoño al invierno, presentándose los máximos agosto y septiembre. El momento de valores máximos de la temperatura del agua estuvo asociado a la presencia de ASAA (Figura 34b). La serie de salinidad varió entre 33.2 y 34.3, con un valor promedio de 33.95 ± 0.21 . Durante el verano y el otoño el AESS se hizo presente; mientras que a partir de julio la salinidad disminuyó debido a la llegada del ASAA, manteniendo su influencia hasta noviembre.

La condición de hipoxia solo se registró durante el verano, de forma esporádica (Figura 34c y 34d). El valor mínimo de OD fue de 1.29 mL/L en abril con un porcentaje de saturación de 20.3 %. A partir de este mes los valores de OD comienzan a aumentar hasta llegar a su máximo en septiembre con 5.3 mL/L y 85.1 % de saturación. Hacia la primavera los registros de OD comienzan a descender. En general los valores de OD se duplicaron durante el invierno, coincidiendo este momento con la llegada el ASAA, siendo este un evento de ventilación profunda de gran magnitud.

4.6.2. Serie de tiempo hidrográfica a 30 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).

La serie de tiempo hidrográfica a 30 metros de la superficie solo pudo coleccionar datos en el periodo enero-abril 2016 (Figura 35). Las malas condiciones del tiempo en la campaña de invierno (agosto 2016) impidieron realizar la salva de datos de algunos de los equipos, entre los que se encontraba el HOBO U-24 de 30 m. En la salva de datos que le continuaba a la campaña de invierno, realizada en noviembre, se reportó la pérdida total de la parte superior del anclaje donde se localizaban los equipos de 30 m y 5 m.

A continuación se describen los datos registrados a 30 m. En este nivel la temperatura promedio del agua fue de 11.82 ± 0.33 ° C, registrándose un máximo y un mínimo absoluto de 12.66° C y 10.6° C, respectivamente (Figura 35a). La salinidad del agua mostró un incremento desde enero (salinidades entre 30-31) a abril (salinidades mayores a 33) (Figura 41b). Usando el criterio de la salinidad para clasificar los cuerpos y masas de agua en la región de estudio, como se mencionó en la sección de Introducción de este informe, se pudo constatar entonces que las aguas estuarinas estuvieron solo presentes durante enero y los primeros días de febrero. El resto de febrero estuvo dominado por la presencia del ASAAM y durante marzo y abril solo se observó la presencia del ASAA. Este comportamiento debe estar relacionado con la llegada de agua dulce a la esta zona y su posterior mezcla con las aguas oceánicas. Su disminución en el aporte y la mezcla permitió detectar la dinámica del sistema hidrográfico de esta región, cambiando de un régimen estuarino a oceánico del verano a la primavera del 2016.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

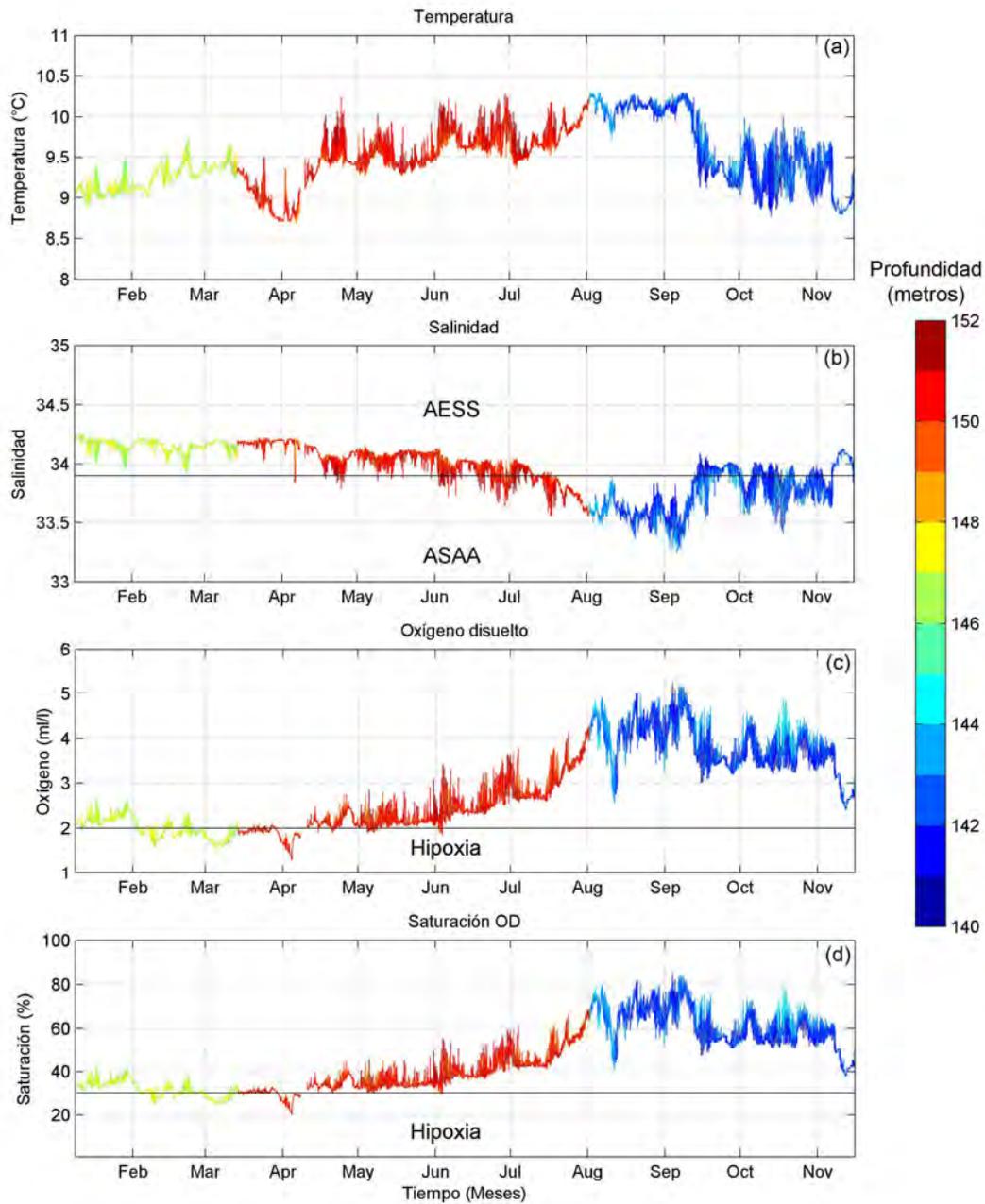


Figura 34. (a) Serie de tiempo de la temperatura y (b) salinidad del agua obtenida del MicroCat y (c-d) ODy porcentaje de saturación del MiniDOT. Los datos fueron colectados en el anclaje de Melinka a ~10 metros del fondo en el periodo enero-noviembre 2016.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

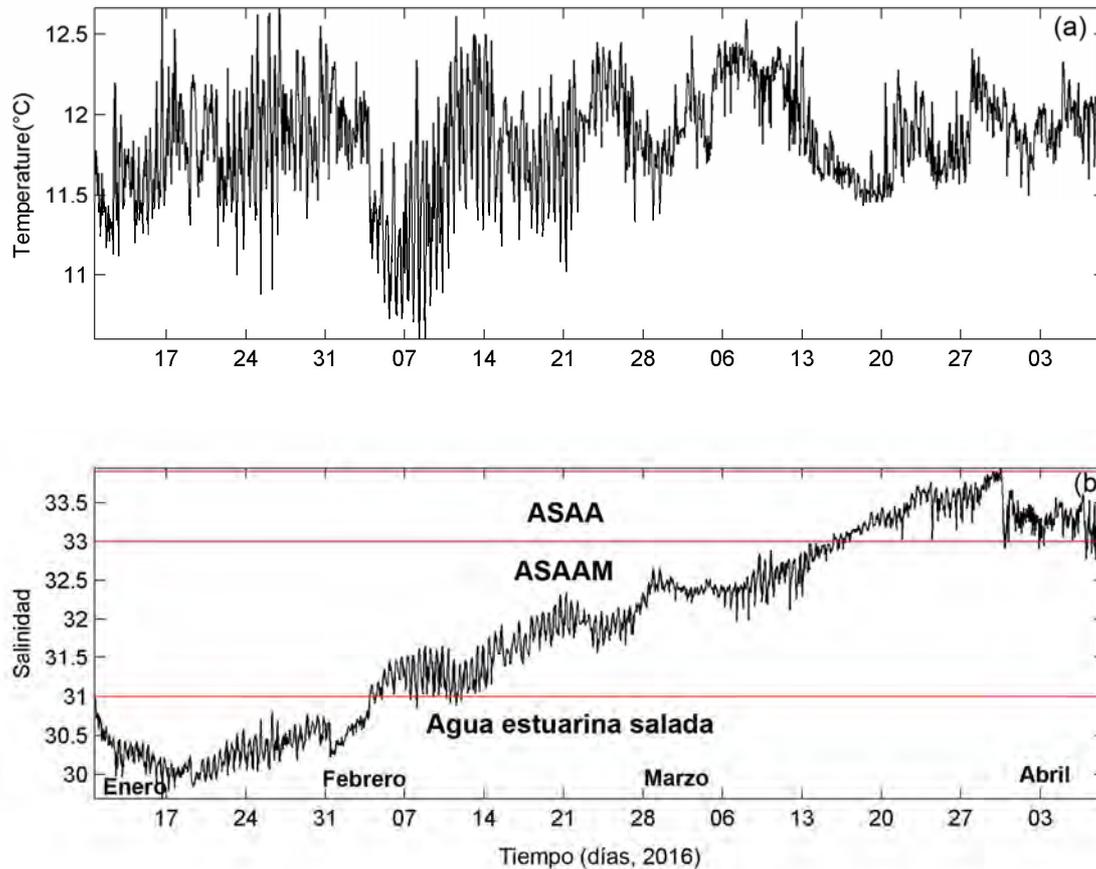


Figura 35. (a) Serie de temperatura y (b) salinidad del agua obtenidas de un equipo HOBO U-24 a 30 m de la superficie del mar en el anclaje de Melinka en el periodo 10/01/2016 al 8/04/2016.

4.6.3. Serie de tiempo hidrográfica a 5 metros (YSI-6600 y HOBO U-26).

En el nivel más cerca de la superficie del anclaje se instaló una sonda YSI 6600 (Temperatura, conductividad y clorofila-a) y junto a su jaula un sensor HOBO U26 para medir el oxígeno disuelto, quedando todos los instrumentos a ~7 m de la superficie del mar (Figura 36). El anclaje sufrió una fuerte inclinación durante febrero 2016 llegando hasta los 20 m, por lo tanto el comportamiento de las variables registradas en este periodo pertenecen a esa capa. Como se explico anteriormente, las malas condiciones del tiempo en la campaña de invierno (agosto 2016) impidieron realizar la salva de datos de algunos de los equipos, entre los que se encontraba la sonda YSI-6000. En la salva de datos que le continuaba a la campaña de invierno, realizada en noviembre, se reportó la pérdida total de la parte superior del anclaje donde se localizaban los equipos cercanos a la superficie.

A pesar del movimiento al que estuvieron expuestos los instrumentos, se detectó un evento de florecimiento de algas entre 13 y 27 de marzo (Figura 36e). Aunque los valores de clorofila-a son muy elevados el comportamiento de la curva se usó para distinguir el evento y establecer una relación con valores bajos de OD registrados en el mismo periodo del evento (Figura 36c y 36d). Durante este tiempo el OD llegó a registrar valores cercanos

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

a 1 mL/L. Los registros de la presión del equipo demostraron que durante ese periodo del tiempo la inclinación del anclaje fue mínima, permitiendo registrar el comportamiento de la marea con este sensor (Figura 37).

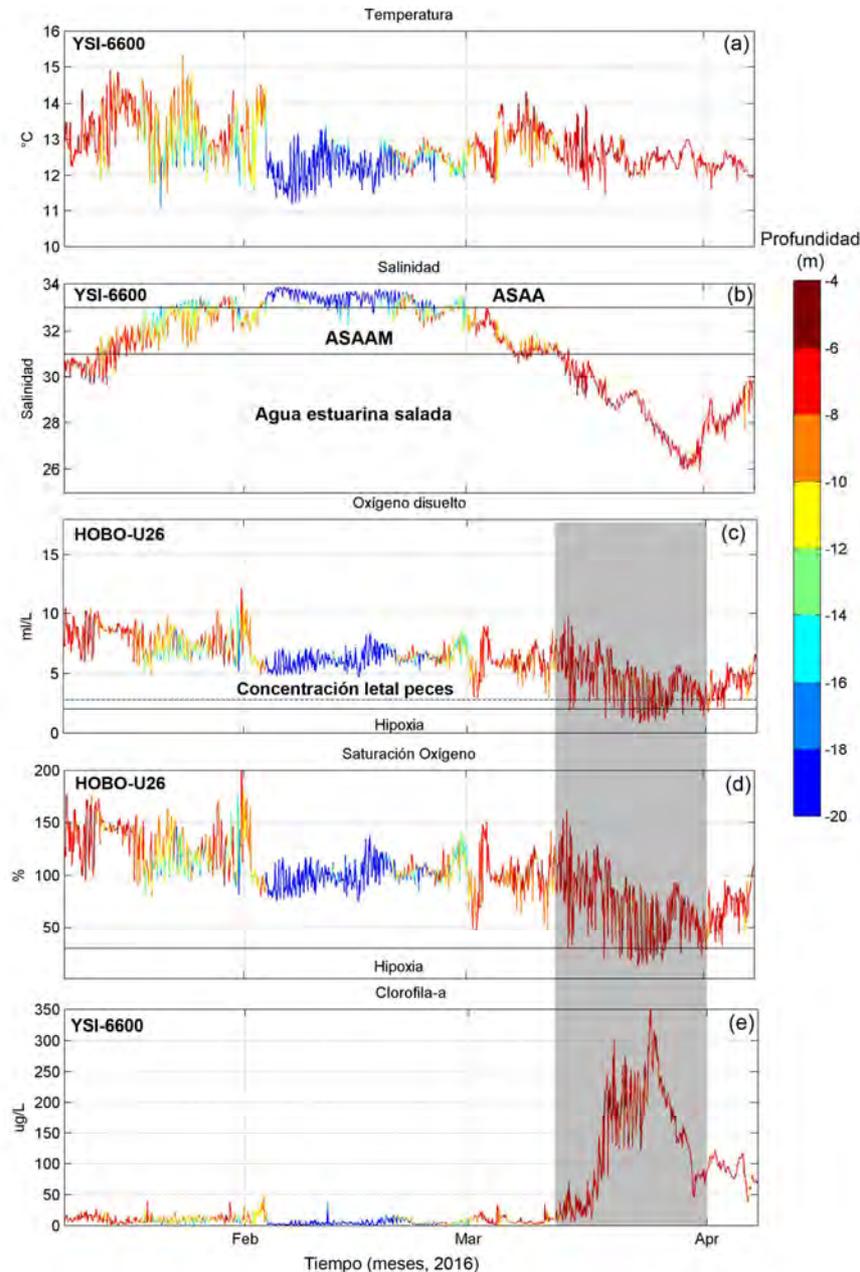


Figura 36. (a) Serie de presión, (b) temperatura del agua, (c) salinidad del agua y (f) clorofila-a obtenida de la sonda YSI 6600. (d) Porcentaje de saturación del OD y (e) concentración de OD entregados por el sensor HOBO U26, instalados en el anclaje de Melinka durante enero-abril 2016.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

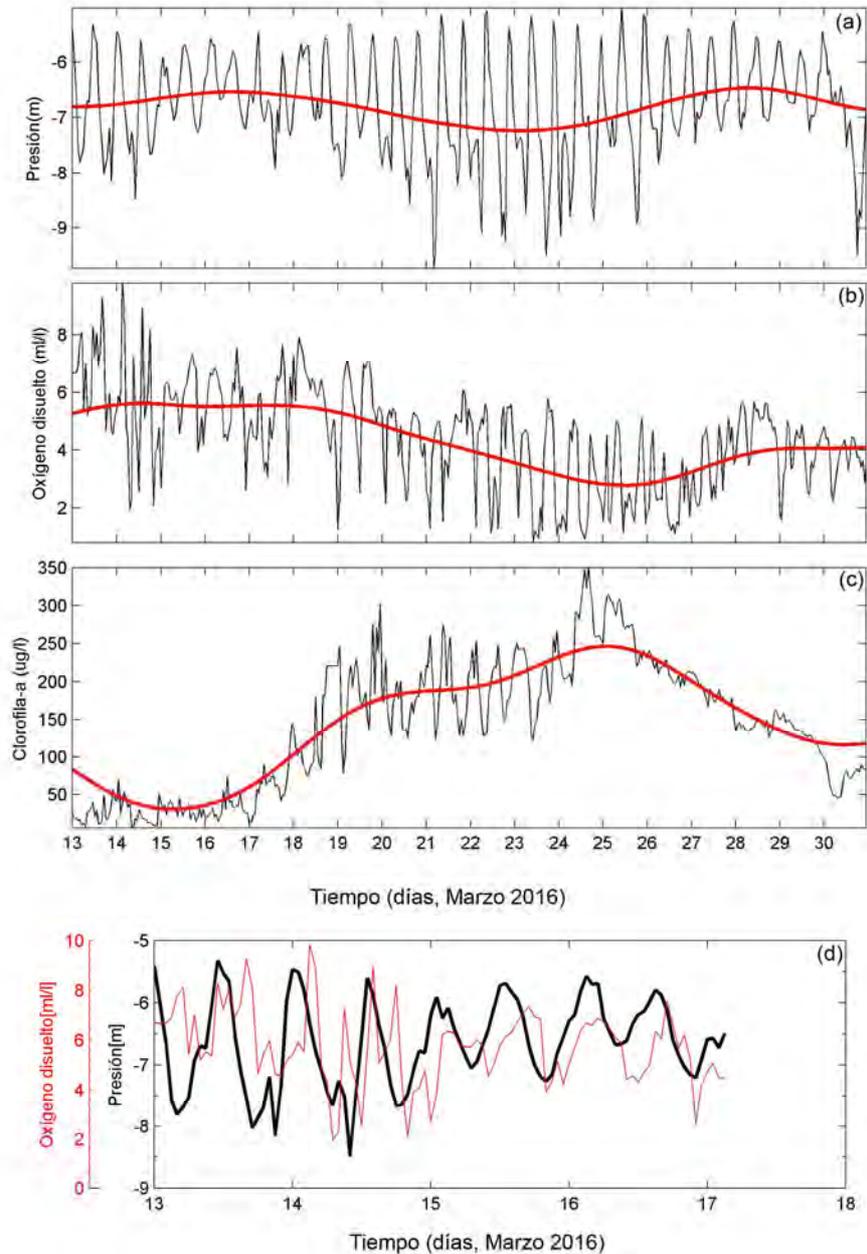


Figura 37. (a) Serie de presión, (b) concentración de oxígeno disuelto, (c) clorofila-a obtenidas de la sonda YSI 6600 y el sensor HOBO U26, instalados a ~7 metros de la superficie del mar en el anclaje de Melinka durante enero-abril 2016. (d) Muestra un ejemplo del momento de coincidencia entre la presión y el oxígeno disuelto. Las líneas de color rojo en (a), (b) y (c) representan las series filtradas con un coseno de Lanczos de 40 horas que eliminó el efecto de la marea.

4.7. Procesamiento y análisis de los datos series de tiempo del anclaje sur Puyuhuapi.

4.7.1. Serie de tiempo hidrográfica a 5 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).

La temperatura del agua fue más cálida durante el verano como era de esperar. Sin embargo, durante estos meses se observó mayor variabilidad que en el invierno (Figura 38a). Su rango de variabilidad estacional fue de 10°C a 15°C. Esta sección de la columna de agua estuvo dominada por las aguas estuarinas saladas (salinidad, 21-31), presentándose un evento de baja salinidad (~12) en septiembre. La salinidad promedio fue de 25.7 ± 3.5 (Figura 38b). Los valores de OD estuvieron encima de las concentraciones letales (2.8 mL/L) para peces, pero igualmente el OD presentó alta variabilidad en verano y otoño (Figura 38c), estando estas en el orden de los 3mL/L, por ejemplo de febrero a marzo. Durante el invierno el comportamiento fue más homogéneo entre los 5-6 mL/L, observándose un ligero incremento de julio a septiembre. La saturación de OD fue superior al 60%, alcanzando máximos de 153 % en mayo (Figura 38d).

4.7.2. Serie de tiempo hidrográfica a 30 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).

A los 30 metros de profundidad la variabilidad observada en la superficie fue menor (Figura 39). Los rango de temperatura y salinidad fueron 10-12°C y de 28.8-29.8, respectivamente (Figura 39a y 39b). El OD registros valores mínimos durante marzo y abril que llegaron al límite de las concentraciones letales para peces (2.8 mL/L) (Figura 39c). El mínimo absoluto fue de 2.6 mL/L (3.7 mg/L) con saturación de 50.4% (Figura 39d). Durante el invierno el OD se incremento hasta mediados de agosto, donde alcanzó los 5.5 mL/L y en octubre y noviembre se registraron dos eventos de incremento de OD en el rango de 1-2 mL/L. El evento de baja de OD del verano estuvo acompañado de temperaturas del agua bajas y salinidades ligeramente altas y será analizado con mayor detalle en la sección 4.13.

4.7.3. Serie de tiempo hidrográfica del fondo (MicroCat y MiniDOT).

Los registros hidrográficos obtenidos en el nivel del fondo entre los 195 y 204 m de profundidad mostraron un ligero incremento de la temperatura del agua de 9.2° C (febrero-a abril) a 9.7°C desde finales de septiembre hasta octubre (Figura 40). El segundo tramos de la serie de salinidad mostro registros del AESS, manteniéndose la condición hasta finales de agosto, donde la salinidad disminuye ligeramente hasta el borde superior del ASAA. Al igual que en Melinka, la condición de hipoxia no se mantuvo permanente. Durante febrero-marzo y octubre-noviembre los valores de saturación sobrepasaron los 30 %, siendo el otoño y el invierno donde se reportaron los valores más bajos de OD, cercanos a 1 mL/L (Figura 40, panales inferiores).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

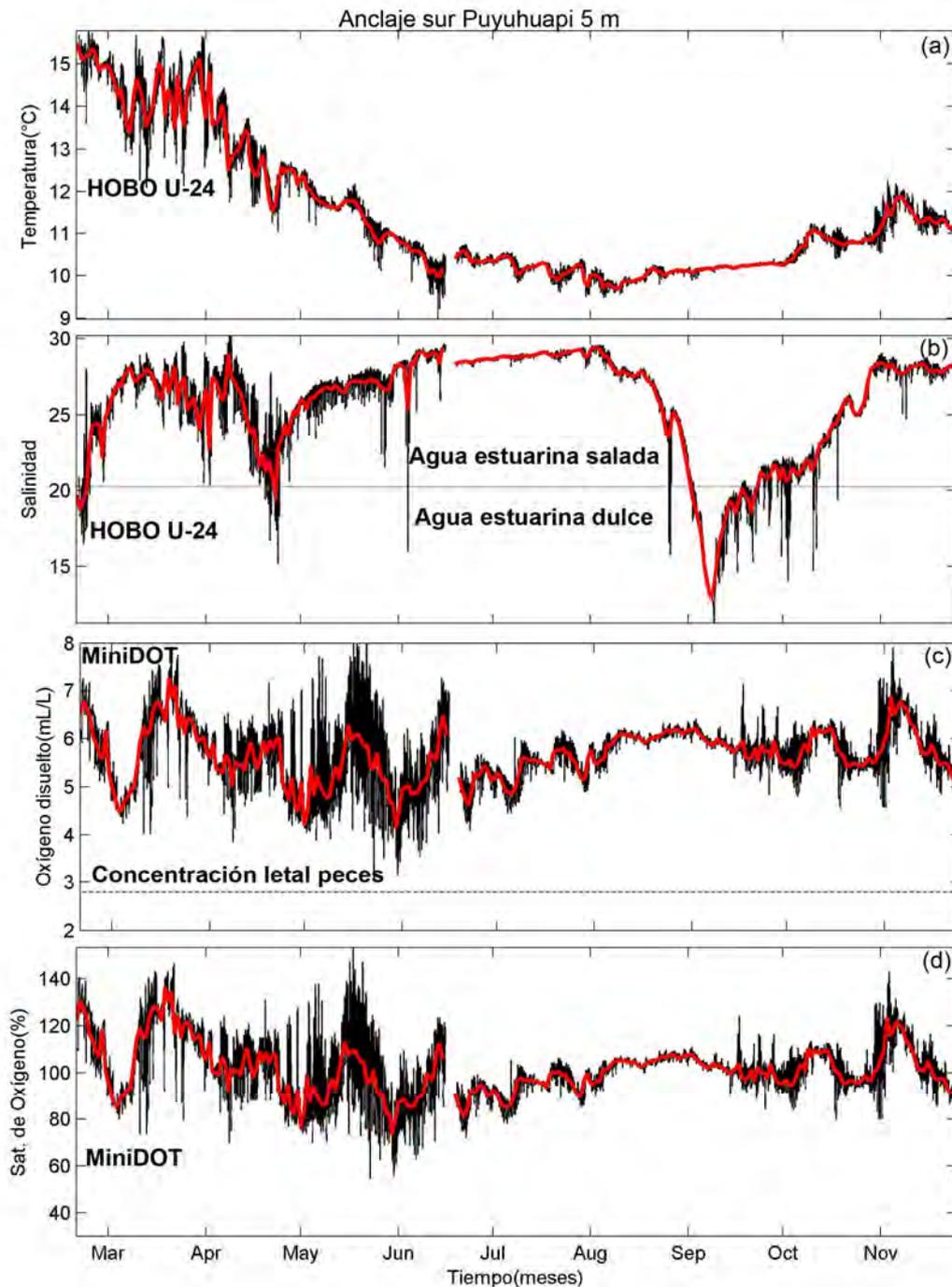


Figura 38. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) ODy (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~5 m de la superficie del mar en el anclaje sur de Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas de salva de datos mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).

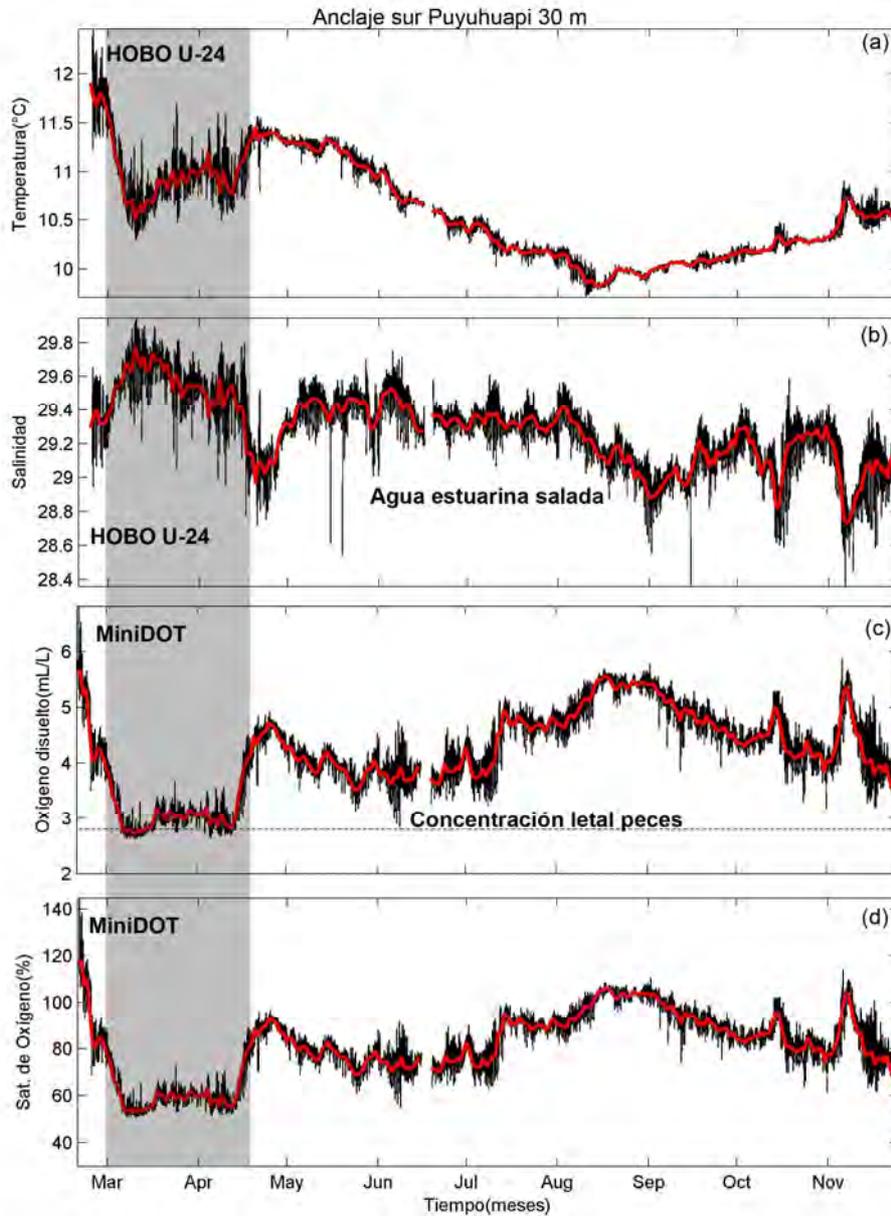


Figura 39. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) ODy (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~30 m de la superficie del mar en el anclaje sur de Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

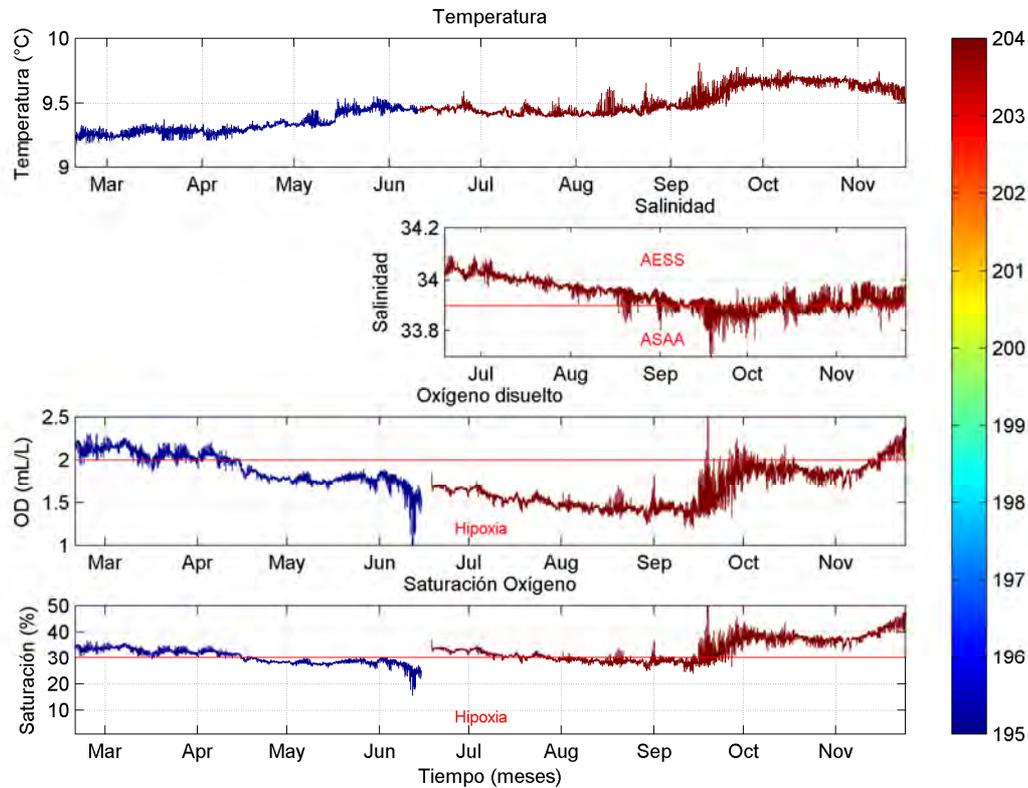


Figura 40. Temperatura, salinidad, OD y porcentaje de saturación obtenido de un MicroCat ubicado en el nivel de fondo en el anclaje sur de Puyuhuapi, durante febrero y noviembre 2016. La barra de colores indica la profundidad de referencia de posición del instrumento en el anclaje.

4.8. Procesamiento y análisis de los datos series de tiempo del anclaje norte Puyuhuapi.

4.8.1. Serie de tiempo hidrográfica a 1m y 5 metros (Boya, HOBO U-24 y MiniDOT).

En el nivel superficial más somero muestreado, registrado por la boya oceanográfica, las temperaturas del agua más altas se observaron durante el verano entre los 18 y 22° C (Figura 41a). La salinidad fue baja en primavera y verano debido al aporte de aguas dulces del derretimiento de los glaciales. Mientras, las salinidades más se registraron durante el otoño y el invierno (Figura 41b). El OD se mantuvo alto durante todo el año, registrándose los máximos a finales de agosto e inicio de septiembre (Figura 41c y 41d). Aunque las concentraciones de clorofila-a fueron muy altas en algunos periodos del año, estas fueron usadas para identificar los periodos con alta productividad de algas y consumo y producción del OD debido a la actividad del fitoplancton (Figura 41e, los círculos negros corresponden a los momentos de mantención de la boya). En general, se destacaron tres periodos del año donde las concentraciones de OD aumentaron en respuesta del aumento de la clorofila-a: en febrero, en septiembre-octubre y durante mayo-junio donde también se reportaron varios momentos de mínimos valores.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

A 5 metros de profundidad en la misma zona muestreada, la temperatura del agua mostro un comportamiento similar, con máximos en primavera-verano y mínimos en otoño-invierno (Figura 42a). Las aguas estuarinas mantuvieron su influencia en esta capa, con mayor variabilidad durante el verano (Figura 42b). Los valores de OD y saturación se mantuvieron por encima de las concentraciones letales para peces (Figura 41c y 41d).

4.8.2. Serie de tiempo hidrográfica a 30 metros (HOBO U-24 y MiniDOT).

En el nivel de 30 metros de profundidad la temperatura del agua se varió entre 10-12° C, con mínimos en agosto y máximos en febrero (Figura 43a). La primera serie de la salinidad registró la influencia del agua estuarina salada. Sin embargo, su segundo tramo no pudo ser mostrado por fallas en el equipo (Figura 43b). Durante junio y julio las concentraciones de OD tuvieron mínimos cercanos a los letales para peces y después se incrementaron hasta los 5.5 mL/L a finales de agosto (Figura 43c). Mientras, la saturación se mantuvo por encima de 40 % (Figura 43d).

4.8.3. Serie de tiempo hidrográfica a 94 m y cerca del fondo.

En los aproximados 94 metros de profundidad se obtuvo una serie de temperatura que mostró un rango de variabilidad entre los 9.5° C en verano para alcanzar máximos en invierno de 10.7° C (Figura 44a). Mientras, en el equipo instalado a ~220 metros de profundidad en este mismo sector norte de Puyuhuapi la serie de temperatura de agua mostró valores muy bajos entre los 9.25-9.4°C (Figura 44). A pesar de esto, se registro un leve incremento de sus valores a partir del invierno como a los 94 m, alcanzando su máximo en primavera (Figura 44b). En caso de la salinidad solo se pueden rescatar el primer tramo de la serie, pues los datos del segundo tramo se fueron de rango por mal funcionamiento del equipo. En el periodo valido de los datos la salinidad fue constante, cerca de los 34 (Figura 44c). En este mismo punto el equipo MiniDOT también presentó problemas de funcionamiento y no se obtuvieron datos.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

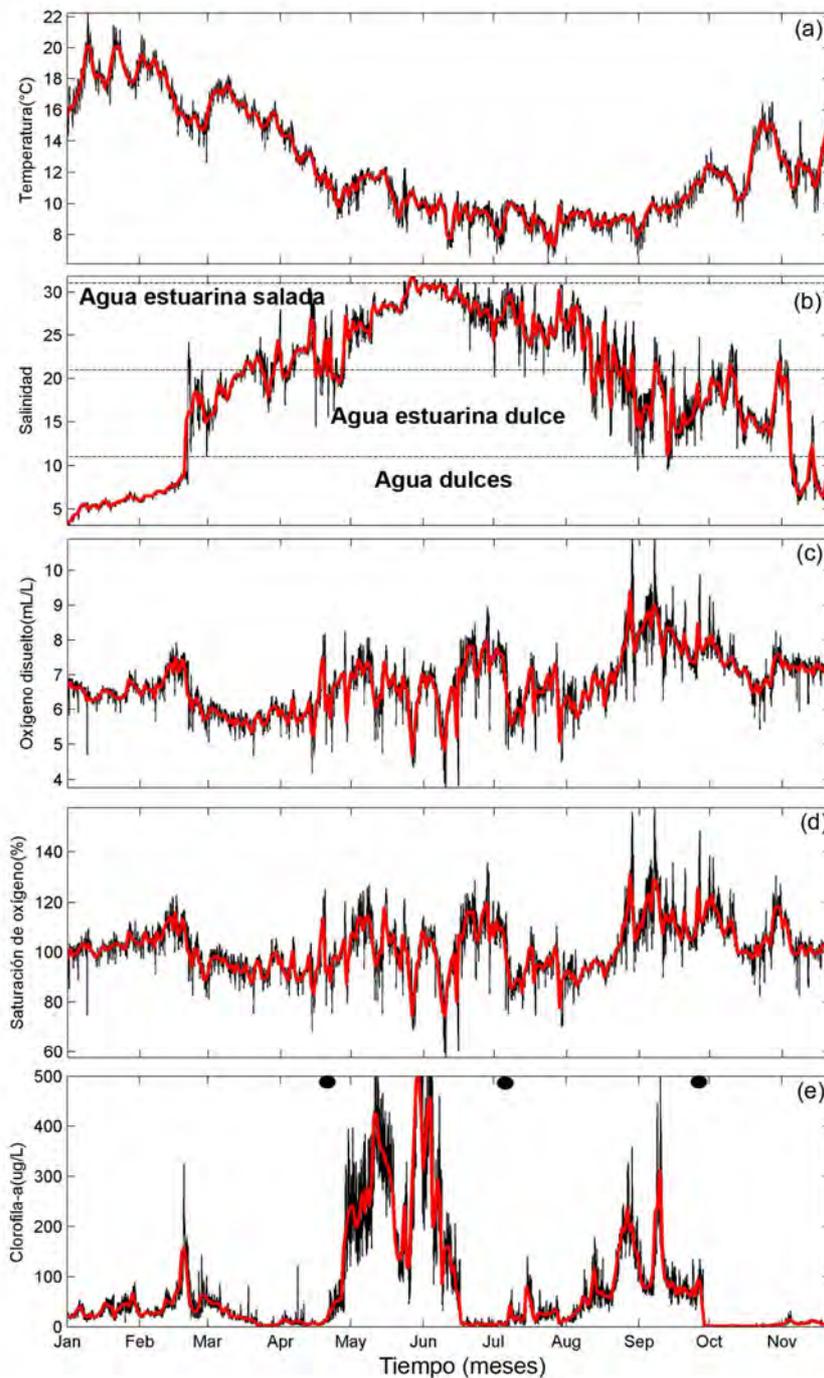


Figura 41. Serie de tiempo de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, saturación de OD y clorofila a 1 m de profundidad, registradas durante el 2016 en la boya oceanográfica instalada en las cercanías del anclaje norte de Puyuhuapi. Los círculos negros en los datos de clorofila-a señalan los momentos en que se realizaron las mantenciones físicas de la boya.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

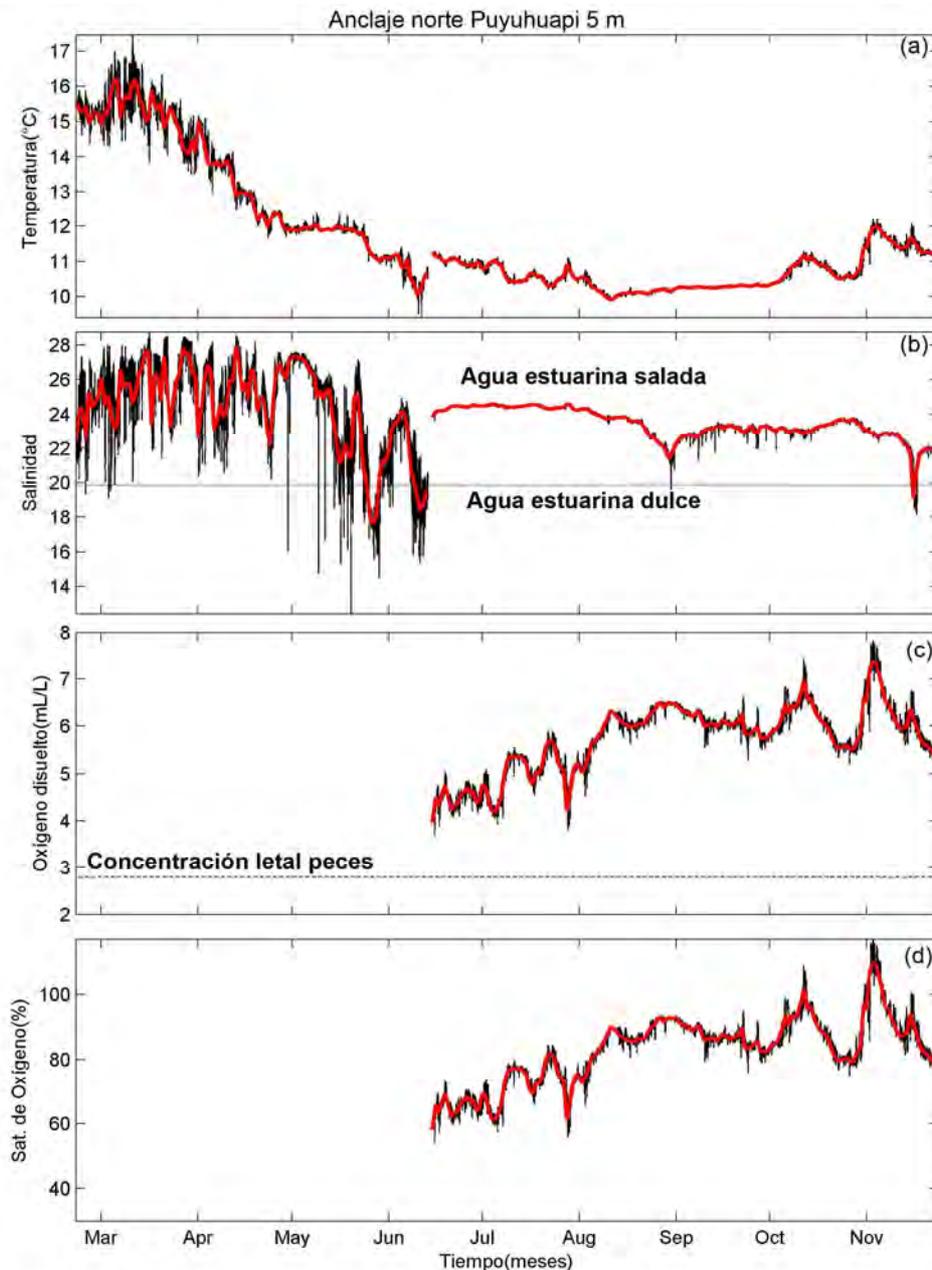


Figura 42. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) OD y (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~5 m de la superficie del mar en el anclaje norte de Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

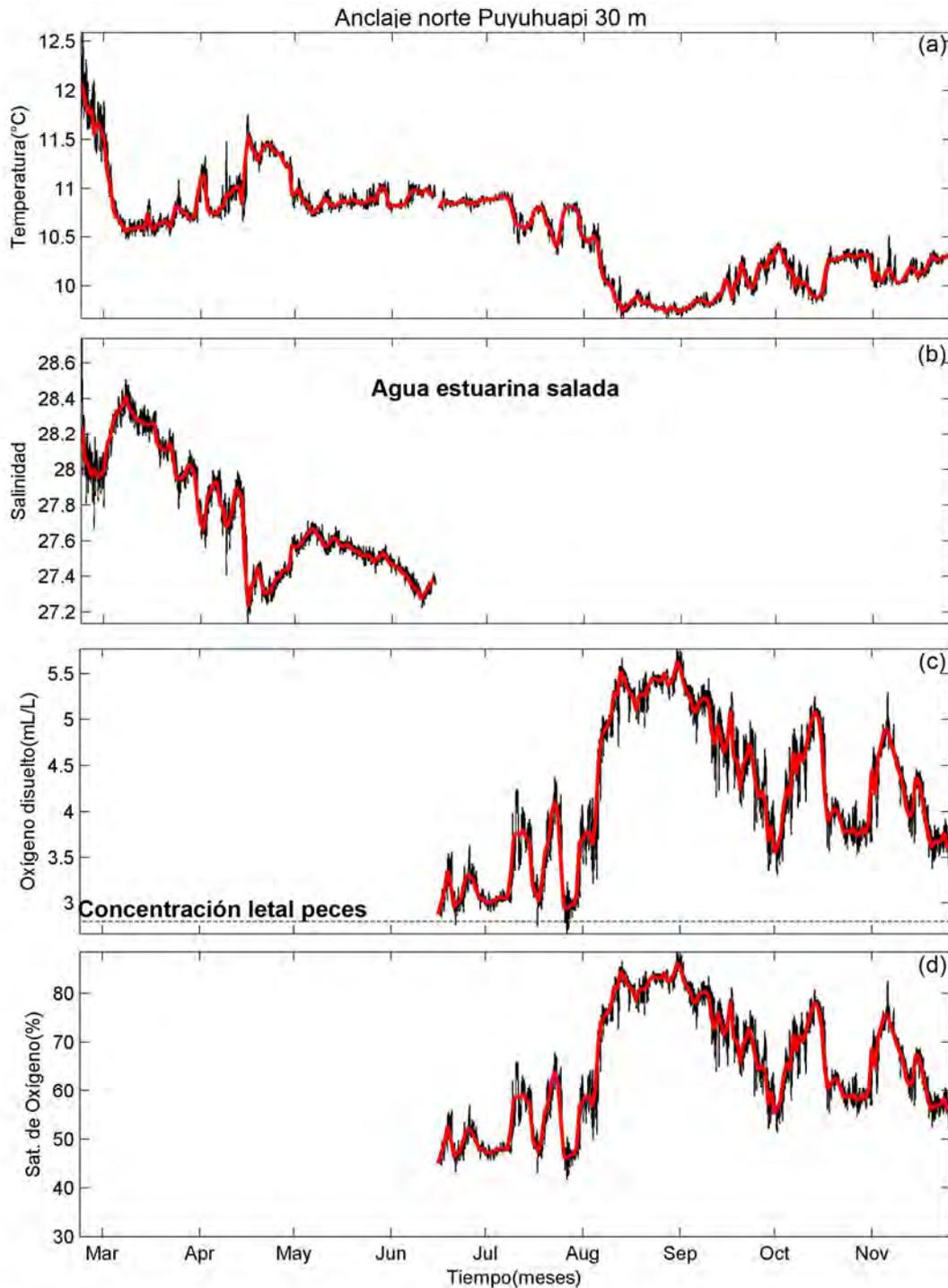


Figura 43. (a) Serie de temperatura del agua y (b) salinidad obtenida de un equipo HOBO U-24 y de (c) OD y (d) porcentaje de saturación del MiniDOT. Ambos equipos se colocaron unidos en el nivel ~30 m de la superficie del mar en el anclaje norte de Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre 2016. La profundidad de los equipos fue ajustada en ambas campañas mediante buceo autónomo usando un profundímetro. Los datos horarios fueron promediados a diarios (línea roja).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

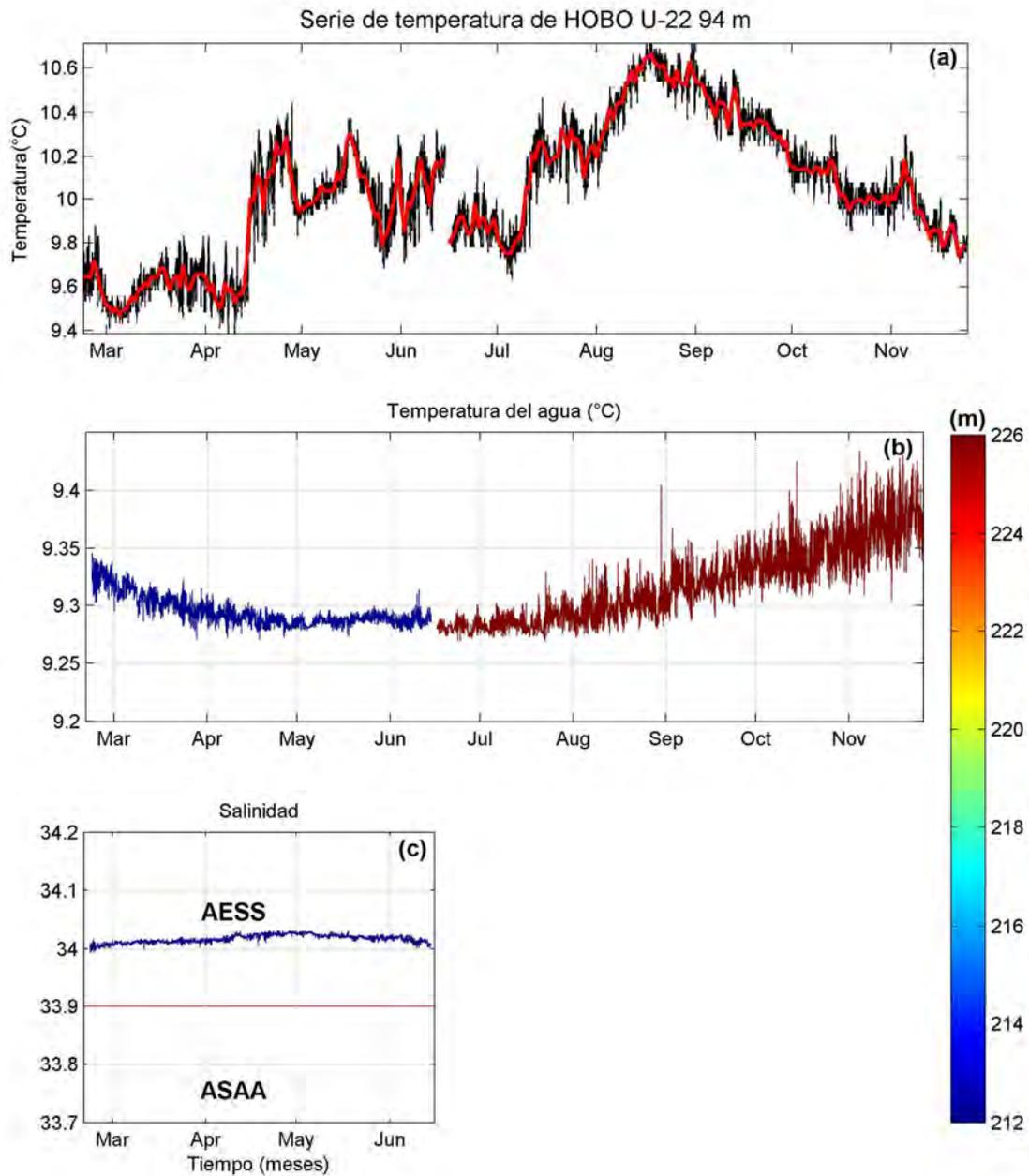


Figura 44. (a) Serie temporal de la temperatura (línea negra representa registros horarios y la roja diarios) obtenida de un HOBO U-22 a ~94 metros de profundidad. (b-c) Serie de temperatura y salinidad del agua obtenida del MicroCat instalado a ~220 metros de profundidad en el norte del fiordo Puyuhuapi.

4.9. Procesamiento y análisis de datos de ADCP - anclaje Melinka.

En la zona de Melinka, se instaló un arreglo de correntómetros con la finalidad de efectuar la descripción de las corrientes del sector. Se instaló un correntómetro perfilador acústico Doppler (ADCP) Teledyne RD Instruments modelo WH-300, el cual se situó con los transductores mirando hacia abajo. El ADCP fue programado para medir en celdas de 1 m cada 1 h. El análisis de frecuencia de dirección y magnitud para el periodo completo de mediciones indicó que las corrientes entre los 50 m y 70 m fueron predominantes (> 10%) hacia el Oeste, direcciones hacia el Este incrementan su presencia desde los 70 m logrando explicar más del 10% de los casos e intensidades sobre los 31 cm/s (Figura 45, Tablas 19-22). El cambio de dirección predominante se observó claramente entre los 90 m y los 130 m donde la dirección predominante fue la Este explicando más del 10% entre los 90 y 100 m, y sobrepasando el 20% en la zona más profunda. Las corrientes en esta zona mayor de 100 m alcanzaron intensidades mayores a 41 cm/s durante todo el periodo de muestreo (Figura 46, Tablas 19-22). Las corrientes del sector, poseen una clara alineación con la costa, la cual fue percibida en los diagramas de dispersión de las componente U y V (Figura 47 y 48). En estos diagramas se aprecia que las componentes tienden a orientarse en el eje Este-Oeste (U), especialmente las corrientes > 80 m donde la nube de dispersión tiende a formar una elipse, con intensidades máximas que superaron los 50 cm/s a 110 m (Figura 48).

Con la finalidad de efectuar una aproximación a las características de dispersión del área de Melinka, se procedió a estimar los diagramas de vector progresivo (PVD, en sus siglas en inglés). Este análisis supone que una parcela de agua ubicada a la profundidad de cada celda indicada, se desplaza en un campo de corrientes espacialmente homogéneo a esa profundidad. Este supuesto es especialmente válido para mediciones de ADCP que asume que no hay cizalle vertical dentro de una misma celda de profundidad. Los resultados del análisis de PVDs muestra que, las corrientes entre los 46 y los 60 m (Figura 49) muestran un desplazamiento neto hacia el Oeste, el cual es del orden de 1000 km en 11 meses lo cual es consistente con la intensidad promedio del orden de 60 cm/s observada en los vectores medios de las corrientes (Figura 57). El PVD de las corrientes a 70 m muestra un cambio en la dirección media de las corrientes, las que en promedio se orientaron hacia el Noroeste (Figura 49). Esta transición de las corrientes promedio también se presentó en las corrientes medidas entre los 80 m y los 90 m con desplazamientos promedios menores a los 700 km en esas profundidades (Figura 50). En la zona más profunda (> 100 m) las corrientes se intensificaron y en promedio una partícula se desplazaría del orden de 1800 km en 11 meses hacia el Este, consistente con corrientes de mayor intensidad en torno a los 100 m como se apreció en las rosas de dirección/magnitud (Figura 46).

Con el objetivo de describir las principales oscilaciones presentes en las corrientes del sector se estimaron los espectros de energía de las corrientes en el sector (Figura 51 y 52). En estas figuras, la influencia de la frecuencia semi-diurna mareal (periodo de 12h) es evidente llegando a representar del orden de 10^5 [cm^2s^{-2} cph^{-1}], de densidad espectral en prácticamente todas las profundidades analizadas. Esto implica que, el principal componente mareal de las corrientes del sector es semi-diurno, y además su amplitud es altamente consistente en profundidad. La importancia de la frecuencia diurna de mareal (periodo de 24h) no es apreciable en ninguna de las profundidades analizadas.

Para efectuar una descripción del comportamiento del vector corrientes en profundidad, se graficaron los diagramas de trazos de las corrientes del sector (Figura 53).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Note que, en la figura los ejes han sido rotados 180°, puesto que como se indicó anteriormente, el eje de mayor variabilidad fue este-oeste. A pesar de que los espectros de energía sugirieron la importancia de la componente mareal no es apreciable en el desarrollo de los vectores en el tiempo. Esto es no se presentan marcados flujos y contra-flujos relacionados con llenante y vaciante. Las corrientes muestran claras oscilaciones de baja frecuencia (periodos > 5 días) con corrientes hacia el Este (hacia arriba en el gráfico) que se presentaron en marzo, mayo, junio y en el periodo septiembre-noviembre. Estas corrientes más intensas muestran estar más presentes en las corrientes bajo los 90 m de profundidad. Las corrientes entre 50 m y 80 m muestran ser de menor intensidad que las corrientes más profundas y su comportamiento muestra estar dominado por corrientes hacia el Oeste (hacia abajo en el gráfico).

La estructura de las corrientes en profundidad, se presenta en los contornos de intensidad de las componente U y V (Figura 54). En forma consistente con lo indicado previamente, la componente U es la que desarrolla mayor intensidad respecto a V, por lo cual la descripción estará centrada en esta componente. Entre los 50 y 80 m de profundidad, las corrientes del sector muestran ser en forma predominante de signo negativo (hacia el Oeste) con periodos hacia el Este asociados a pulsos de corrientes hacia el Este que abarcan entre los 50 y los 140 m. En este gráfico se puede apreciar que existen periodos donde las corrientes muestran una marcada dirección en todas las profundidades analizadas: entre mayo y julio las corrientes son principalmente hacia el Este, mientras que entre julio y septiembre las corrientes del sector muestran dirigirse en forma predominante hacia el Oeste. Las corrientes filtradas (Figura 56) muestran en forma más clara el comportamiento antes indicado de las corrientes del sector, los pulsos hacia el Este parecen estar relacionados con periodos de sicigia, especialmente entre septiembre y noviembre. Las corrientes promedio (Figura 57) muestran que entre los existe un marcado patrón en profundidad: corrientes hacia el Oeste entre los 45 y los 70 m, y hacia el Este entre los 90 m y los 140 m de profundidad.

Con la finalidad de cuantificar la influencia del forzante mareal en profundidad, se estimó el porcentaje explicado por el ajuste armónico entre los 45 y los 140 m de profundidad. La variabilidad explicada por la marea es > 20% entre los 45 m y 90 m, disminuyendo en forma marcada bajo los 100 m de profundidad (Figura 55).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

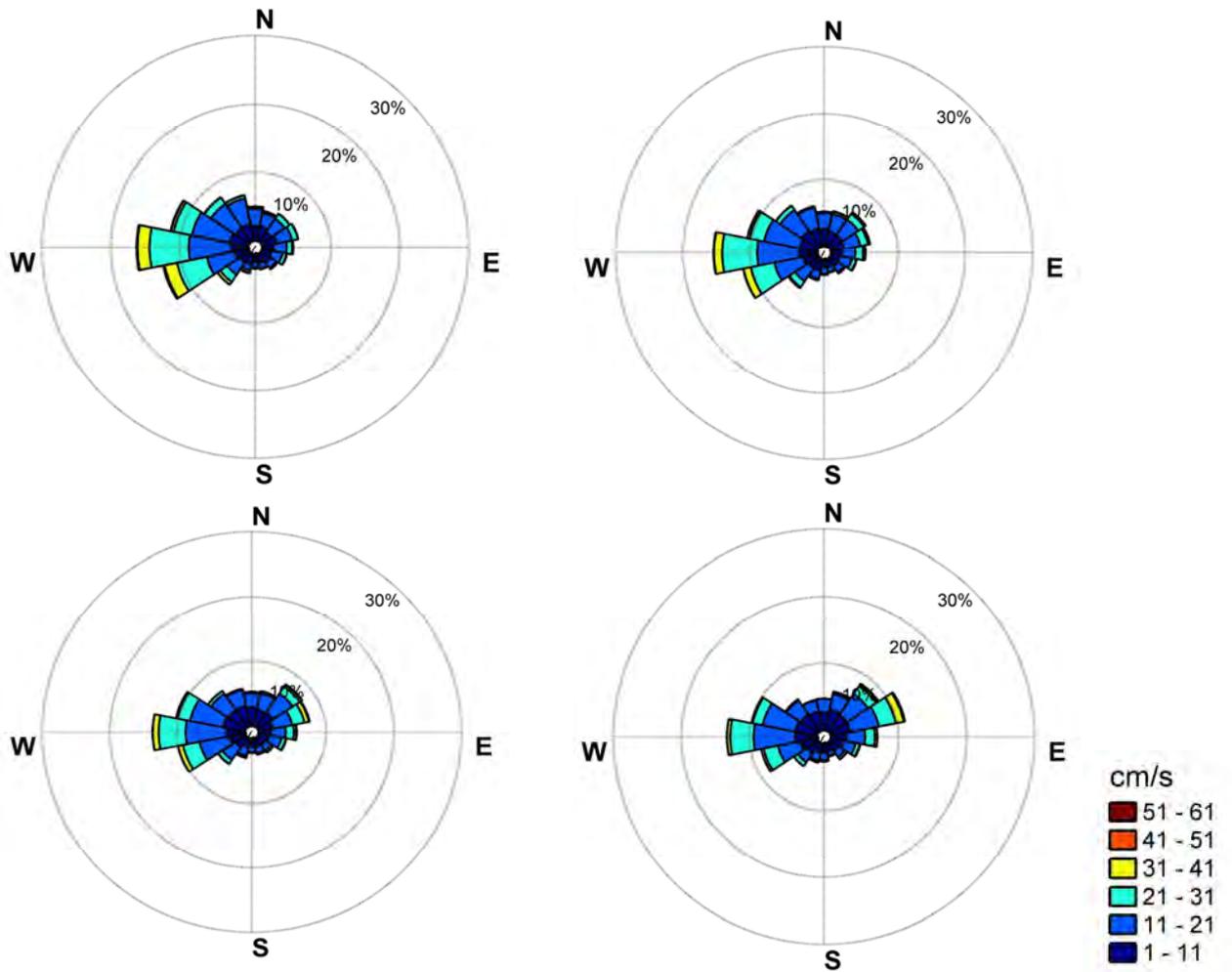


Figura 45. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 50 m, 60 m, 70 m y 80 m de profundidad en la zona de Melinka.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

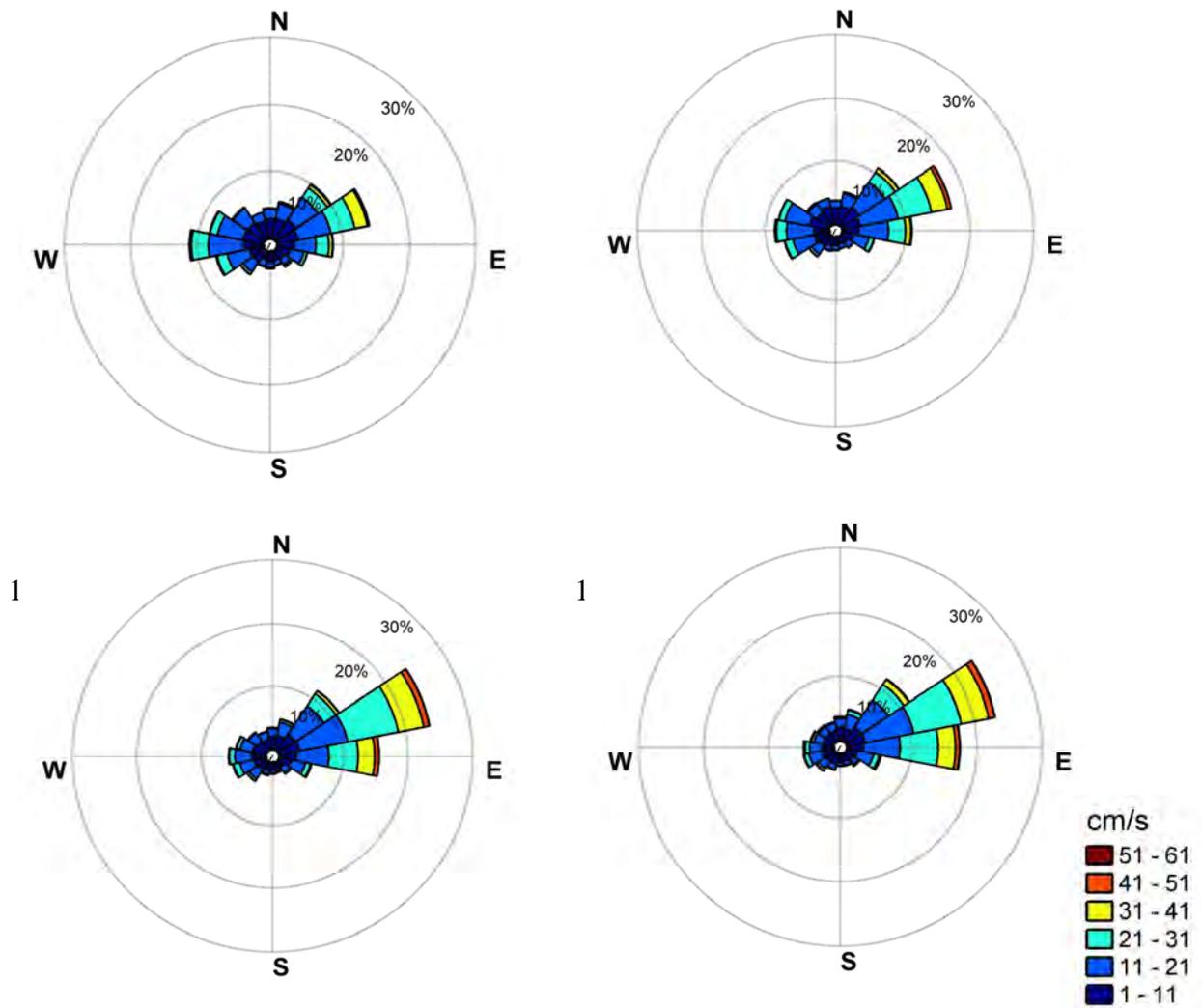


Figura 46. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 90 m, 100 m, 120 m y 130 m de profundidad en la zona de Melinka.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 19. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en anclaje de Melinka entre los 46 y 65 m.

	46 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	11,58	9,57	9,00	6,28	4,34	8,75	30,19	19,98	99,69
Máximos	38,60	36,17	42,68	37,26	33,75	42,46	56,04	45,30	56,04
Dir. Media	357,51	46,74	89,97	129,90	178,25	231,43	271,03	310,99	291,14
Mag. Media	12,88	13,08	14,55	13,68	10,61	15,97	20,77	16,14	7,49
Desv. STD.	14,46	14,99	16,71	15,69	12,50	18,69	23,13	18,12	18,73
	50 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	11,83	9,58	9,96	6,66	4,49	8,66	29,25	19,28	99,71
Máximos	49,85	34,54	39,40	36,62	32,03	45,41	48,73	48,35	49,85
Dir. Media	357,83	45,97	89,32	132,02	179,26	232,09	271,36	311,03	292,07
Mag. Media	12,54	12,77	13,99	12,38	10,35	15,33	20,45	15,41	6,96
Desv. STD.	14,12	14,68	16,22	14,51	12,17	18,04	22,75	17,39	18,14
	55 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	11,74	10,55	10,29	6,69	4,82	8,66	28,13	18,63	99,49
Máximos	55,44	38,82	53,09	35,64	33,89	45,49	51,29	45,52	55,44
Dir. Media	358,02	46,93	89,37	130,89	180,43	232,08	271,80	311,41	294,45
Mag. Media	11,60	13,36	14,57	13,04	10,14	14,84	19,61	14,70	6,01
Desv. STD.	13,20	15,32	17,19	15,28	12,01	17,34	21,87	16,67	17,62
	60 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	11,44	12,02	11,13	6,74	4,54	8,78	26,91	18,18	99,75
Máximos	30,40	44,99	47,36	41,55	40,29	42,02	55,14	43,41	55,14
Dir. Media	358,17	48,09	89,11	130,88	181,67	230,80	271,76	311,10	298,98
Mag. Media	11,22	13,51	15,49	12,97	10,78	13,42	18,96	14,31	5,08
Desv. STD.	12,60	15,72	18,16	15,19	12,91	15,80	21,22	16,21	17,28
	65 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	11,43	12,69	12,41	7,01	4,72	8,20	25,77	17,46	99,68
Máximos	33,32	48,60	44,37	37,47	34,56	37,46	50,03	41,83	50,03
Dir. Media	358,36	48,29	87,91	131,02	180,65	230,00	271,95	310,62	304,81
Mag. Media	11,10	13,65	15,96	13,03	10,93	13,17	18,38	13,78	4,24
Desv. STD.	12,50	15,91	18,79	15,29	12,81	15,38	20,55	15,59	16,99

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 20. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en anclaje de Melinka entre los 70 y 90 m.

	70 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	11,27	13,60	13,41	7,05	4,90	8,28	24,00	17,08	99,60
Máximos	31,58	49,70	46,12	40,77	36,91	34,43	47,97	40,17	49,70
Dir. Media	359,22	49,28	87,11	131,30	179,50	229,42	272,11	310,22	313,53
Mag. Media	10,59	13,71	16,82	13,10	10,62	13,18	17,55	13,44	3,38
Desv. STD.	12,01	16,02	19,63	15,27	12,71	15,20	19,78	15,30	16,74
	75 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	10,38	14,34	15,19	7,34	5,16	8,25	22,48	16,45	99,61
Máximos	27,47	50,64	50,17	42,43	33,45	35,14	46,15	40,68	50,64
Dir. Media	,24	49,72	86,28	130,98	180,09	229,81	273,14	310,29	326,45
Mag. Media	10,37	13,68	16,95	12,63	11,15	12,82	17,01	12,91	2,69
Desv. STD.	11,73	16,23	19,65	14,99	13,09	14,99	19,23	14,78	16,54
	80 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	9,66	14,78	17,86	7,58	4,80	7,44	22,02	15,37	99,50
Máximos	26,53	50,80	54,10	41,92	32,63	35,80	46,72	43,53	54,10
Dir. Media	0,11	49,81	85,62	131,70	181,15	228,28	273,10	309,63	345,81
Mag. Media	9,85	13,51	16,97	12,56	10,78	12,22	16,38	12,83	2,25
Desv. STD.	11,19	16,01	19,75	14,79	12,70	14,30	18,54	14,68	16,37
	85 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	9,29	15,78	19,88	7,54	4,77	6,86	20,96	14,59	99,68
Máximos	28,28	51,29	53,20	38,28	31,31	36,35	44,38	38,92	53,20
Dir. Media	0,16	50,71	85,33	132,42	181,45	228,30	273,01	309,55	13,65
Mag. Media	9,48	13,70	17,72	12,27	9,94	12,18	15,62	12,67	2,30
Desv. STD.	10,71	16,26	20,43	14,49	11,84	14,23	17,80	14,41	16,39
	90 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	8,78	16,04	22,51	7,74	4,78	6,86	18,73	14,14	99,58
Máximos	24,42	50,32	54,64	33,89	29,17	49,08	44,91	64,49	64,49
Dir. Media	0,93	51,43	85,11	130,81	181,24	230,03	272,82	310,70	37,07
Mag. Media	9,33	13,85	18,30	12,11	10,07	11,45	15,67	12,38	2,82
Desv. STD.	10,60	16,43	21,12	14,05	11,94	13,40	17,67	14,27	16,59

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 21. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en el anclaje de Melinka entre los 95 y 115 m.

	95 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	8,40	16,40	25,38	7,49	4,68	6,73	17,45	13,10	99,62
Máximos	28,47	46,09	55,28	32,71	26,70	34,97	62,28	37,23	62,28
Dir. Media	0,18	51,79	85,34	129,58	181,48	229,93	272,22	310,29	52,13
Mag. Media	9,16	13,97	18,82	12,49	9,96	11,19	15,17	12,44	3,57
Desv. STD.	10,39	16,54	21,60	14,38	11,72	13,12	17,28	14,16	16,86
	100 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	8,11	16,79	28,10	7,48	4,21	6,47	15,82	12,61	99,58
Máximos	47,26	49,84	52,13	37,58	27,07	34,09	49,55	60,02	60,02
Dir. Media	359,32	52,97	85,73	128,06	180,39	230,54	271,48	309,43	61,99
Mag. Media	8,95	14,18	19,67	12,62	9,90	11,22	14,87	12,21	4,60
Desv. STD.	10,28	16,65	22,37	14,57	11,53	13,12	16,92	14,14	17,29
	105 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	8,04	16,74	31,18	7,58	4,02	6,04	15,37	10,69	99,67
Máximos	26,39	44,78	57,36	46,93	26,59	32,39	47,25	58,12	58,12
Dir. Media	0,60	53,13	86,07	128,03	180,29	229,96	271,85	311,15	68,10
Mag. Media	8,74	14,25	20,39	12,37	9,36	11,21	14,58	12,24	5,68
Desv. STD.	10,04	16,51	23,13	14,49	11,21	13,08	16,63	14,06	17,76
	110 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	7,37	16,23	35,79	6,62	4,02	6,40	13,27	9,98	99,68
Máximos	29,77	61,61	52,62	38,66	49,67	30,74	50,97	32,89	61,61
Dir. Media	359,71	52,53	86,28	128,13	180,73	230,09	271,21	312,21	71,98
Mag. Media	9,23	14,41	20,81	11,83	9,11	10,74	14,47	11,94	6,93
Desv. STD.	10,52	16,74	23,50	13,93	10,94	12,55	16,57	13,68	18,28
	115 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	6,74	16,68	37,88	6,83	3,90	6,14	12,03	9,37	99,57
Máximos	78,45	52,23	53,87	48,98	37,68	85,69	47,09	47,65	85,69
Dir. Media	1,06	52,65	86,45	128,29	178,71	229,85	270,27	312,55	74,94
Mag. Media	9,70	14,53	21,43	12,22	9,12	11,73	14,26	11,86	7,92
Desv. STD.	11,78	16,76	24,11	14,59	10,68	14,59	16,39	13,71	18,93

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 22. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en el anclaje de Melinka entre los 120 y 135 m.

	120 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	6,62	16,95	39,03	7,58	3,62	6,18	11,12	8,52	99,62
Máximos	85,34	73,68	68,75	56,07	53,01	35,42	51,79	55,79	85,34
Dir. Media	0,95	52,60	86,59	127,68	180,93	230,61	270,47	312,35	76,63
Mag. Media	10,27	14,87	22,00	13,12	9,31	11,57	14,01	11,94	8,77
Desv. STD.	12,35	17,22	24,70	15,33	11,83	13,51	16,30	13,92	19,46
	125 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	6,90	16,96	40,09	8,03	3,35	6,27	10,56	7,33	99,49
Máximos	66,15	49,81	80,50	56,35	61,23	100,58	114,22	86,98	114,22
Dir. Media	1,43	52,60	87,14	127,52	180,74	229,52	270,25	313,11	78,30
Mag. Media	10,81	15,38	22,22	13,36	9,87	12,43	14,37	11,80	9,32
Desv. STD.	12,91	17,77	24,92	15,78	12,56	15,85	17,14	14,33	20,03
	130 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	7,10	17,22	40,49	7,95	4,03	6,39	9,46	7,02	99,67
Máximos	67,66	97,15	84,85	69,46	56,42	70,88	77,56	55,08	97,15
Dir. Media	1,84	52,31	87,57	127,85	179,98	228,95	269,70	312,29	78,85
Mag. Media	11,15	16,51	22,41	14,07	9,96	11,59	14,59	12,08	9,88
Desv. STD.	13,74	19,26	25,16	16,78	12,70	13,99	17,09	14,53	20,44
	135 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	6,38	17,77	38,63	8,39	4,27	6,22	9,11	6,30	97,07
Máximos	61,26	79,84	94,58	111,65	64,36	124,99	60,20	98,23	124,99
Dir. Media	2,24	52,64	87,87	127,08	181,73	227,54	269,82	312,40	79,74
Mag. Media	12,05	17,24	22,50	14,79	10,43	12,84	15,01	12,48	10,04
Desv. STD.	14,88	20,06	25,25	18,66	13,43	16,01	17,60	15,61	20,71

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

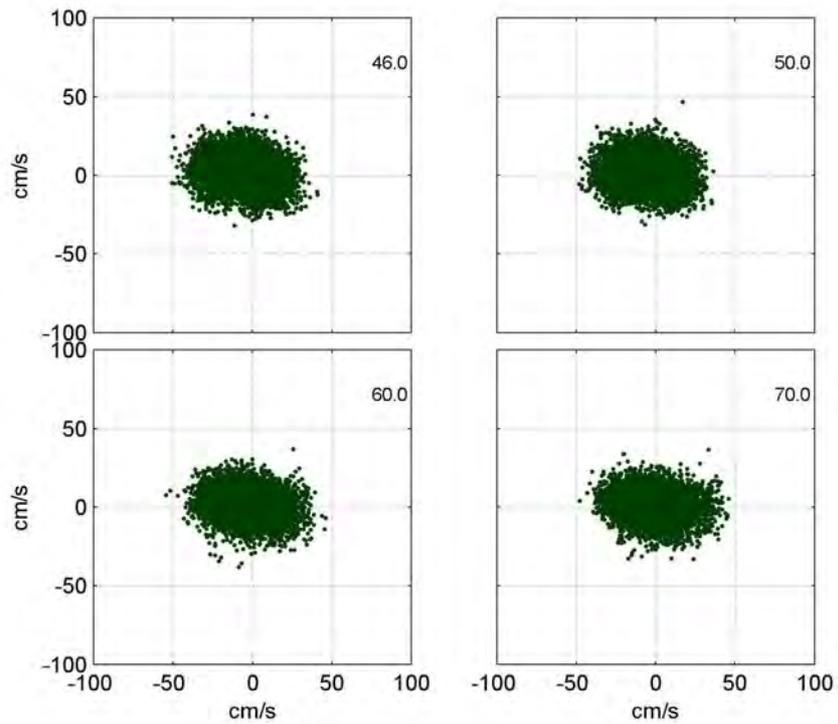


Figura 47. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de Melinka entre los 46 y 70 m.

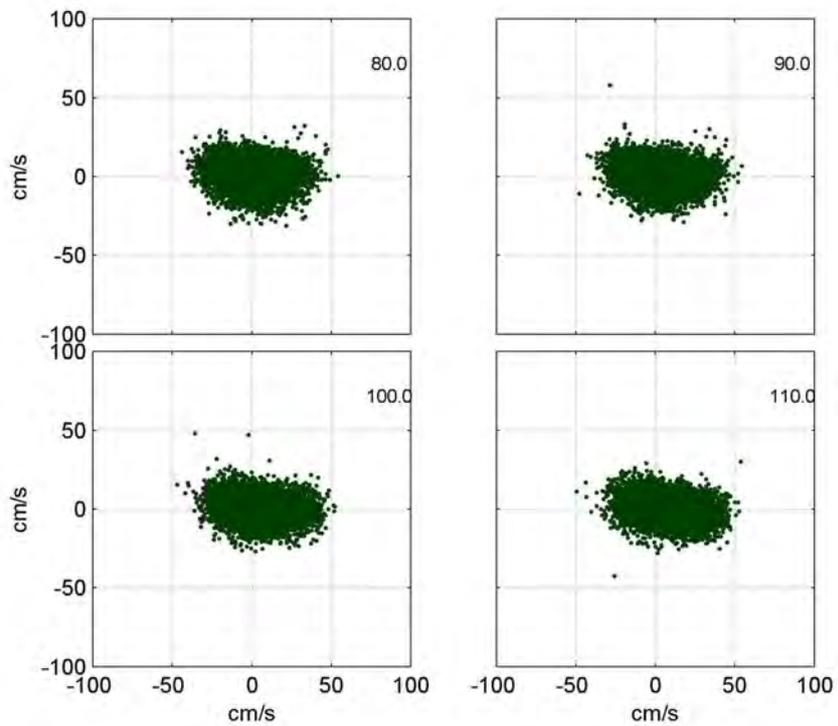


Figura 48. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de Melinka entre los 80 y 110 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

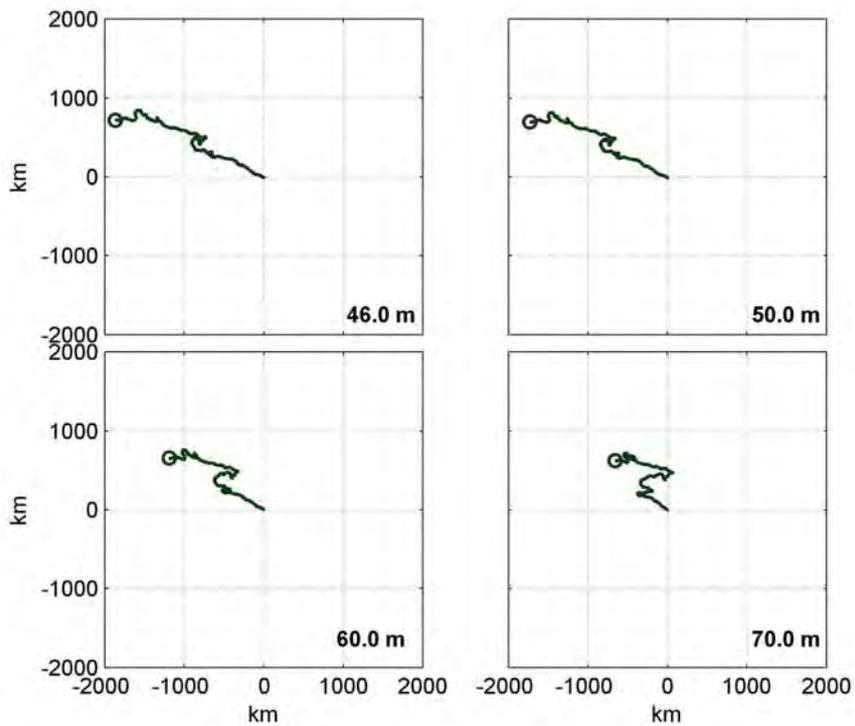


Figura 49. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de Melinka entre los 46 y 70 m.

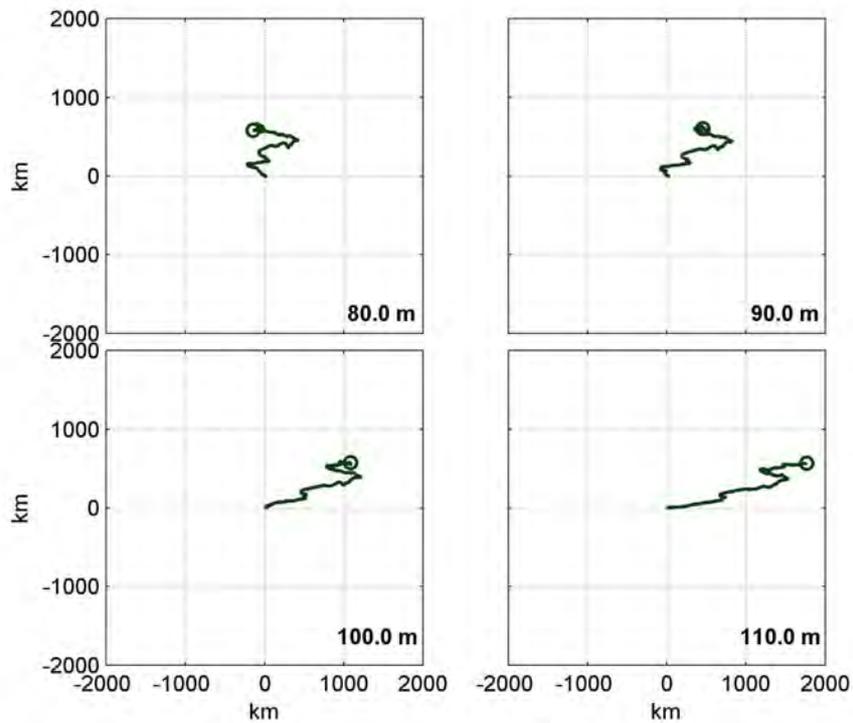


Figura 50. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de Melinka entre los 80 y 110 m.

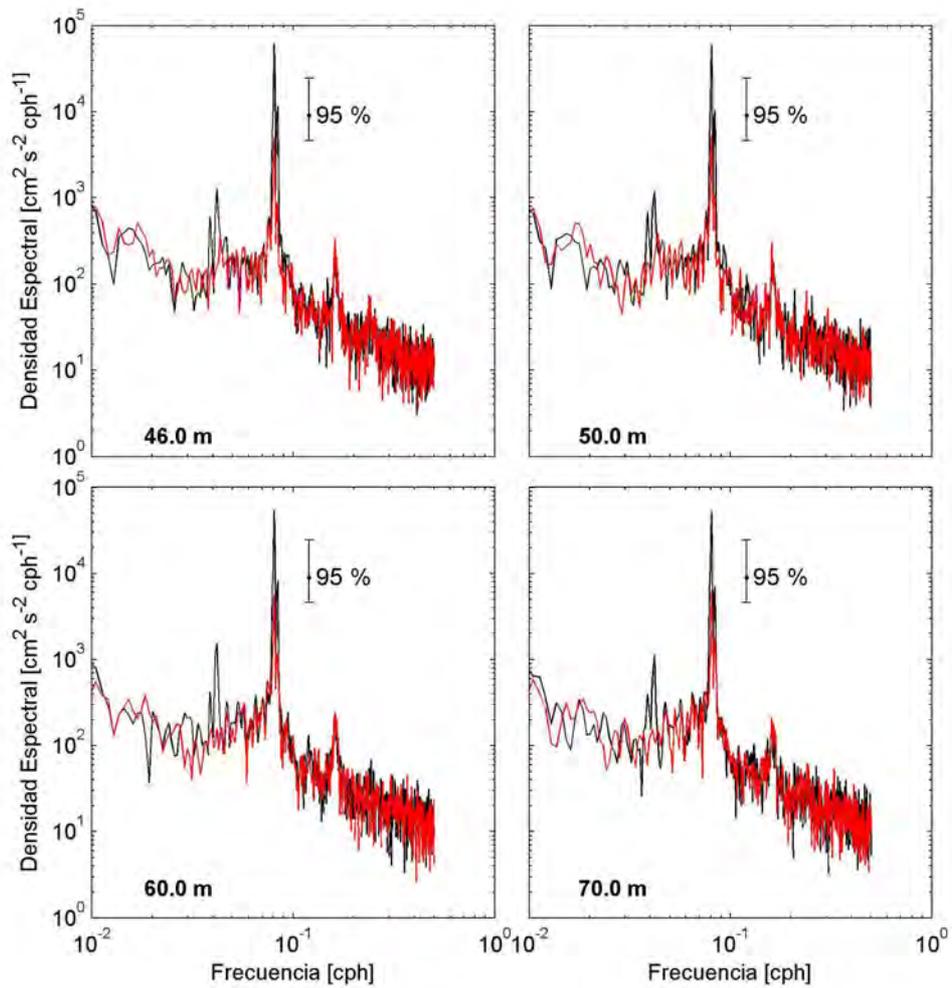


Figura 51. Espectros de energía de las componentes U (negro) y V (rojo) de las corrientes de Melinka entre los 46 y 70 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

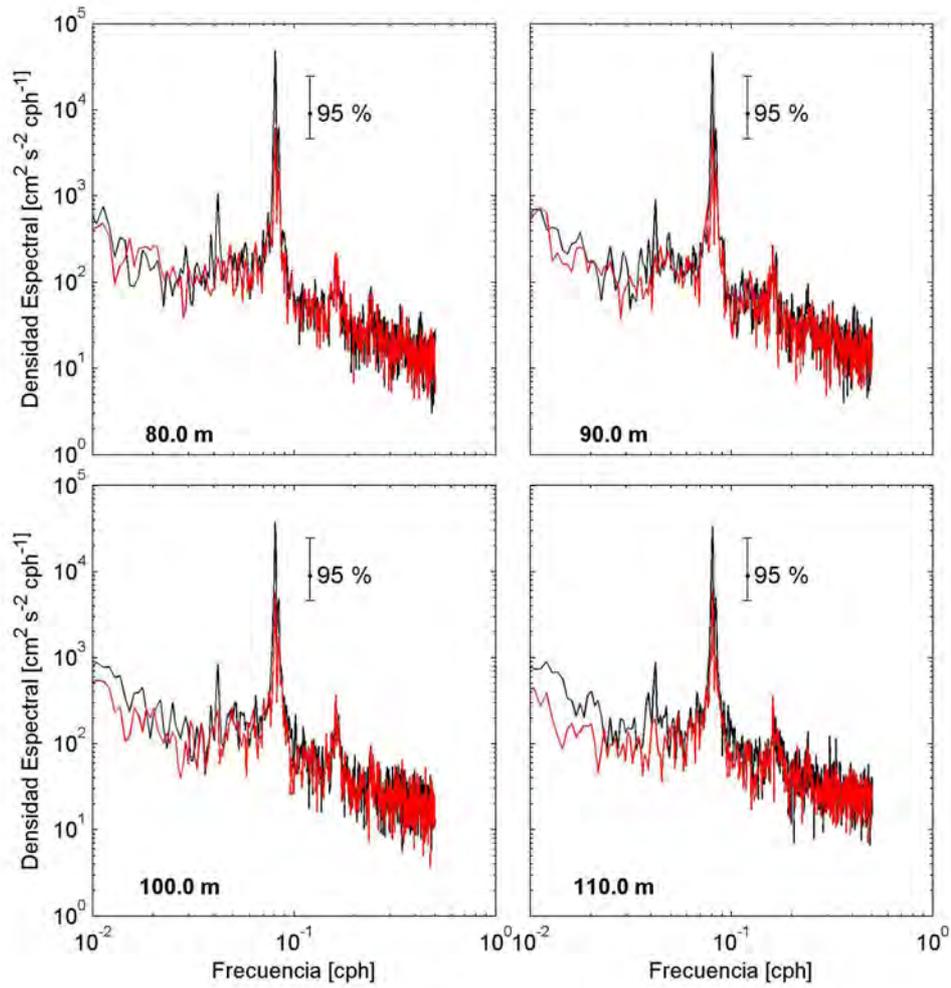


Figura 52. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de Melinka entre los 80 y 110 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

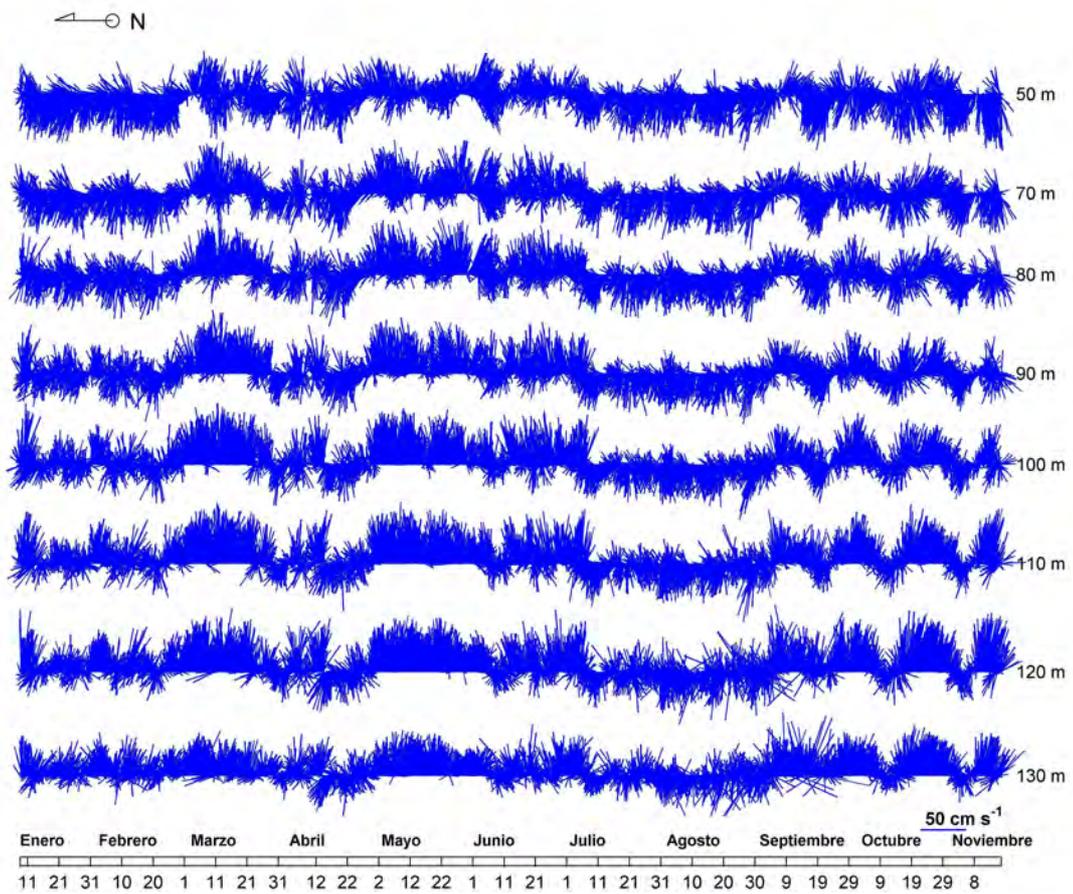


Figura 53. Diagrama de trazos de las corrientes medidas en Melinka. Las corrientes han sido rotadas de acuerdo al eje del canal.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

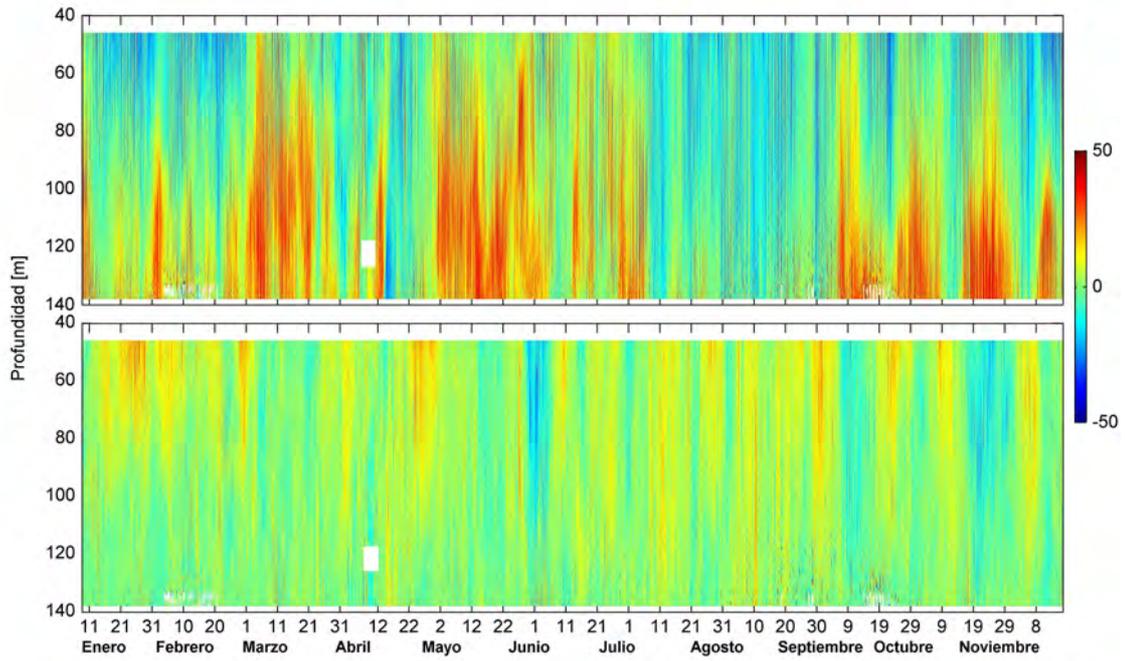


Figura 54. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en Melinka. Las unidades están expresadas en cm/s.

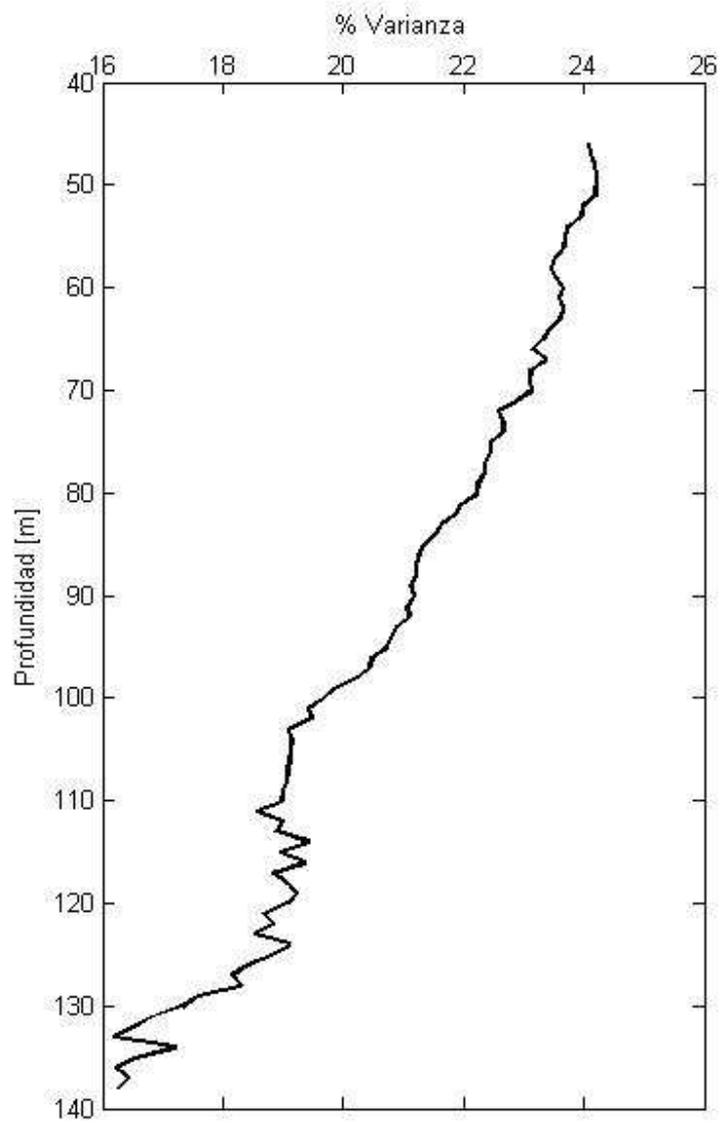


Figura 55. Importancia de la marea en profundidad.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

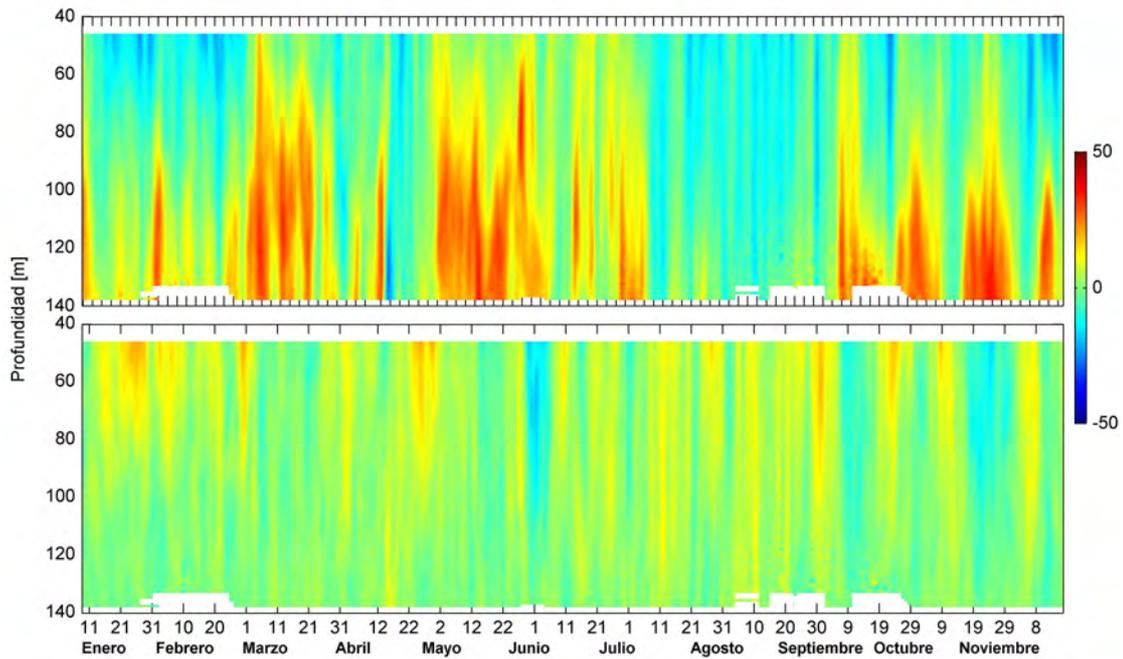


Figura 56. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en Melinka. Las unidades están expresadas en cm/s.

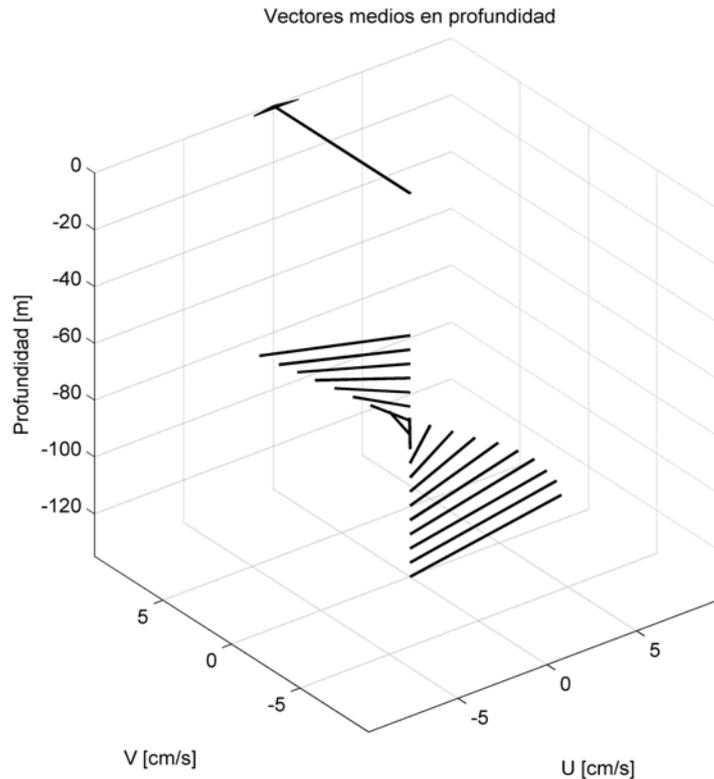


Figura 57. Vector promedio en profundidad en el anclaje de Melinka.

4.10. Procesamiento y análisis de los datos de ADCP - Puyuhuapi Sur.

En la zona de Puyuhuapi Sur, se instaló un arreglo de correntómetros con la finalidad de efectuar la descripción de las corrientes del sector. Se instaló un correntómetro perfilador acústico Doppler (ADCP) Teledyne RD Instruments modelo WH-300, el cual se situó con los transductores mirando hacia abajo. El ADCP fue programado para medir en celdas de 1 m cada 1 h. El análisis de frecuencia de dirección y magnitud para el periodo completo de mediciones indicó que las corrientes entre los 100 m y 150 m, presentaron un marcado eje de variabilidad en las direcciones Este/Oeste, explicando más del 30% de los casos en todas las profundidades. Las corrientes de mayor intensidad se presentaron asociadas al segundo cuadrante (Noreste) con intensidades que pueden superar levemente los 50 cm/s. En general las corrientes del sector presentaron magnitudes menores a los 20 cm/s que representaron más del 50% de los casos en todas las profundidades analizadas. (Figura 58 y 59, Tablas 23-27).

Al igual que en Melinka, las corrientes del sector se presentan marcadamente alineadas con la costa, lo que es claramente distinguible en los diagramas de dispersión de las componentes U y V (Figuras 60 y 61). Los diagramas muestran que las corrientes tienden a orientarse en el eje Este-Oeste (U) en todas las profundidades, generando una elipse de variabilidad con muy pocos valores escapados en la columna de agua. En los diagramas es posible observar que las corrientes del sector tienden a superar los 50 cm/s en la dirección Este, es decir hacia el interior del fiordo.

Para efectuar una aproximación a las características de dispersión del área, se estimaron los diagramas de vector progresivo (PVD, en sus siglas en inglés). Este análisis supone que una parcela de agua ubicada a la profundidad de cada celda indicada, se desplaza en un campo de corrientes espacialmente homogéneo a esa profundidad. Este supuesto es especialmente válido para mediciones de ADCP que asume que no hay cizalle vertical dentro de una misma celda de profundidad. Los diagramas de vector progresivo muestran que existe un mínimo desplazamiento neto de las partículas bajo los supuestos del PVD. A 80 m y 85 m de profundidad los desplazamientos netos no son significativamente diferentes de cero km, esto sugiere que las corrientes del sector son de baja intensidad y que además los flujos son compensados por el contrario-flujos (Figura 62). En las corrientes más profundas (> 90 m) se observa que existe la tendencia a aumentar el desplazamiento de una partícula alcanza a 100 km hacia el Este a 110 m y a más de 200 km hacia el Este a 140 m de profundidad (Figura 63).

El análisis de las características espectrales de las corrientes del sector, muestra que existe una importante influencia de la frecuencia semi-diurna mareal (periodo de 12h), lo que es claramente observable en los espectros de energía donde las corrientes semi-diurnas pueden llegar hasta los 5×10^4 [$\text{cm}^2 \text{s}^{-2} \text{cph}^{-1}$], cuestión que se observa en todas las profundidades analizadas (Figs. 64 y 65). Otro rasgo espectral apreciable, es la importancia del periodo de 6 h (M_4) el cual registra un aumento importante en su participación en las corrientes más profundas del sector (Figura 65).

El comportamiento del vector corrientes fue analizado a través de los diagramas de trazos (Figura 66), dado que las corrientes del sector poseen un marcado eje Este-Oeste se graficaron los diagramas de trazos de las corrientes del sector rotados 180° , en la figura las corrientes hacia arriba (abajo) representan corrientes hacia el Este (Oeste). Las corrientes presentan oscilaciones quincenales marcadas que parecen estar relacionadas con los ciclos cuadratura/sicigia que son especialmente notorias entre mayo y septiembre en todas las

profundidades analizadas, no es clara la presencia de flujos y contra-flujos asociados a los cambios de llenante-vaciante, pero las amplitudes claramente aumentan bi-semanalmente. Existe una clara tendencia de que las corrientes se presenten hacia el Este (hacia arriba) con menores intensidades asociadas a las corrientes Oeste.

Para desarrollar un poco más la idea del comportamiento de las corrientes en profundidad, se presentan los contornos de las componente U y V (Figura 67). En forma consistente con lo indicado previamente, la componente U es la que desarrolla mayor intensidad respecto a V, por lo cual la descripción estará centrada en esta componente. Se aprecian en forma clara los dos periodos de mediciones realizadas en el sector. Además de que durante el primer periodo (febrero-junio) se observó cierto tipo de interferencia centrada en los 130 m de profundidad por lo cual las celdas en torno a esta profundidad fueron descartadas del análisis, sin embargo, celdas de mayor profundidad fueron altamente consistentes con el patrón vertical por lo que estas celdas más profundas permanecieron en el análisis. Las corrientes presentan eventos de mayor intensidad entre los 80 m y los 100 m de profundidad los cuales parecen estar asociados a los periodos de mareas de sicigia y cuadratura estos eventos se presentan intercalados entre flujos de entrada (corrientes positivas en U) y de salida (corrientes negativas en U) hacia el fiordo Puyuhuapi, se presentó un periodo con intensidades de las corrientes marcadamente menores que el resto de los eventos entre mayo y junio, especialmente en las corrientes entre 50 m y 110 m de profundidad. Las corrientes filtradas (Figura 69) presentan en forma más clara el comportamiento con corrientes de entrada y de salida al fiordo, con un periodo de muy baja intensidad sostenido entre mayo y junio, entre febrero y mayo “paquetes” de oscilaciones de baja frecuencia se propagan desde el fondo a la superficie sugiriendo la presencia de ondas internas cuya mayor intensidad muestra estar centrada en los 80 m. Los vectores promedios muestran que las corrientes entre los 80 y los 120 m de profundidad poseen muy bajas intensidades hacia el Este, y se intensifican hasta sobrepasar levemente 1 cm/s bajo los 140 m de profundidad (Figura70). Con la finalidad de cuantificar la influencia del forzante mareal en profundidad, se estimó e que el porcentaje explicado por el ajuste armónico entre los 80 y los 160 m de profundidad fue $> 45\%$ en todo el rango de profundidades analizados. (Figura 68).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

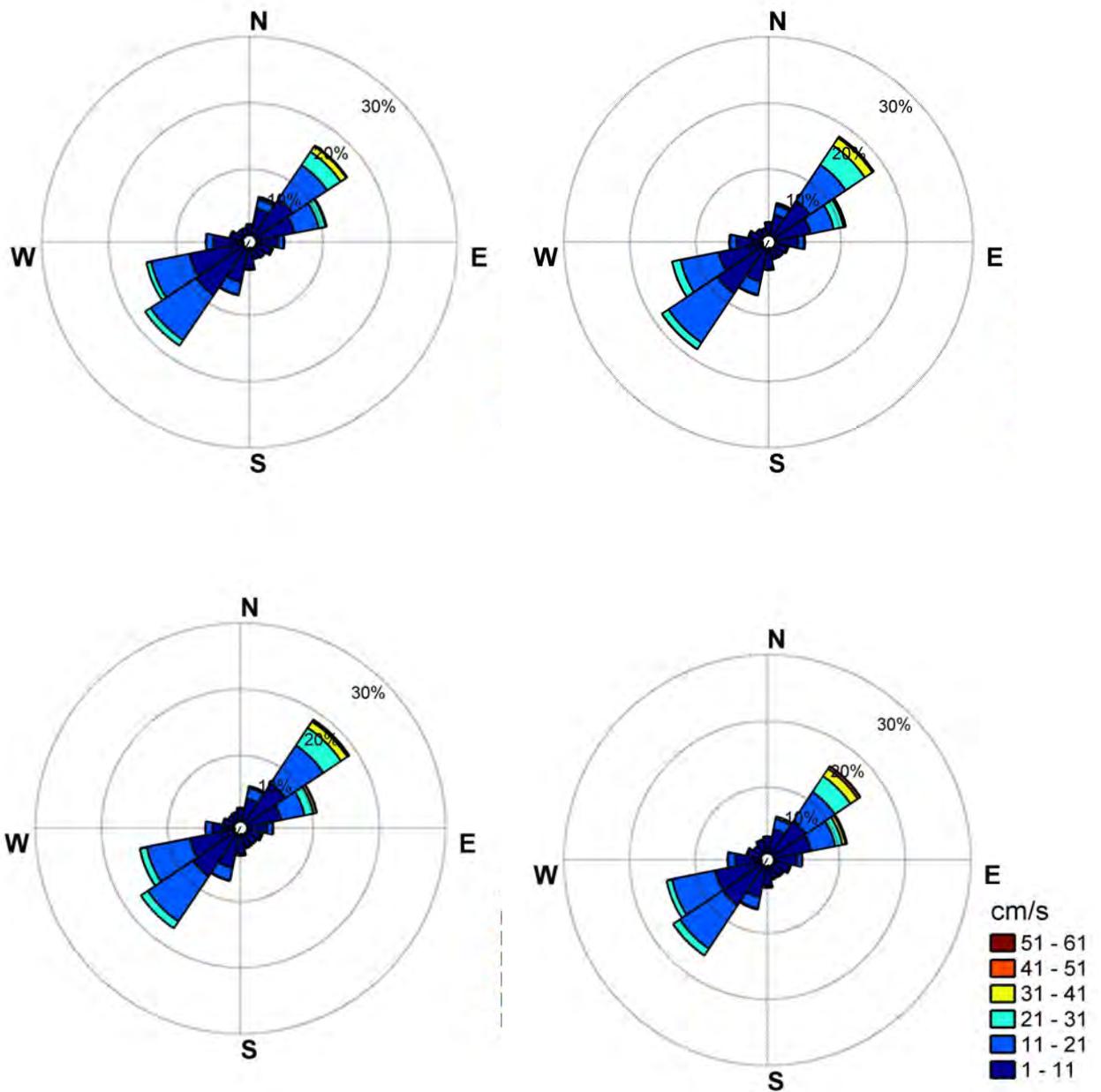


Figura 58. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 80 m, 90 m, 100 m y 110 m de profundidad en la zona sur de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

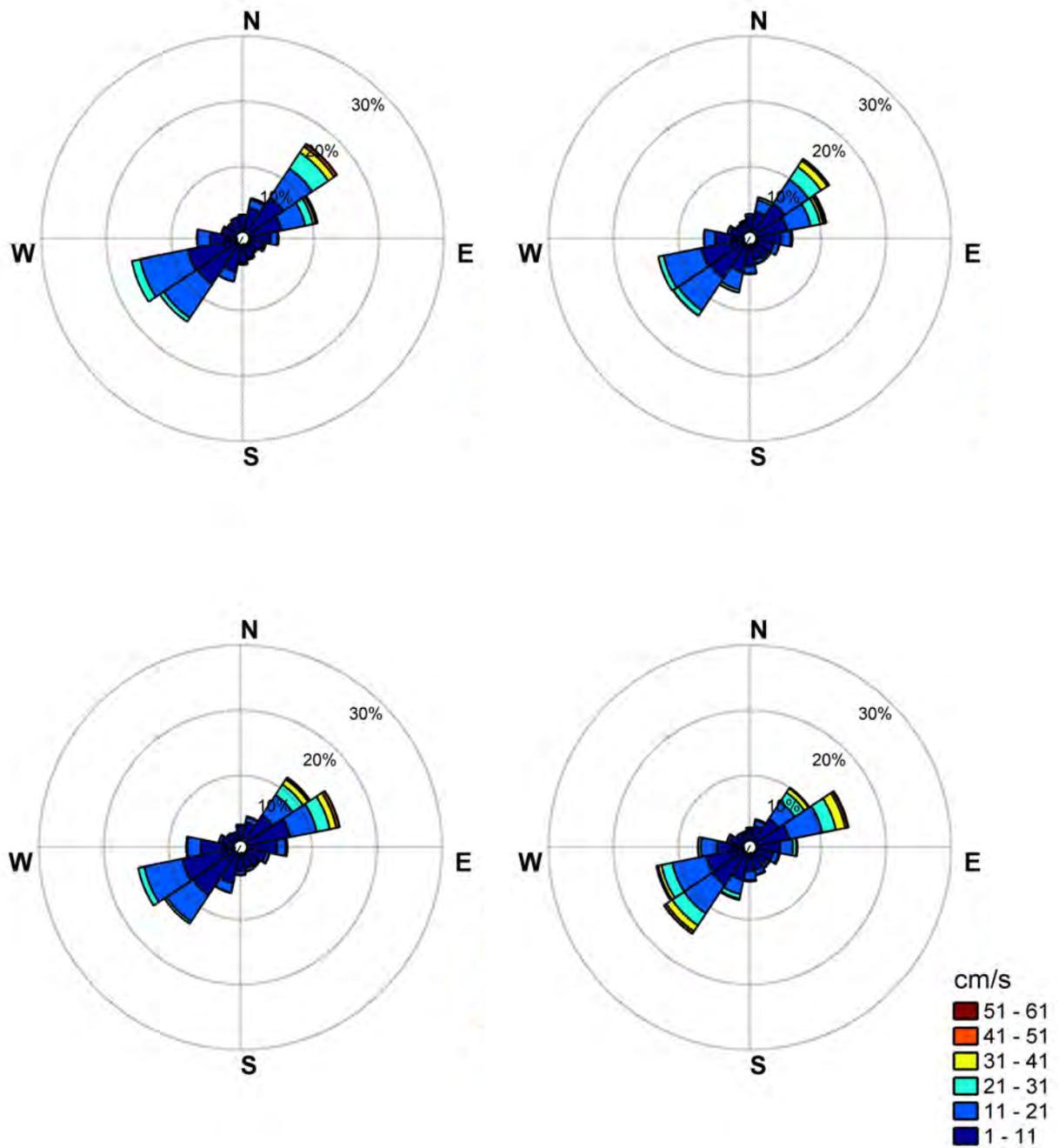


Figura 59. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 120 m, 130 m, 140 m y 150 m de profundidad en la zona sur de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 23. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 70 y 90 m.

	70 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	2,72	8,08	7,16	3,66	2,78	6,24	7,83	3,13	41,59
Máximos	56,99	50,97	57,30	58,32	73,84	49,21	52,81	60,33	73,84
Dir. Media	359,20	49,18	87,15	132,34	179,23	230,14	267,61	313,42	72,35
Mag. Media	14,64	16,00	15,98	21,57	16,81	11,13	14,07	18,58	1,64
Desv. STD.	20,16	19,46	20,22	27,00	23,70	13,06	16,95	23,44	12,79
	75 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	1,16	10,19	5,82	1,93	2,44	10,19	8,39	1,18	41,31
Máximos	18,41	65,11	31,98	36,34	25,28	29,81	29,40	14,36	65,11
Dir. Media	5,22	52,20	81,84	130,66	184,45	232,07	261,55	310,30	2,94
Mag. Media	4,75	14,47	10,27	5,42	6,37	10,50	11,35	4,57	0,14
Desv. STD.	5,70	17,15	12,36	7,38	7,65	12,13	13,07	5,42	8,45
	80 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,01	22,46	14,49	4,49	4,81	24,90	19,67	3,17	96,99
Máximos	25,30	50,40	68,79	25,80	26,90	32,72	31,00	21,56	68,79
Dir. Media	5,47	52,73	81,06	131,54	185,12	232,26	261,47	309,66	256,23
Mag. Media	4,76	13,38	10,30	5,61	5,20	10,55	9,97	4,88	0,10
Desv. STD.	5,97	16,27	12,79	6,97	6,32	12,01	11,53	6,10	12,31
	85 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	2,84	23,02	14,27	4,57	4,46	25,70	19,55	3,15	97,57
Máximos	27,74	59,51	70,46	28,70	29,38	33,18	31,27	20,05	70,46
Dir. Media	3,67	53,63	81,23	130,74	184,35	232,23	261,69	311,40	61,58
Mag. Media	5,04	14,78	10,93	5,58	5,44	11,12	10,45	4,60	0,09
Desv. STD.	6,27	17,72	13,59	7,08	6,78	12,62	12,15	5,58	13,22
	90 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,20	23,33	14,91	3,88	4,84	25,70	18,23	3,47	97,56
Máximos	27,32	60,78	74,05	27,78	27,82	34,55	32,19	29,23	74,05
Dir. Media	4,71	54,02	80,78	132,78	185,37	232,27	260,75	309,75	71,01
Mag. Media	5,09	14,76	11,25	5,66	5,59	11,06	10,70	5,13	0,31
Desv. STD.	6,41	17,75	14,06	7,05	6,91	12,56	12,41	6,21	13,36

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 24. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 95 y 115 m.

	95 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,36	24,20	14,63	3,78	5,06	24,70	18,26	3,62	97,60
Máximos	27,58	56,46	73,93	24,22	31,01	31,93	31,78	35,18	73,93
Dir. Media	5,30	54,07	80,85	133,60	185,66	232,72	260,67	311,12	63,57
Mag. Media	5,40	14,51	11,56	5,56	5,96	11,11	10,68	4,95	0,47
Desv. STD.	6,79	17,48	14,64	6,79	7,40	12,61	12,38	6,11	13,42
	100 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,66	24,29	14,21	4,35	5,21	24,15	18,29	3,11	97,26
Máximos	32,76	53,17	70,73	22,67	28,71	29,89	31,10	14,31	70,73
Dir. Media	4,66	54,23	80,06	132,38	183,85	232,44	260,16	313,20	70,38
Mag. Media	5,43	14,15	11,96	5,56	5,99	11,03	10,81	4,79	0,51
Desv. STD.	6,96	17,18	15,14	6,97	7,32	12,57	12,43	5,61	13,35
	105 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	4,20	22,83	14,90	4,24	5,42	23,87	18,32	3,59	97,35
Máximos	33,63	55,05	67,09	24,89	30,04	30,09	30,52	20,35	67,09
Dir. Media	5,74	54,32	80,29	130,72	185,06	232,92	260,58	309,95	69,73
Mag. Media	5,30	14,43	11,34	5,86	6,11	11,09	10,64	4,82	0,39
Desv. STD.	6,77	17,67	14,58	7,17	7,57	12,64	12,26	5,80	13,30
	110 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	4,67	21,89	15,15	4,64	5,21	22,90	19,09	3,87	97,43
Máximos	45,41	58,06	66,58	25,01	27,91	32,06	28,77	20,46	66,58
Dir. Media	2,56	54,18	80,09	132,36	183,69	233,15	261,22	310,88	53,53
Mag. Media	5,25	14,62	11,55	5,58	6,05	11,04	10,60	5,28	0,41
Desv. STD.	6,69	18,01	14,95	6,98	7,56	12,60	12,16	6,36	13,36
	115 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	5,04	21,61	15,09	4,48	4,75	21,19	20,92	4,26	97,34
Máximos	47,82	59,16	71,86	24,85	23,75	33,40	33,93	28,92	71,86
Dir. Media	4,22	54,58	81,37	133,07	183,96	232,57	261,45	312,83	37,32
Mag. Media	5,57	14,50	11,70	5,76	5,85	10,49	11,05	5,20	0,47
Desv. STD.	7,00	17,86	15,21	7,48	7,38	12,07	12,63	6,41	13,32

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 25. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 120 y 140 m.

	120 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	4,96	21,85	14,81	4,40	5,31	20,06	21,88	4,23	97,49
Máximos	45,21	74,90	62,77	38,06	24,79	30,99	30,30	27,58	74,90
Dir. Media	1,70	54,68	80,87	130,58	183,20	232,67	262,18	311,37	35,12
Mag. Media	5,35	14,34	12,10	6,45	5,86	10,33	11,12	5,45	0,54
Desv. STD.	6,89	17,77	15,74	8,23	7,31	11,89	12,70	6,74	13,39
	125 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	4,03	20,39	16,37	5,03	5,10	19,60	22,62	4,20	97,34
Máximos	44,85	72,02	64,91	34,46	33,96	29,54	31,41	21,62	72,02
Dir. Media	2,92	54,69	80,97	130,84	182,75	232,72	262,43	310,27	56,80
Mag. Media	5,69	14,22	12,53	6,53	6,43	10,40	10,66	5,72	0,54
Desv. STD.	7,48	17,72	16,21	8,24	8,13	12,01	12,23	6,98	13,43
	130 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	4,63	19,14	16,13	6,59	7,37	20,58	18,94	4,09	97,47
Máximos	26,40	77,70	72,32	33,02	30,97	44,15	33,23	24,94	77,70
Dir. Media	3,71	53,46	81,87	132,78	183,72	229,89	263,04	311,13	109,83
Mag. Media	6,91	14,35	12,85	7,59	8,12	11,23	10,51	6,60	0,72
Desv. STD.	8,45	17,87	16,74	9,34	9,96	13,00	12,08	8,05	13,71
	135 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,39	17,72	19,03	5,60	5,70	19,54	22,11	4,17	97,26
Máximos	29,30	75,84	78,40	34,95	26,61	35,89	39,31	27,54	78,40
Dir. Media	2,41	55,35	81,63	133,47	182,74	231,59	262,96	309,38	88,38
Mag. Media	5,97	14,47	12,49	6,60	6,94	10,09	10,25	6,25	0,75
Desv. STD.	7,88	18,21	16,33	8,49	8,66	11,79	11,90	7,61	13,45
	140 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,87	15,88	20,37	6,12	5,97	19,20	21,86	3,94	97,20
Máximos	44,15	70,24	83,99	31,66	27,03	30,99	40,40	24,99	83,99
Dir. Media	4,53	56,26	81,20	133,26	182,21	231,79	263,52	310,25	92,66
Mag. Media	5,71	14,26	13,06	6,69	7,27	9,46	10,22	6,22	1,01
Desv. STD.	7,54	18,25	17,04	8,39	9,07	10,99	11,88	7,70	13,41

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 26. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 145 y 165 m.

	145 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,42	16,71	19,18	6,25	7,28	18,72	21,32	4,29	97,17
Máximos	44,29	73,88	80,07	34,38	24,85	27,12	30,66	26,97	80,07
Dir. Media	2,30	56,08	80,45	132,09	182,48	231,06	264,10	310,32	96,51
Mag. Media	5,68	13,48	13,82	7,15	7,90	9,27	10,25	6,26	1,11
Desv. STD.	7,57	17,43	18,11	9,13	9,54	10,77	11,81	7,94	13,48
	150 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,57	13,53	20,37	6,40	7,50	22,08	20,13	4,15	97,74
Máximos	41,57	77,94	69,82	43,35	40,21	54,86	62,24	32,18	77,94
Dir. Media	4,13	55,55	82,16	131,74	182,79	231,91	263,07	309,92	191,44
Mag. Media	6,71	13,96	15,03	8,52	9,03	14,51	12,73	6,48	1,49
Desv. STD.	8,79	17,79	18,77	10,71	11,17	17,93	15,54	8,08	16,01
	155 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	3,60	14,33	18,42	6,46	7,17	18,35	18,69	4,75	91,77
Máximos	81,27	92,73	133,06	102,23	31,11	93,80	53,06	53,82	133,06
Dir. Media	1,38	56,24	81,89	134,36	183,67	229,68	264,68	310,01	105,88
Mag. Media	7,76	15,74	14,71	8,61	8,69	10,74	10,84	7,75	1,28
Desv. STD.	12,11	20,28	19,09	11,87	10,49	13,66	12,65	10,52	14,77
	160 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	1,74	6,95	7,95	2,68	3,05	6,61	9,21	2,72	40,91
Máximos	69,54	58,85	58,10	44,77	57,83	100,26	95,04	57,84	100,26
Dir. Media	0,82	54,36	82,43	132,44	182,86	229,61	266,94	308,17	75,91
Mag. Media	9,23	14,47	14,67	9,41	9,91	10,72	11,76	9,94	0,78
Desv. STD.	14,41	18,24	18,37	12,80	12,85	13,86	14,42	13,53	9,99
	165 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	2,08	6,80	7,65	3,05	3,47	5,40	8,27	2,77	39,49
Máximos	63,28	106,37	90,64	70,80	76,58	158,77	57,66	113,70	158,77
Dir. Media	0,60	53,45	83,58	133,03	179,82	228,85	268,34	311,40	71,57
Mag. Media	11,28	17,86	16,87	12,65	11,91	12,26	12,95	14,45	1,82
Desv. STD.	16,09	23,32	21,80	17,00	16,96	17,87	15,73	21,24	12,20

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 27. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al sur de Puyuhuapi entre los 170 y 185 m.

	170 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	2,75	6,58	7,14	2,86	3,08	4,61	6,90	3,08	37,01
Máximos	113,93	121,50	122,88	119,98	130,71	96,24	144,27	126,85	144,27
Dir. Media	0,75	52,39	83,65	133,79	182,38	227,79	269,23	313,19	52,01
Mag. Media	15,03	19,90	18,34	14,89	15,92	14,42	15,67	18,33	2,20
Desv. STD.	22,29	26,64	23,21	21,18	24,85	19,04	21,13	27,75	14,31
	175 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	2,43	5,98	6,32	2,74	2,87	4,36	5,88	2,66	33,24
Máximos	128,12	78,85	93,71	101,18	109,21	166,95	129,75	144,51	166,95
Dir. Media	2,62	50,58	84,17	130,81	178,97	227,56	269,19	313,74	66,64
Mag. Media	18,66	21,73	21,36	16,95	19,15	18,36	17,99	17,35	2,43
Desv. STD.	26,67	27,01	26,63	23,88	26,88	27,01	24,52	24,86	15,16
	180 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	2,17	5,00	5,21	2,41	2,28	3,51	4,51	2,35	27,44
Máximos	074,63	108,31	119,91	98,72	117,17	98,27	128,71	104,51	128,71
Dir. Media	358,90	51,25	84,49	134,43	181,89	226,61	268,08	312,58	69,62
Mag. Media	19,34	24,12	22,89	22,07	21,82	19,01	20,29	21,76	2,77
Desv. STD.	25,32	30,02	29,73	30,02	30,65	26,09	27,87	29,08	15,27
	185 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	1,73	4,09	3,57	1,56	1,67	2,49	3,32	1,59	20,01
Máximos	143,58	158,89	159,36	116,14	116,83	109,57	101,12	102,79	159,36
Dir. Media	5,33	50,53	84,96	135,08	182,30	227,04	268,30	313,34	54,24
Mag. Media	24,42	26,09	23,63	22,40	21,78	22,59	21,21	22,76	3,45
Desv. STD.	35,32	34,72	30,68	31,80	30,48	32,06	27,96	30,70	14,52

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

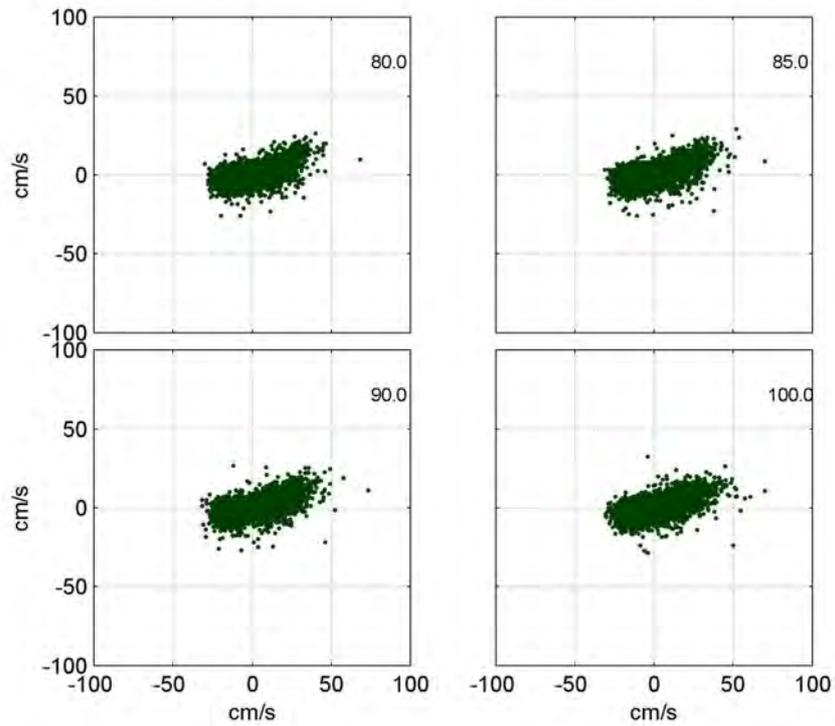


Figura 60. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 80 y 100 m.

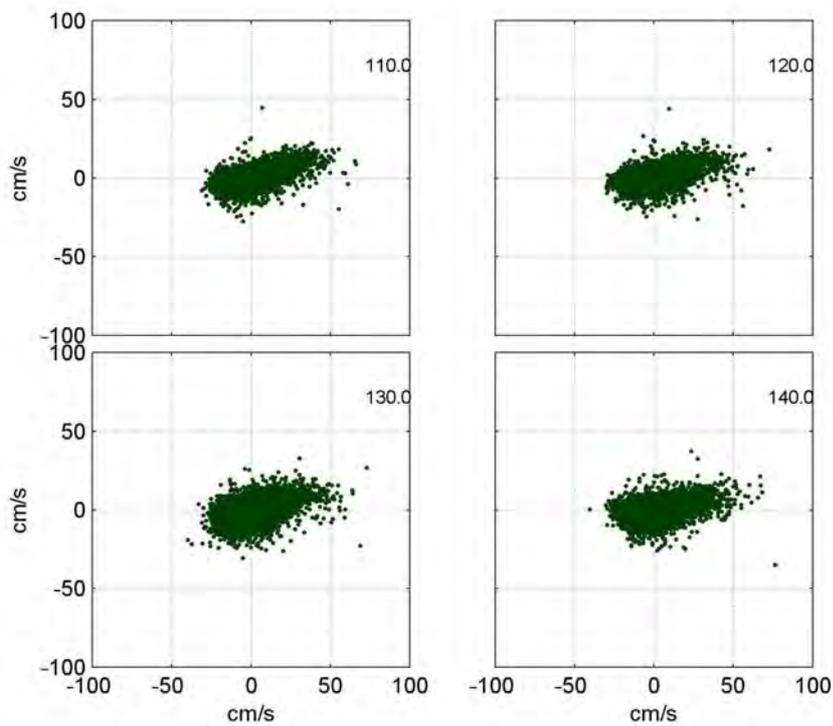


Figura 61. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 110 y 140 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

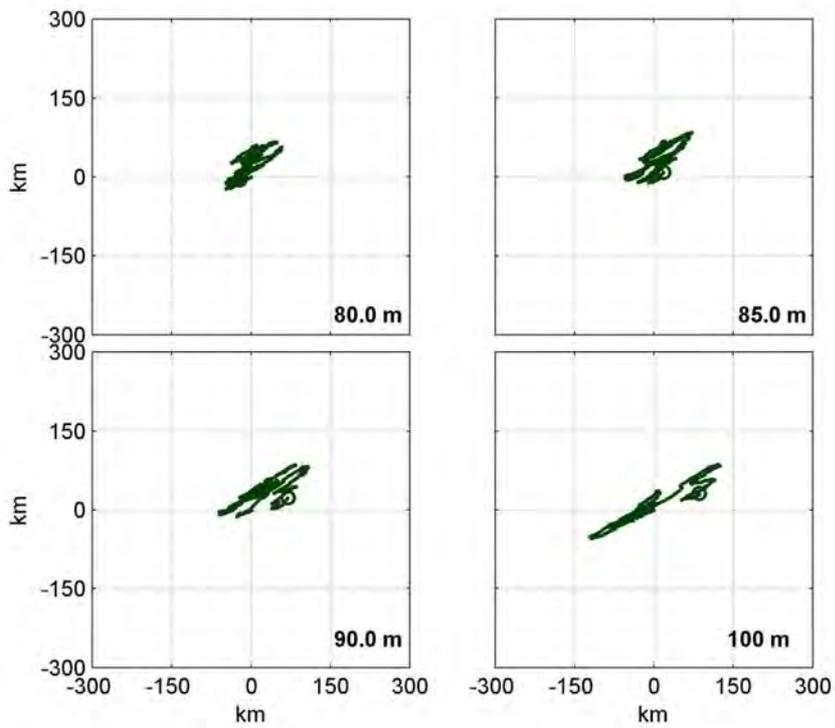


Figura 62. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 80 y 100 m.

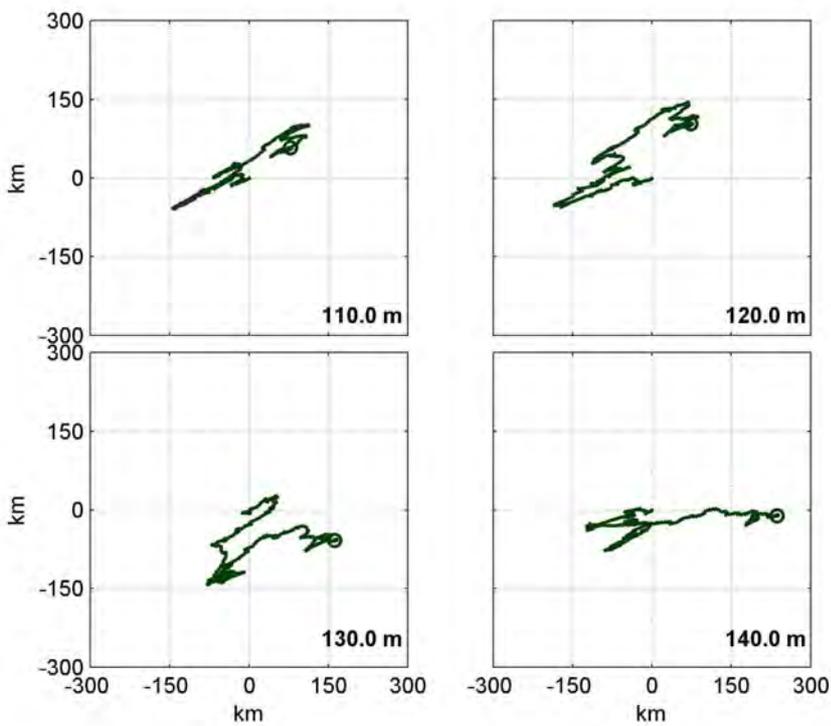


Figura 63. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 110 y 140 m.

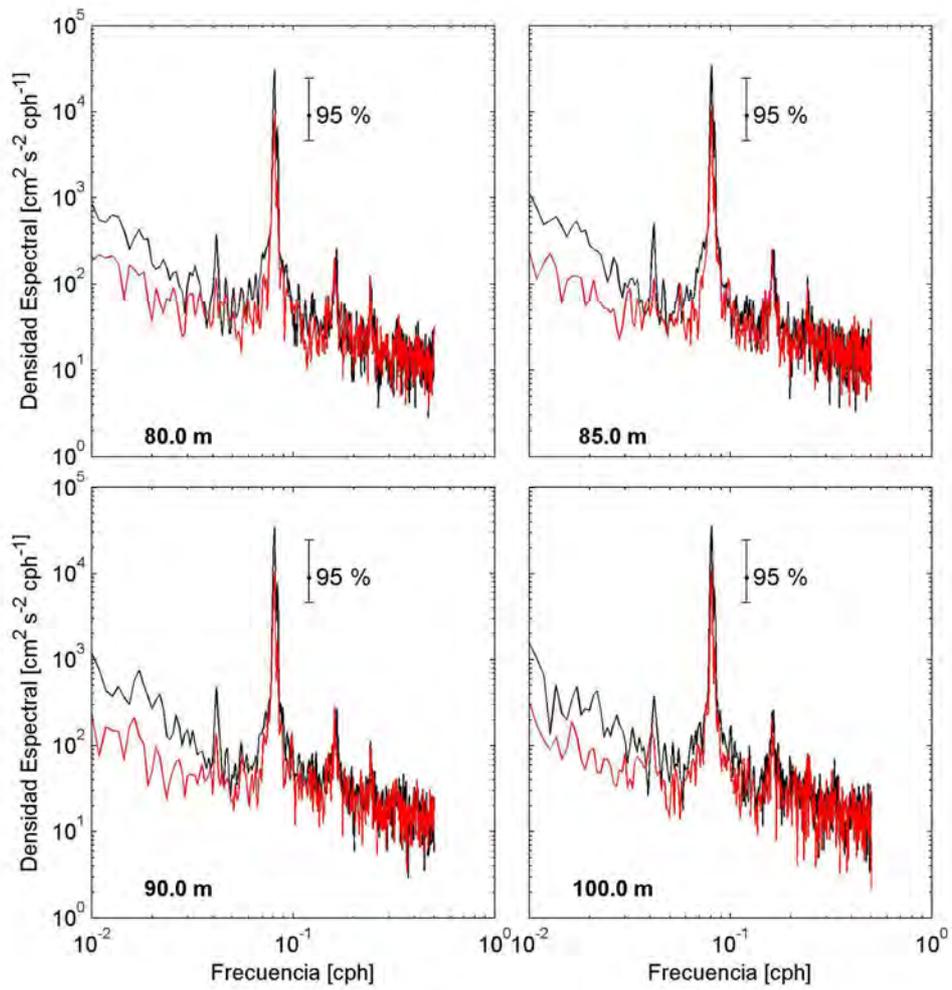


Figura 64. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 80 y 100 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

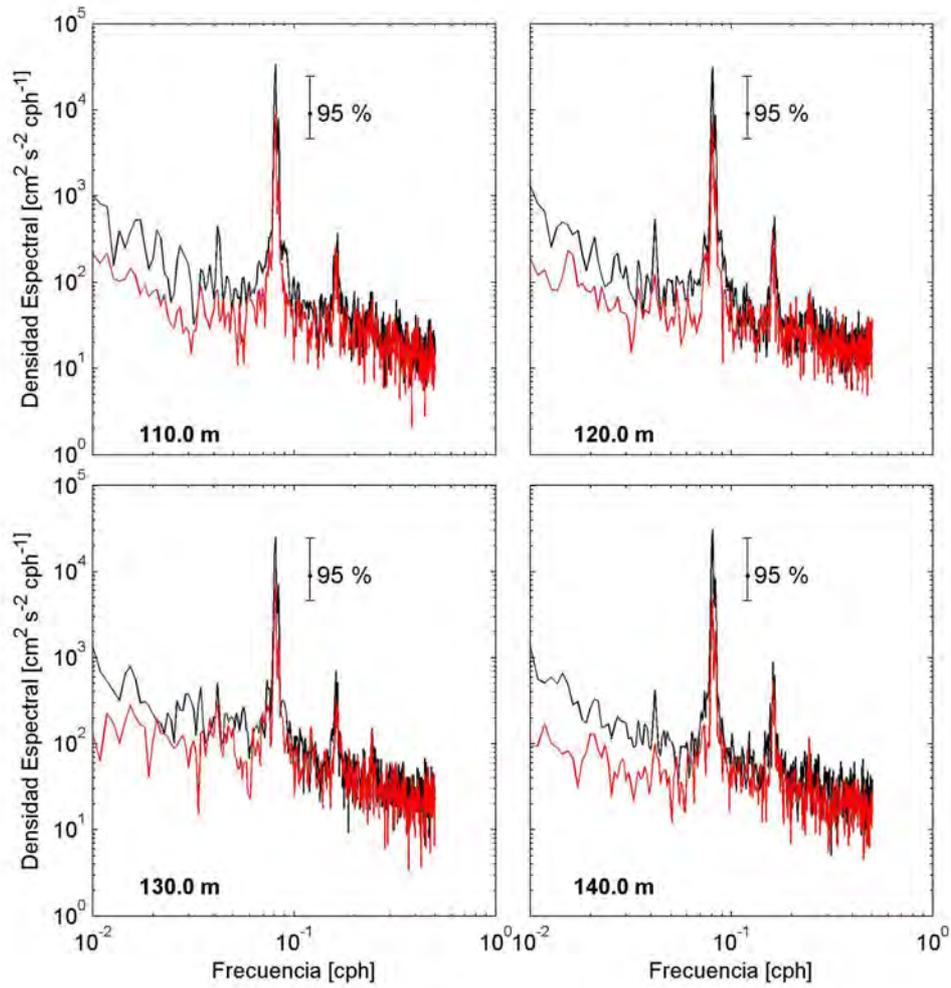


Figura 65. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona sur de Puyuhuapi entre los 110 y 140 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

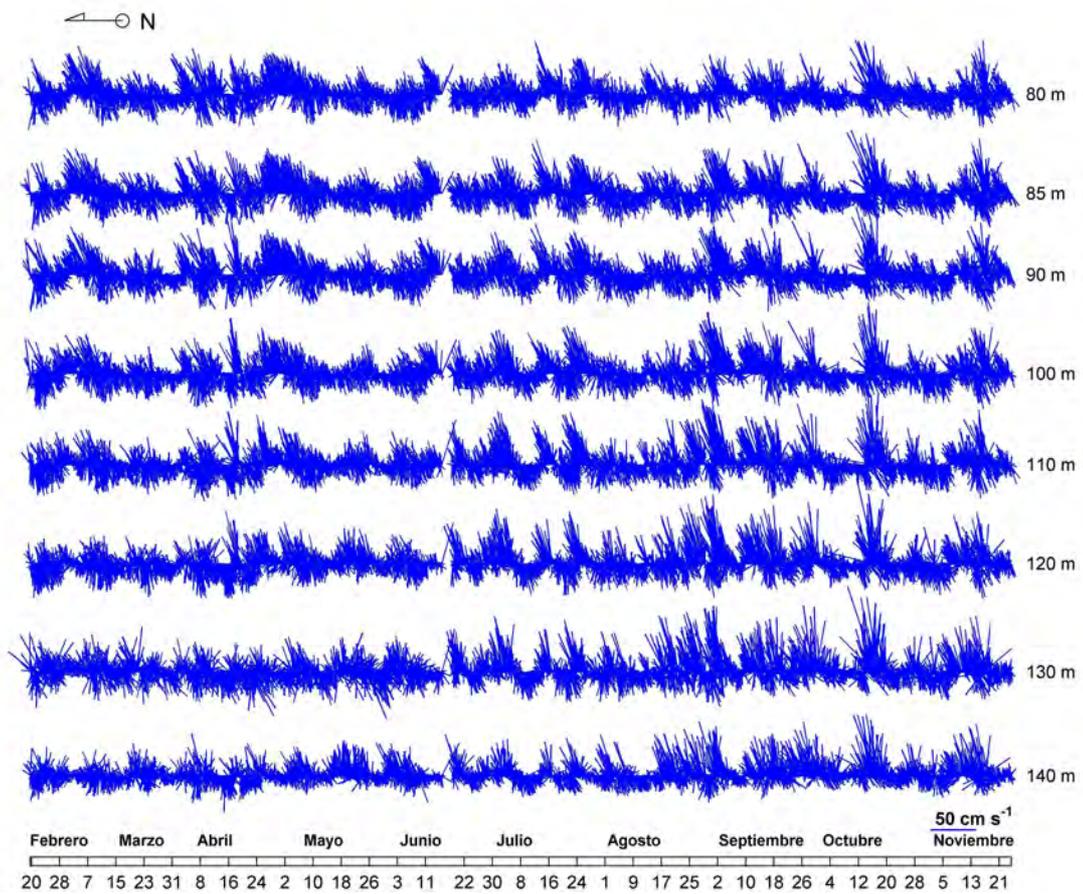


Figura 66. Diagrama de trazos de las corrientes medidas en la zona sur de Puyuhuapi. Las corrientes han sido rotadas de acuerdo al eje del canal.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

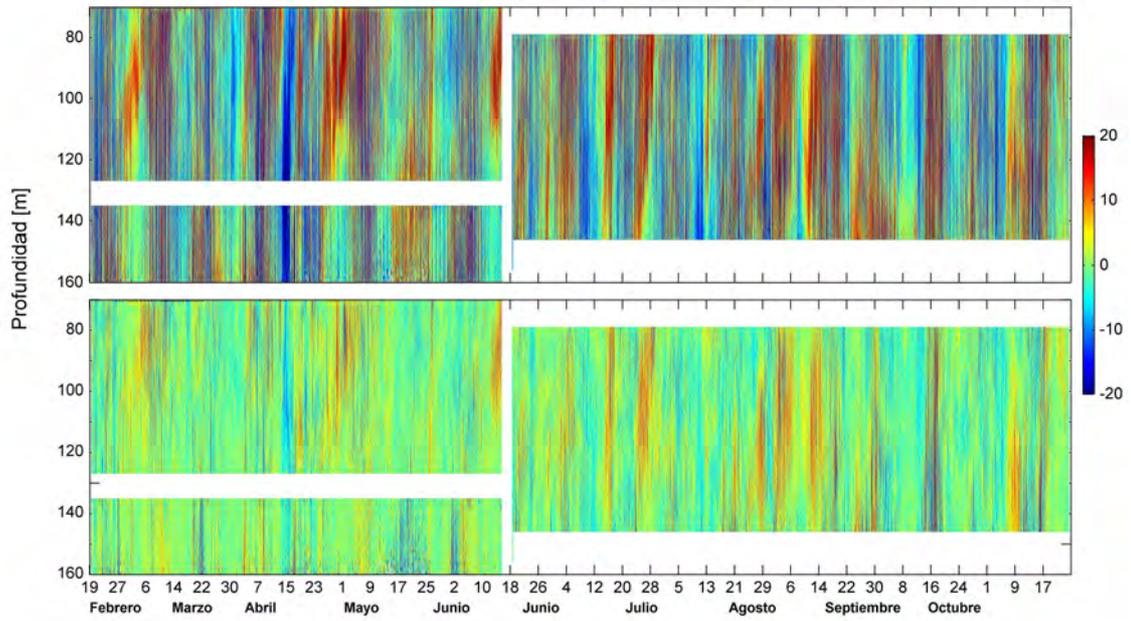


Figura 67. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona sur de Puyuhuapi. La unidades están expresadas en cm/s.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

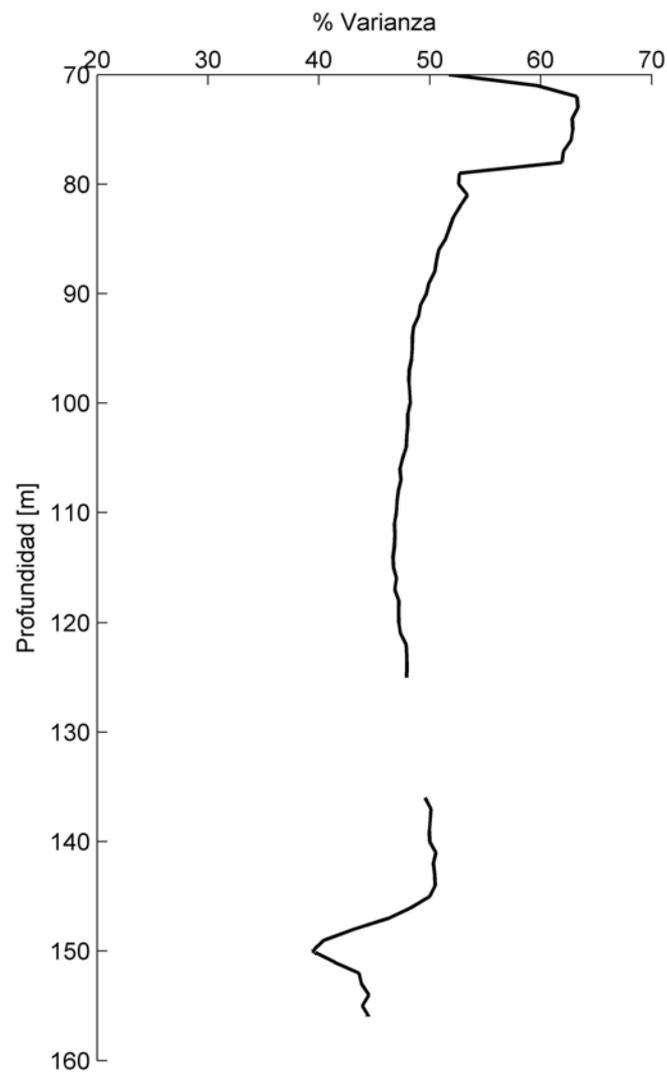


Figura 68. Importancia de la marea en profundidad al sur de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

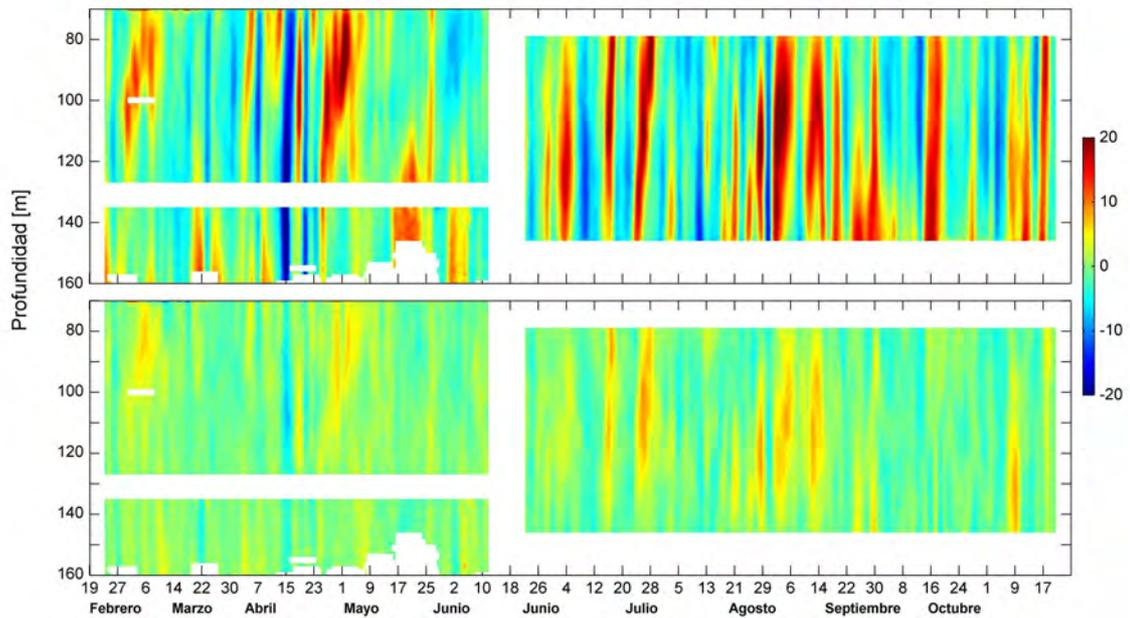


Figura 69. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (en el centro) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona sur de Puyuhuapi. La unidades están expresadas en cm/s.

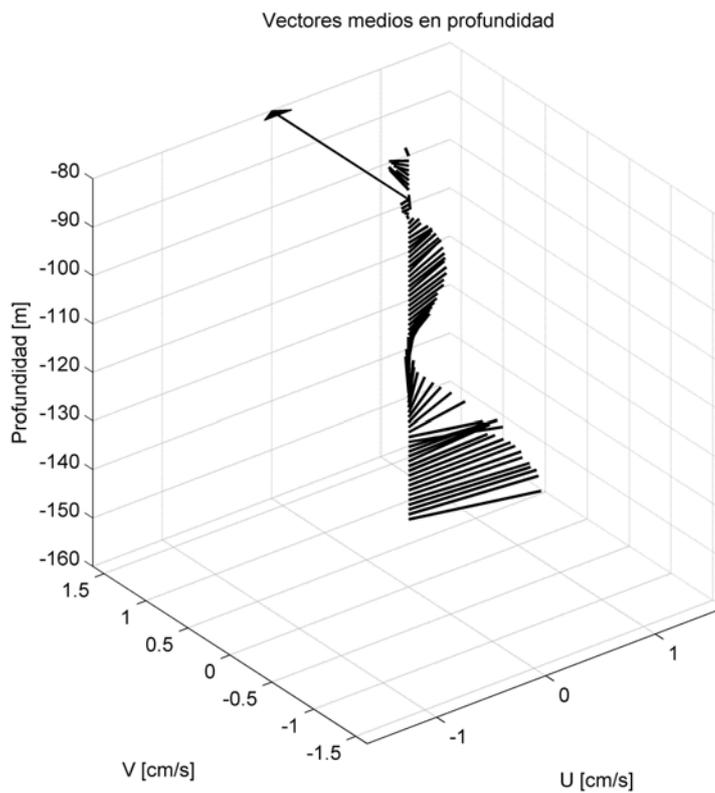


Figura 70. Vector promedio en profundidad al sur de Puyuhuapi.

4.11. Procesamiento y análisis de los datos de ADCP: anclaje Puyuhuapi Norte.

En la zona de Puyuhuapi Norte, se instaló un arreglo con dos correntómetros acústicos con la finalidad de efectuar la descripción de las corrientes del sector. Uno ubicado cerca de la superficie de 600 kHz mirando hacia arriba, y otro más profundo de 300 kHz mirando hacia abajo ambos instrumentos fueron programados para registrar el patrón de las corrientes cada 1h. A continuación, se presentarán los resultados de ambos correntómetros de manera separada comenzando con el correntómetro superficial

Corrientes Superficiales Puyuhuapi Norte

En la zona superficial (primeros 30 m de profundidad) de Puyuhuapi Norte, las corrientes mostraron ser de muy baja intensidad, en general las magnitudes de las corrientes del sector estuvo por debajo de los 21 cm/s. Mientras que las direcciones estuvieron principalmente asociadas a la dirección Norte que explicó entre 30 y 40% de la variabilidad en esta capa superficial, cerca de los 25 m de profundidad las corrientes fueron relativamente más intensas registrando intensidades máximas de 30 cm/s en esa profundidad (Figuras 71 y 72, Tablas 28-29). Los diagramas de dispersión de las componentes U y V (Figuras 73 y 74) fueron concordantes con lo observado anteriormente, corrientes de muy baja intensidad con orientación Norte-Sur, y principalmente hacia el Norte que no superan los 50 cm/s.

Para efectuar una aproximación a las características de dispersión del área, se estimaron los diagramas de vector progresivo (PVD, en sus siglas en inglés). Este análisis supone que una parcela de agua ubicada a la profundidad de cada celda indicada, se desplaza en un campo de corrientes espacialmente homogéneo a esa profundidad. Este supuesto es especialmente válido para mediciones de ADCP que asume que no hay cizalle vertical dentro de una misma celda de profundidad. Los diagramas de vector progresivo muestran un desplazamiento neto hacia el Norte, del orden de 500 km en 11 meses, este desplazamiento es consistente con corrientes de baja intensidad en el área y además indica que en la zona superficial las corrientes tienden a desplazarse hacia el interior del fiordo (Figuras 75 y 76). Los espectros de las componentes de la corriente muestran que la componente semi-diurna de la marea es la de mayor relevancia y es claramente observable en los espectros de energía de las corrientes superficiales del sector, sin embargo, también se aprecia una importante acumulación de energía en la banda semanal, especialmente en la componente V (Figuras 77 y 78).

El comportamiento del vector corriente en el sector mostró que las intensidades fueron muy bajas en los primeros metros de la columna de agua. En profundidad las corrientes bajo los 15 m de profundidad se intensificaron entre febrero y abril, existe una leve modulación de la amplitud de las corrientes que parece estar relacionada con los periodos de sicigia/cuadratura y que son especialmente apreciables en el periodo mayo-julio ya entre septiembre y noviembre (Figura 79).

Las componentes de la corriente fueron graficas en contornos de intensidad (Figura 80) en este caso las corrientes tienden a estar orientadas Norte-Sur, por lo que la descripción estará centrada en esa componente. Las bajas intensidades de la corriente fueron claramente distinguibles puesto que las amplitudes de los contornos se presentaron para magnitudes de 20 cm/s. Es posible observar que las corrientes del sector tienden a ser positivas (hacia el Norte) con pulsos de mediana intensidad, los cuales son más

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

distinguibles en junio-septiembre y durante noviembre, estos pulsos hacia el norte parecen no estar compensados por eventos hacia el Sur, puesto que son de muy baja intensidad. Lo anterior se remarca al observar las corrientes filtradas (Figura 82) donde las corrientes positivas (hacia el Norte) son más distinguibles que las corrientes Sur, en general el flujo parece sólo disminuir en intensidad sin un claro contraflujo. Los vectores promedios muestran claramente que el flujo superficial está permanentemente orientado hacia el Norte (Figura 83). La influencia del forzante mareal en profundidad fue muy baja y en los primeros 25 m de profundidad la marea explicó menos del 20% de la variabilidad observada en las corrientes (Figura 81).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

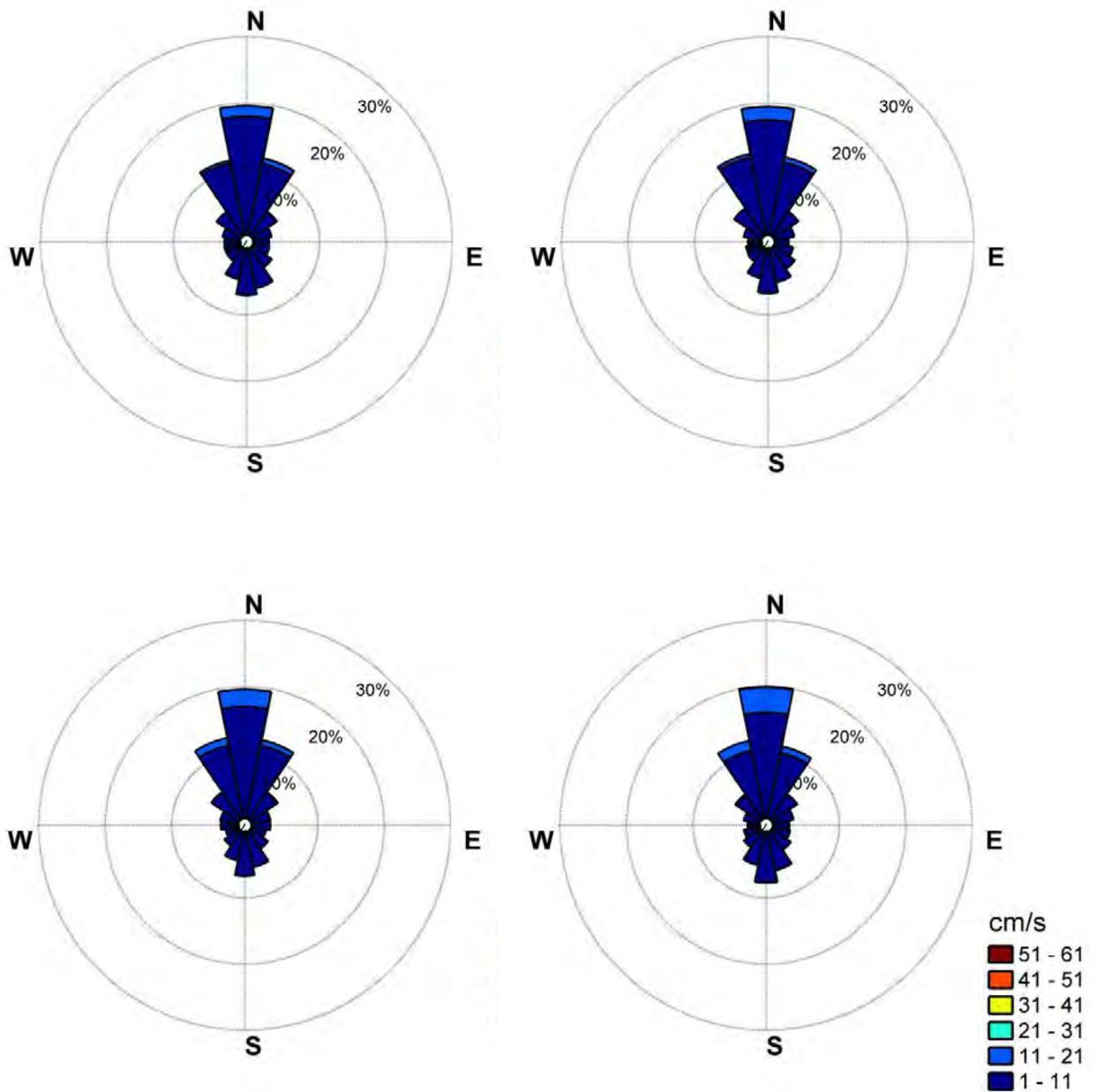


Figura 71. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 1 m, 5 m, 10 m y 15 m de profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

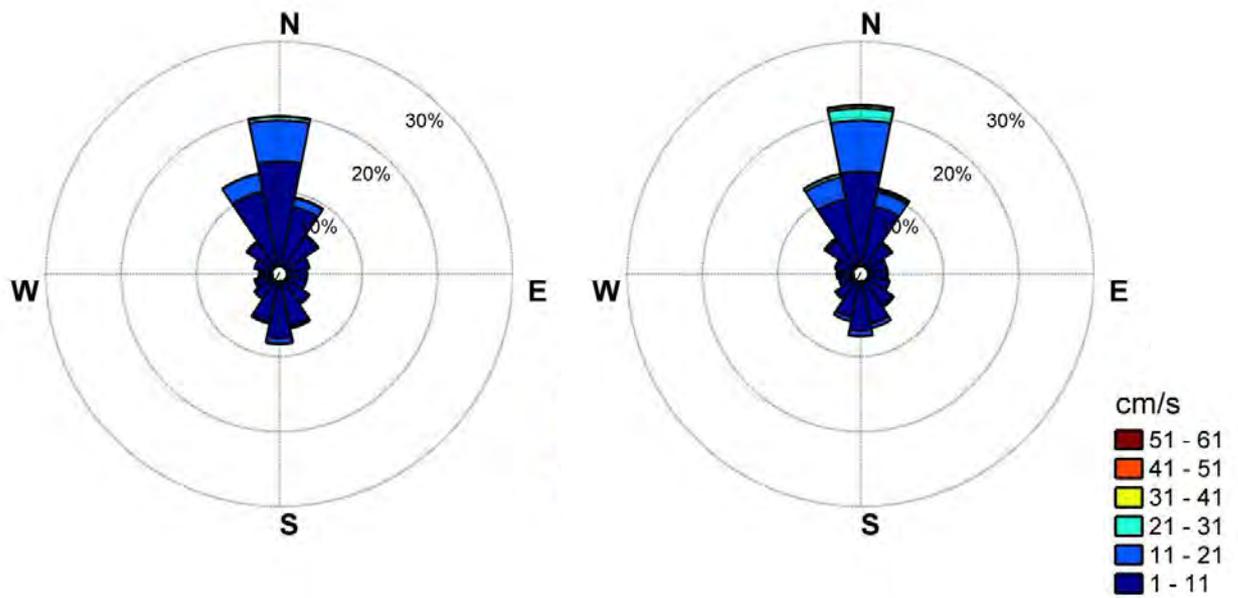


Figura 72. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 20 m y 25 m de profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 28: Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente en el norte de Puyuhuapi entre 1 y 15 m.

	1 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	31,76	15,69	5,23	6,24	13,36	6,87	4,88	7,35	91,38
Máximos	21,11	23,20	9,65	9,81	12,01	11,62	7,06	10,95	23,20
Dir. Media	4,29	36,35	88,04	139,11	181,17	219,69	270,12	320,98	13,30
Mag. Media	5,50	4,75	2,67	2,98	3,64	3,01	2,52	3,33	1,97
Desv. STD.	6,49	5,94	3,07	3,40	4,18	3,53	2,87	3,89	4,99
	5 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	32,70	15,78	5,23	6,76	12,10	6,94	4,40	8,11	92,02
Máximos	24,18	20,53	12,61	15,71	12,08	11,95	8,34	10,55	24,18
Dir. Media	4,01	36,25	87,91	138,02	182,04	219,44	269,11	321,92	11,75
Mag. Media	5,81	4,79	2,76	2,86	3,71	3,32	2,57	3,42	2,17
Desv. STD.	6,86	5,84	3,38	3,32	4,25	3,82	2,93	3,98	5,19
	10 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	32,47	16,41	5,89	5,59	12,34	6,87	4,67	8,14	92,38
Máximos	23,45	22,98	10,48	13,72	12,30	12,50	9,60	14,62	23,45
Dir. Media	3,49	36,51	88,43	138,80	182,18	220,68	271,29	321,81	10,66
Mag. Media	6,33	4,89	2,87	2,93	4,08	3,42	2,85	3,47	2,34
Desv. STD.	7,44	5,92	3,37	3,44	4,72	3,97	3,28	4,09	5,55
	15 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	32,68	15,24	5,56	6,30	13,86	7,95	4,15	7,37	93,12
Máximos	28,64	27,19	10,54	11,35	12,97	13,36	9,85	19,02	28,64
Dir. Media	3,46	37,10	88,03	138,42	82,75	220,36	266,79	322,67	10,33
Mag. Media	7,04	5,00	3,06	3,04	4,25	3,60	2,82	3,79	2,37
Desv. STD.	8,32	6,08	3,53	3,57	4,88	4,20	3,27	4,61	6,04

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 29. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.

	20 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	33,19	14,06	5,75	6,67	14,89	8,57	4,06	7,04	94,23
Máximos	40,23	35,32	9,98	15,56	28,18	15,62	8,16	16,19	40,23
Dir. Media	3,78	38,12	88,16	139,52	182,54	218,92	267,02	322,41	10,41
Mag. Media	8,10	5,51	3,12	3,58	5,41	4,31	2,87	4,41	2,44
Desv. STD.	9,77	6,83	3,60	4,29	6,70	5,18	3,26	5,37	7,19
	25 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	34,79	14,07	5,13	7,38	13,80	8,20	4,24	7,56	95,18
Máximos	51,87	46,66	18,69	24,52	24,73	24,53	20,17	29,83	51,87
Dir. Media	4,38	35,41	89,21	139,12	182,54	218,59	269,75	321,62	9,62
Mag. Media	10,02	6,81	3,87	4,27	5,82	5,34	3,42	5,00	3,38
Desv. STD.	12,36	8,98	4,85	5,38	7,10	6,60	4,46	6,51	9,08

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

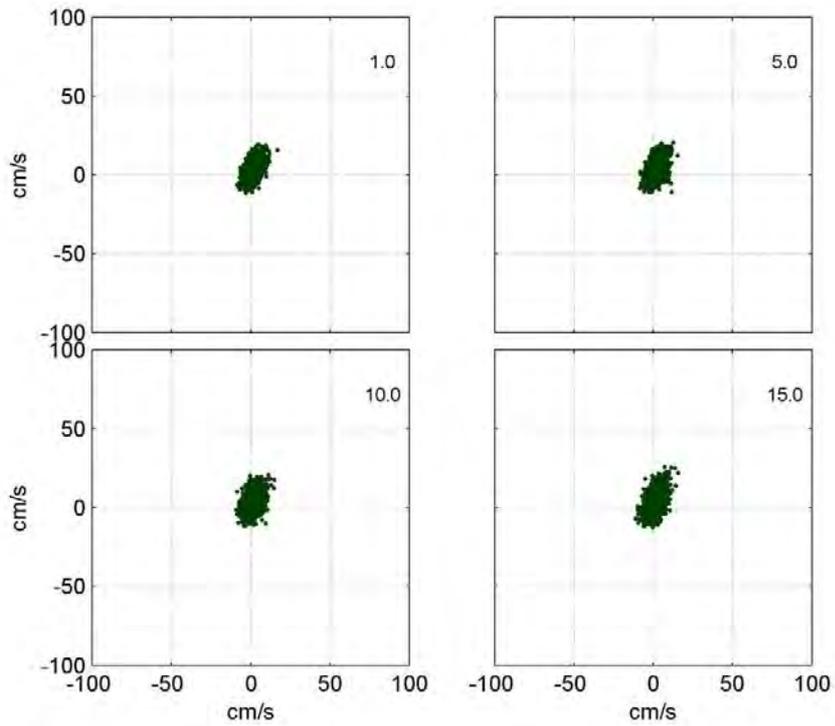


Figura 73. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 1 y 15 m.

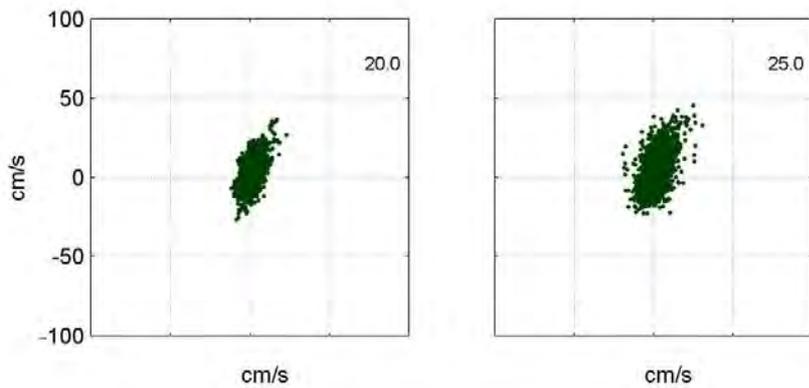


Figura 74: Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

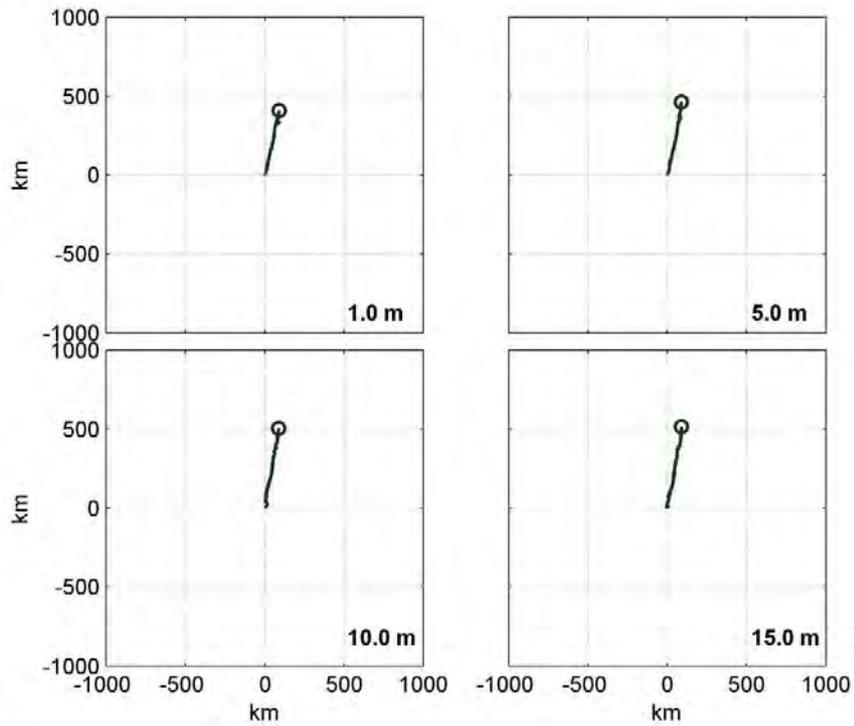


Figura 75: Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 1 y 15 m.

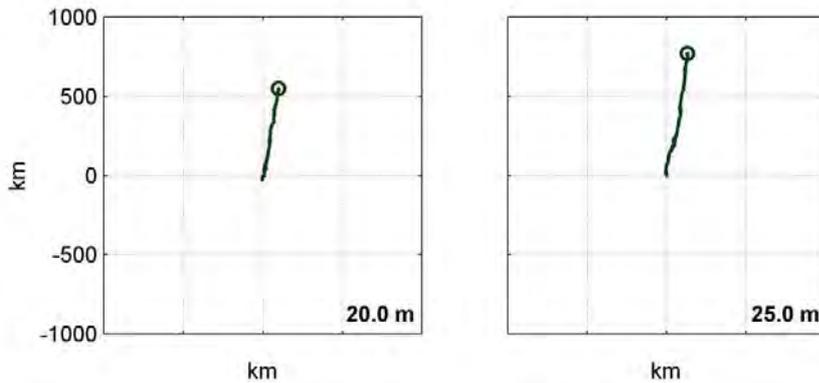


Figura 76. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes la zona norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

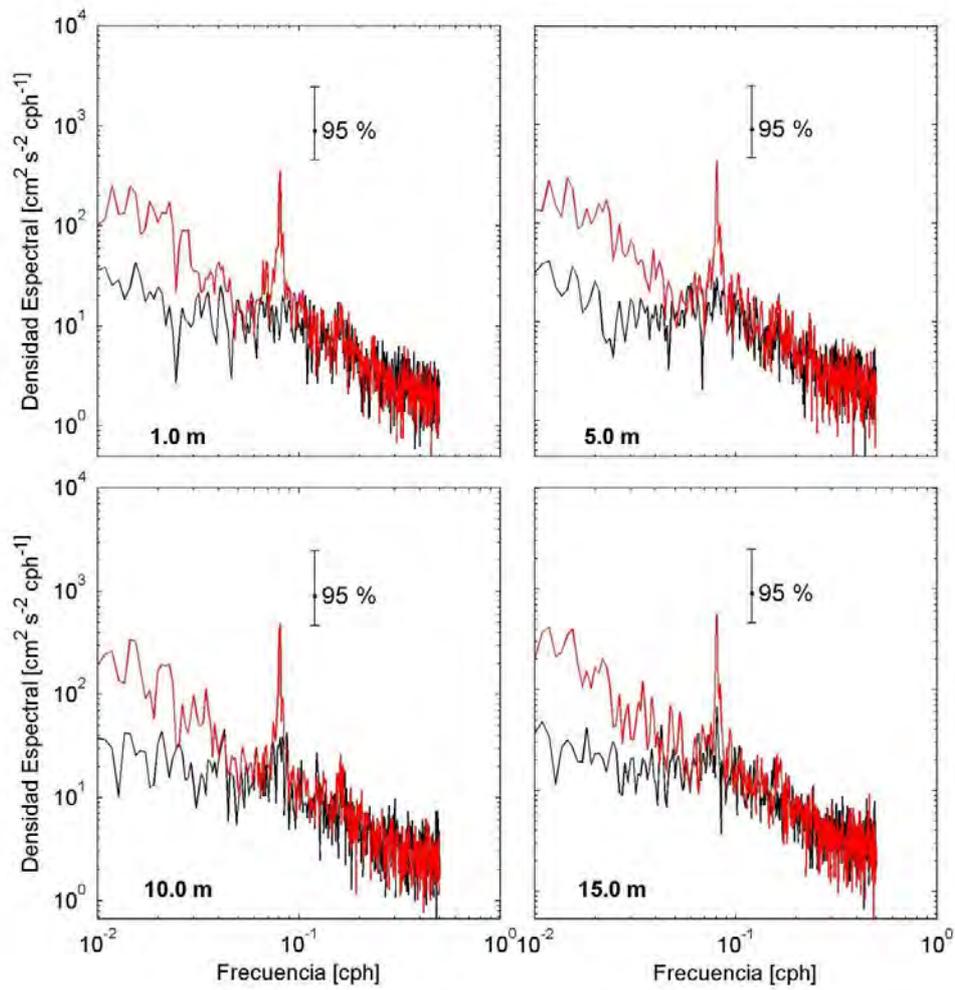


Figura 77. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 1 y 15 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

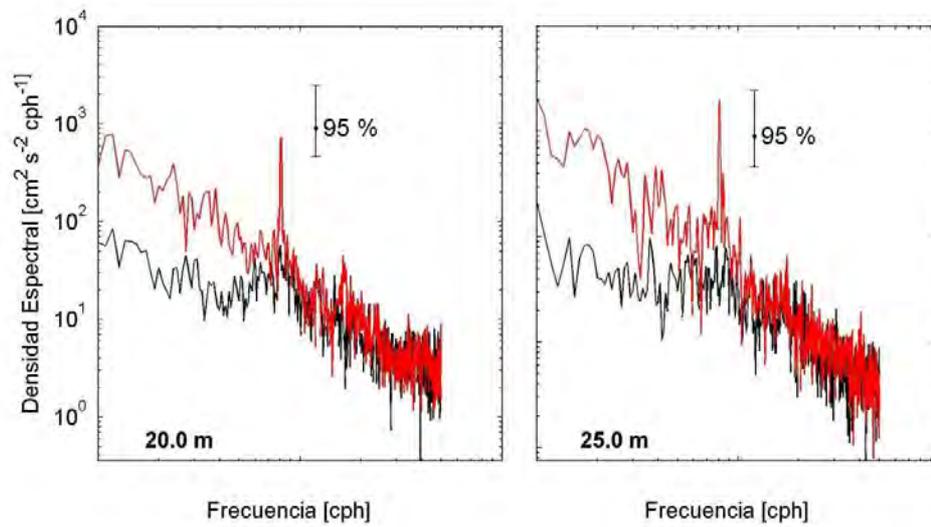


Figura 78: Espectros de energía de las componentes U (negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 20 y 25 m.

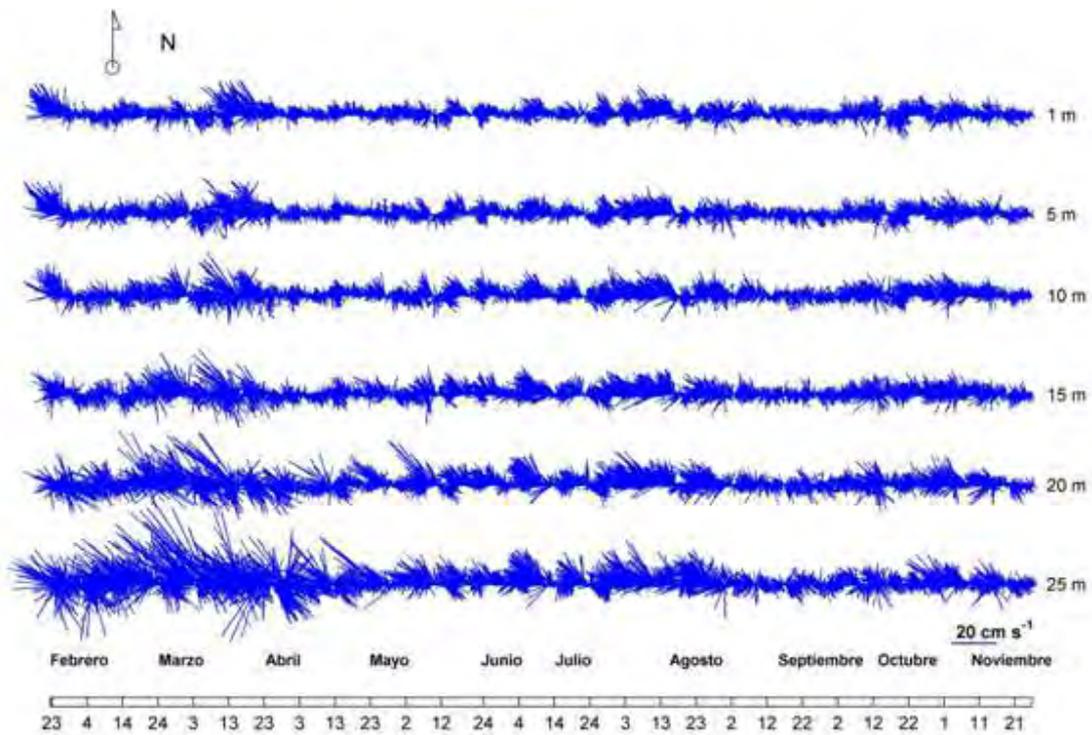


Figura 79: Diagrama de trazos de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

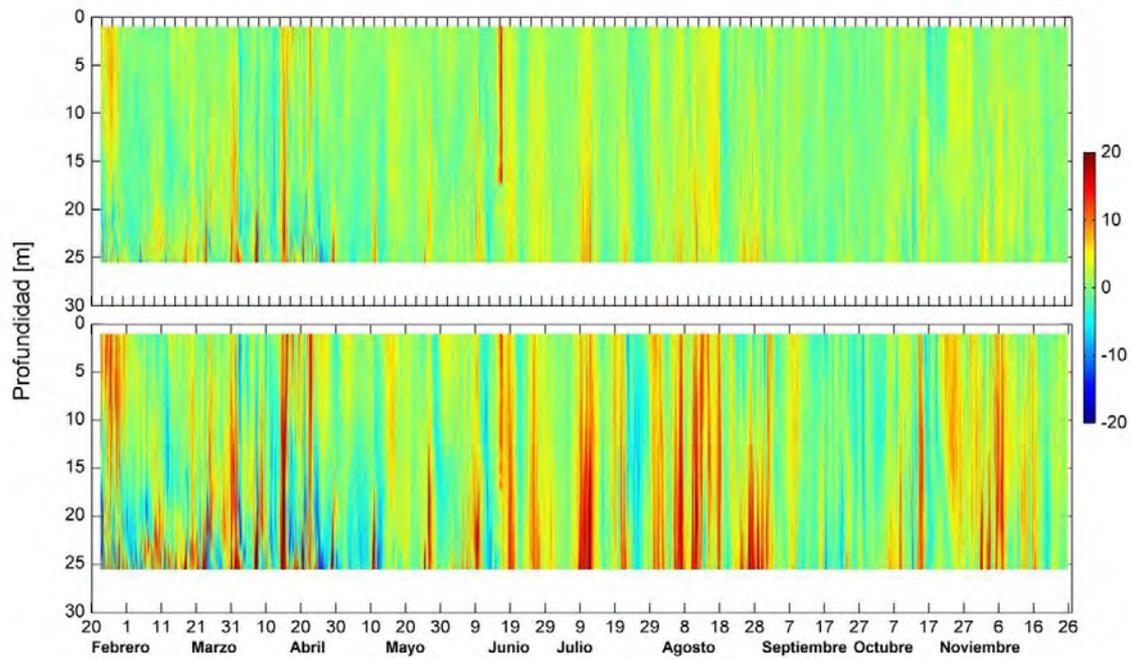


Figura 80. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi. Las unidades están expresadas en cm/s.

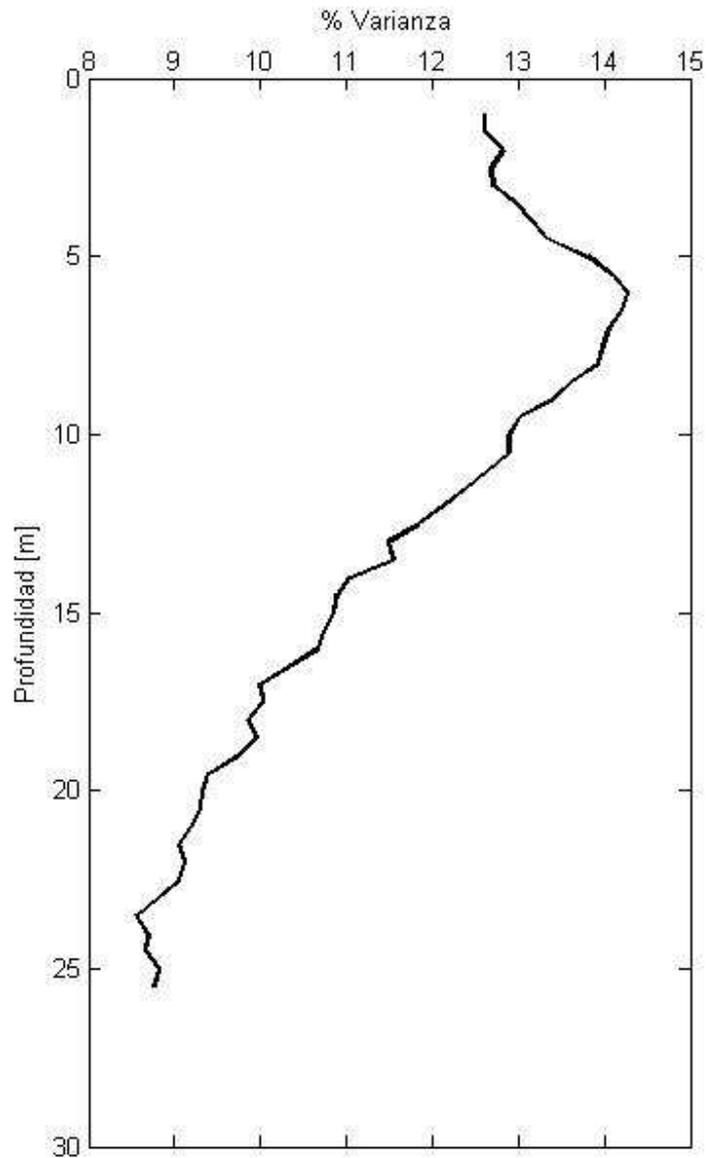


Figura 81. Importancia de la marea en profundidad al norte de Puyuhuapi entre los 1 y 30 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

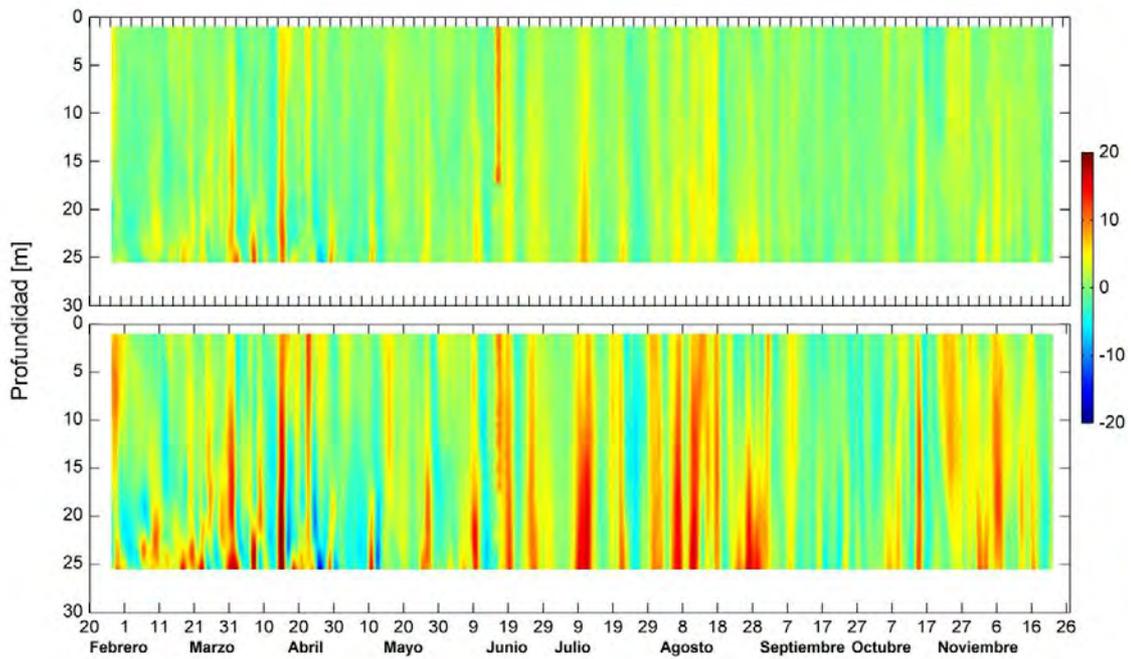


Figura 82. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (en el centro) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi. Las unidades están expresadas en cm/s.

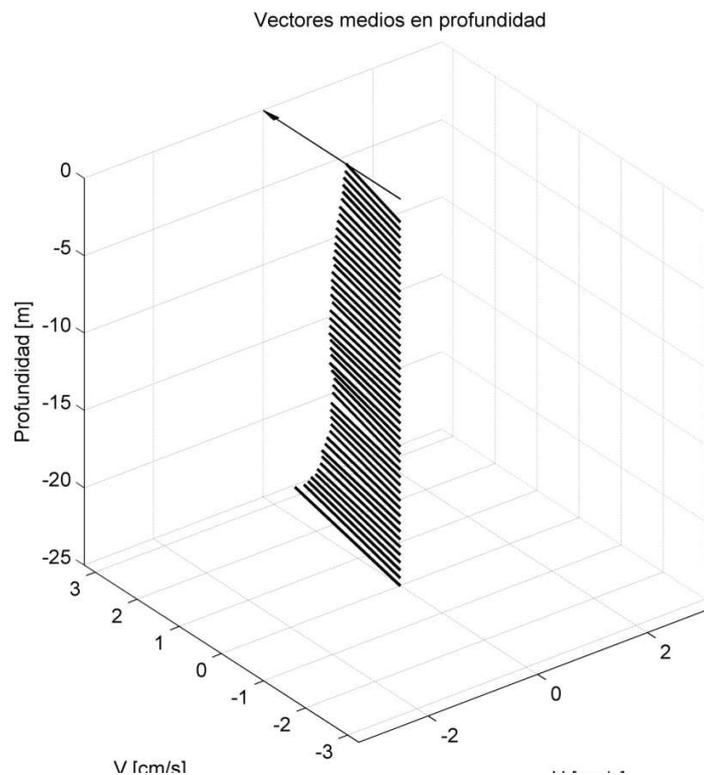


Figura 83. Vector promedio en profundidad entre los 1 y 30 m al norte de Puyuhuapi.

Corrientes profundas Puyuhuapi Norte

En forma consistente con lo indicado para las corrientes superficiales, las corrientes profundas se presentaron alineadas con el eje Norte-Sur, especialmente entre los 120 m y los 140 m de profundidad, para las celdas bajo los 150 m son menos alineadas a la costa y se presentan más dispersas. Las intensidades de las corrientes en este sector son menores a 11 cm/s, para las profundidades entre 120 m y 180 m (Figuras 84 y 85, Tablas 30 - 32). Las bajas intensidades de las corrientes del sector, también son apreciadas en los diagramas de dispersión de las componente U y V, esta mayor dispersión de las direcciones se observó claramente asociado a las profundidades mayores a 170 m (Figuras. 86 y 87, Tablas 30 - 32).

Para efectuar una aproximación a las características de dispersión del área, se estimaron los diagramas de vector progresivo (PVD, en sus siglas en inglés). Este análisis supone que una parcela de agua ubicada a la profundidad de cada celda indicada, se desplaza en un campo de corrientes espacialmente homogéneo a esa profundidad. Este supuesto es especialmente válido para mediciones de ADCP que asume que no hay cizalle vertical dentro de una misma celda de profundidad. Las débiles corrientes del sector son concordantes con los mínimos desplazamientos observados en los diagramas de vector progresivo (PVD) donde se puede observar que en forma neta las corrientes se dirigen hacia el Sur entre los 115 m y 160 m, pero las intensidades medias levemente superan 1 cm/s, bajo los 170 m de profundidad la dirección media de las corrientes no se encuentra tan desarrollada (Figuras 88 y 89).

El análisis de las características espectrales de las corrientes del sector, muestra que existe una importante influencia de la frecuencia semi-diurna mareal (periodo de 12h), lo que es claramente observable en los espectros de energía donde las corrientes semi-diurnas pueden llegar hasta los 10^3 [cm^2s^{-2} cph^{-1}], sin embargo, se presentan otras acumulaciones de energía en la baja frecuencia (periodos mayores a 1 día) especialmente en la componente V. Sin embargo, para representar corrientes de más de 11 meses de extensión las acumulaciones de energía de la banda semi-diurna no son tan altas como en los casos antes indicados (Melinka y Puyuhuapi Sur). Las corrientes bajo los 170 m, se encuentran altamente influenciadas por ruido y no se presentan acumulaciones de energía estadísticamente significativas (Figuras 90 y 91).

El comportamiento del vector corrientes fue analizado a través de los diagramas de trazos (Figura 92), dado que las corrientes del sector poseen un marcado eje Norte-Sur se graficaron los diagramas de trazos de las corrientes del sector. Las corrientes no presentan oscilaciones con un claro patrón de comportamiento, se presentan muy dispersivas sin desarrollar fluctuaciones que se puedan atribuir con claridad al forzante mareal, esto es consistente con lo se aprecia en el perfil de varianza explicada por mareas (Figura 94).

En concordancia con los vectores de corrientes, se graficaron los contornos de las componentes U y V de las corrientes (Figura 93). Las corrientes en v fueron las más intensas y por tanto el análisis posterior se realiza describiendo esta componente. Las corrientes presentan muy baja intensidad (< 1 cm/s) entre febrero y marzo, a comienzos de abril se aprecian corrientes de mayor intensidad (c.a. 10 cm/s) entre los 110 m y los 130 m en dirección Norte, flujos y contra-flujos se pueden observar a partir de esa fecha con mayor claridad todos de mayor intensidad en torno a los 110 m, a fines de agosto un nuevo periodo de corrientes relativamente más intensas se presentó hacia el Norte y permaneció entre los 110 m y los 140 m hasta mediados de septiembre. En el último tercio del registro

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

las corrientes se presentaron menos variables y de muy baja intensidad con puntuales eventos hacia el Norte y hacia el Sur entre los 110 m y los 150 m (Figura 93). Las corrientes filtradas muestran una clara consistencia con lo indicado previamente y resaltan las corrientes hacia el Norte que parecen tener una inclinación en profundidad que sugiere un tipo de propagación de baja frecuencia. Los vectores promedio de las corrientes (Figura 96) muestran que las corrientes entre los 120 m y los 130 m son débiles y con direcciones variables. A profundidades mayores de 130 m y hasta los 150 m de profundidad se presentan corrientes promedio muy débiles (< 1 cm/s) con dirección Sur, bajo los 160 m las corrientes tienden a ser relativamente más intensas y se dirigen hacia el Norte en forma consistente con lo observado a través de los PVDs (Figura 89).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

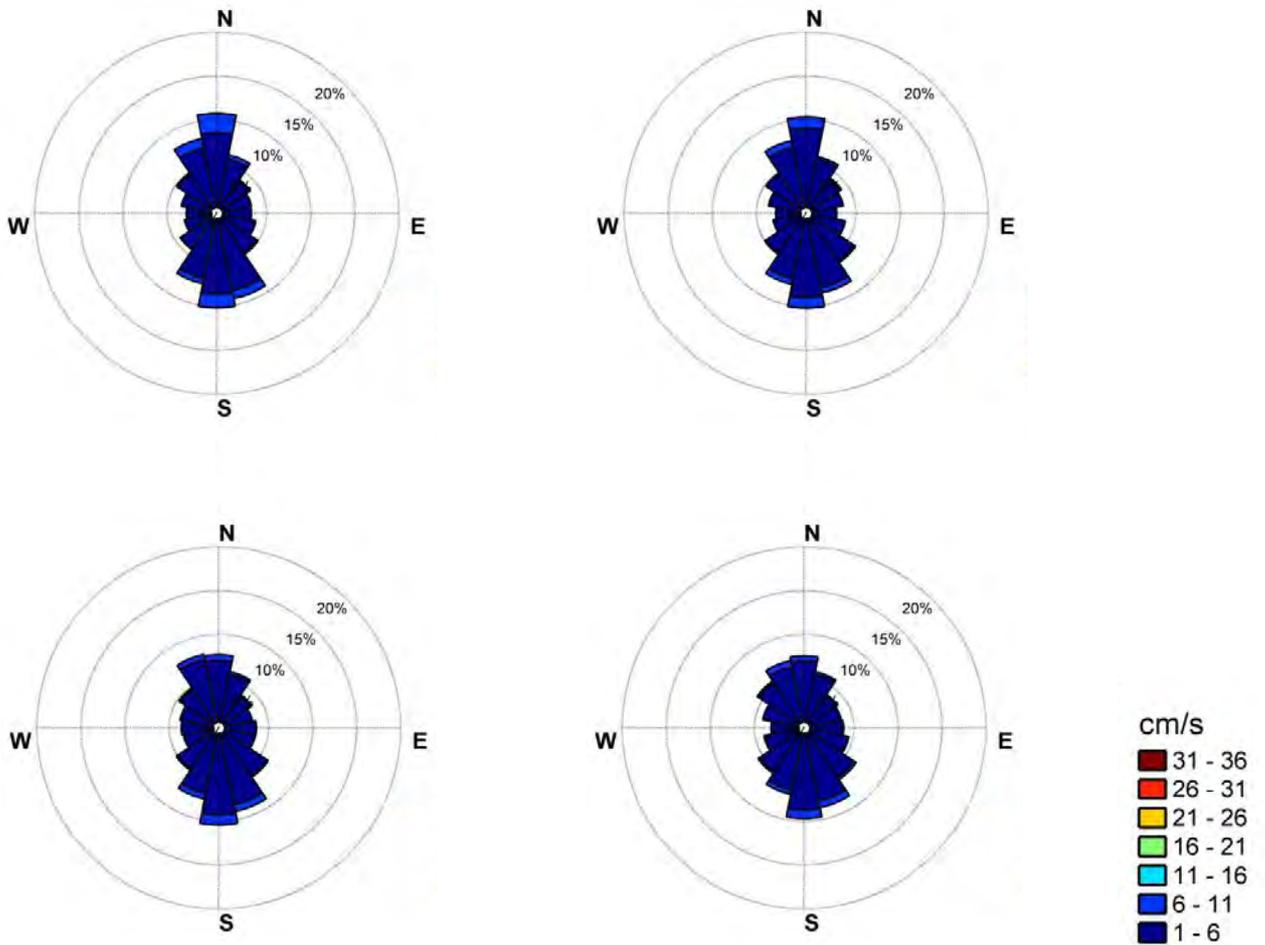


Figura 84. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 120 m, 130 m, 140 m y 150 m de profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

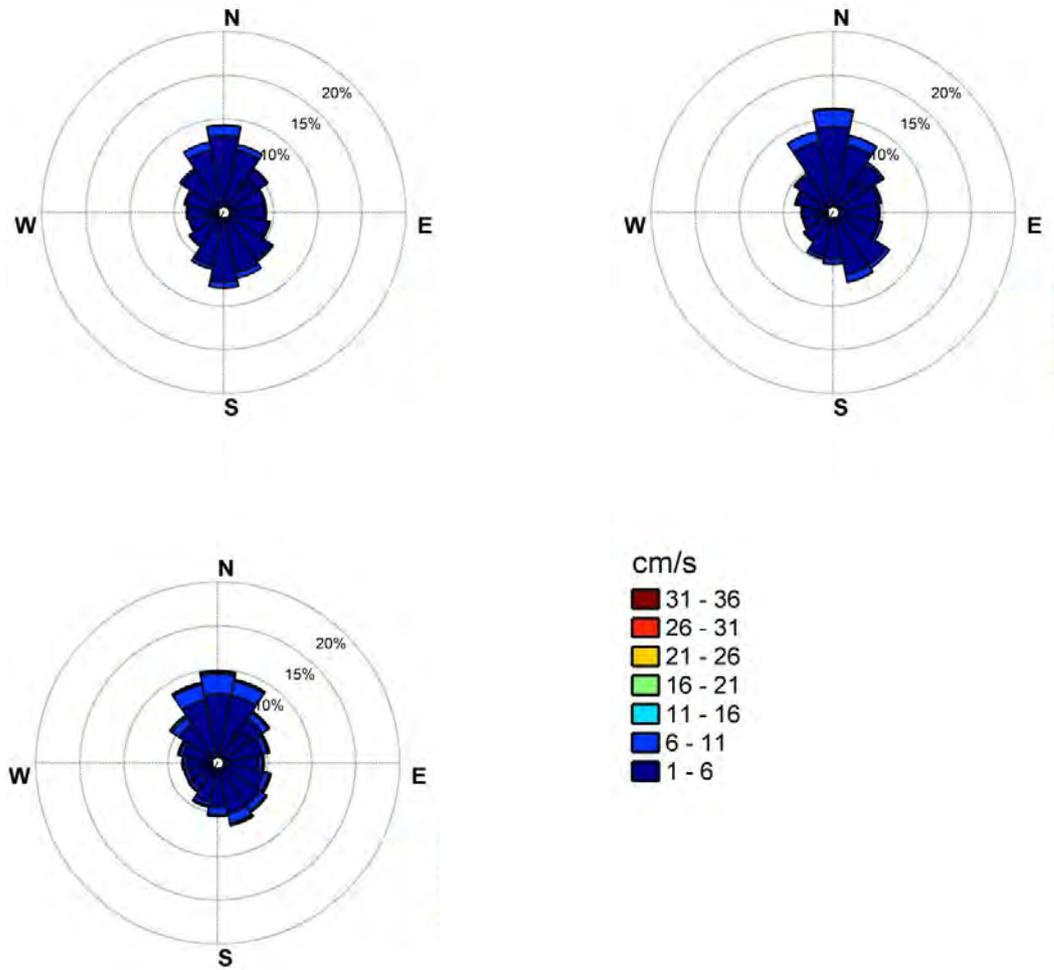


Figura 85. Rosa de direcciones y magnitudes de corrientes medidas a 160 m, 170 m y 180 m de profundidad en la zona norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 30. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 111 y 130 m.

	111 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	17,55	11,27	6,40	9,59	20,11	11,75	6,37	8,79	91,83
Máximos	10,80	10,32	6,65	11,69	13,18	13,09	6,79	9,73	13,18
Dir. Media	2,15	39,65	90,53	139,73	180,71	219,12	268,44	319,28	174,82
Mag. Media	3,94	3,35	2,50	3,05	3,98	3,46	2,55	3,00	0,18
Desv. STD.	4,49	3,84	2,80	3,46	4,56	4,02	2,87	3,39	3,80
	115 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	19,53	10,44	5,82	9,77	20,05	11,24	5,33	8,08	90,26
Máximos	11,23	9,78	5,61	9,85	11,90	11,26	7,85	7,97	11,90
Dir. Media	1,97	38,74	90,75	140,19	181,19	220,55	269,70	318,45	176,82
Mag. Media	3,94	3,08	2,33	2,78	3,82	3,24	2,46	2,79	0,07
Desv. STD.	4,51	3,53	2,60	3,16	4,39	3,73	2,80	3,15	3,64
	120 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	18,93	9,77	6,64	9,08	19,55	11,59	5,85	8,53	89,93
Máximos	12,24	9,82	5,70	8,51	11,92	10,11	7,10	7,72	12,24
Dir. Media	2,42	39,98	89,91	138,44	180,63	219,62	269,31	319,08	176,28
Mag. Media	3,97	2,94	2,32	2,83	3,69	3,20	2,43	2,69	0,06
Desv. STD.	4,56	3,38	2,57	3,21	4,23	3,66	2,73	3,05	3,56
	125 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	17,43	9,56	6,04	9,93	19,49	11,90	7,18	9,09	90,62
Máximos	12,08	10,58	6,66	11,76	9,75	9,86	8,77	7,98	12,08
Dir. Media	1,83	40,34	89,48	139,10	181,05	220,30	269,16	318,81	210,29
Mag. Media	3,79	2,91	2,38	2,77	3,53	3,05	2,47	2,77	0,14
Desv. STD.	4,34	3,30	2,65	3,15	4,02	3,49	2,80	3,11	3,43
	130 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	18,29	9,89	6,45	10,16	19,08	12,19	5,94	8,66	90,64
Máximos	11,54	8,03	6,41	9,70	11,58	10,21	7,83	7,98	11,58
Dir. Media	1,45	41,32	88,55	139,19	181,52	220,78	268,76	318,19	192,97
Mag. Media	3,62	2,79	2,38	2,81	3,53	3,12	2,48	2,70	0,15
Desv. STD.	4,11	3,17	2,64	3,17	4,00	3,56	2,79	3,04	3,38

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 31. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 135 y 155 m.

	135 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	16,08	10,17	6,18	10,07	19,98	11,03	7,84	8,81	90,16
Máximos	11,11	9,82	9,15	9,19	10,36	11,43	7,80	8,46	11,43
Dir. Media	0,68	40,69	91,02	138,57	181,30	219,53	268,50	318,42	196,44
Mag. Media	3,51	2,90	2,50	2,76	3,44	3,14	2,49	2,80	0,23
Desv. STD.	3,99	3,31	2,80	3,10	3,90	3,56	2,81	3,18	3,33
	140 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	15,69	9,50	6,79	10,02	19,44	12,52	7,00	8,85	89,81
Máximos	10,81	10,67	5,94	8,99	10,56	10,94	9,49	7,85	10,94
Dir. Media	359,87	41,35	90,94	139,62	181,26	220,52	270,28	317,29	195,56
Mag. Media	3,34	2,86	2,42	2,81	3,45	3,07	2,47	2,73	0,32
Desv. STD.	3,81	3,26	2,68	3,18	3,91	3,53	2,81	3,08	3,27
	145 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	15,10	10,35	6,76	10,67	17,61	13,03	7,24	9,18	89,95
Máximos	12,60	11,78	8,94	8,91	10,46	10,76	9,36	8,03	12,60
Dir. Media	359,98	41,17	89,28	138,25	181,29	220,89	269,32	317,87	196,56
Mag. Media	3,26	2,87	2,42	2,77	3,51	3,11	2,49	2,73	0,28
Desv. STD.	3,70	3,23	2,73	3,13	3,97	3,56	2,83	3,10	3,25
	150 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	14,65	9,66	7,50	11,16	18,42	12,50	7,03	10,07	91,00
Máximos	12,55	13,48	7,22	8,81	10,74	11,09	7,36	9,56	13,48
Dir. Media	0,20	41,01	89,79	138,75	180,82	221,60	267,87	318,55	190,94
Mag. Media	3,42	2,97	2,54	2,97	3,50	3,11	2,60	2,96	0,28
Desv. STD.	3,89	3,38	2,89	3,35	3,95	3,54	2,95	3,36	3,38
	155 m								
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales
%Dirección	16,54	10,47	7,83	11,01	17,21	10,61	6,48	10,25	90,40
Máximos	12,74	16,14	9,11	8,10	10,12	9,51	8,59	9,98	16,14
Dir. Media	0,38	41,98	89,78	138,73	180,21	221,12	269,59	318,79	134,70
Mag. Media	3,52	2,90	2,58	2,98	3,39	3,08	2,60	2,92	0,07
Desv. STD.	4,01	3,34	2,91	3,37	3,83	3,48	2,95	3,32	3,35

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Tabla 32. Frecuencia de dirección y estadísticos de la corriente al norte de Puyuhuapi entre los 160 y 185 m.

				160 m						
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales	
%Dirección	16,98	12,47	8,37	10,95	15,00	9,78	7,05	9,38	89,98	
Máximos	14,07	12,59	9,91	12,10	12,47	10,16	9,16	8,29	14,07	
Dir. Media	1,10	41,24	90,18	137,71	180,88	220,73	270,93	318,49	41,99	
Mag. Media	3,72	3,11	2,78	2,98	3,39	3,04	2,69	2,98	0,24	
Desv. STD.	4,26	3,55	3,15	3,39	3,87	3,44	3,09	3,39	3,45	
				165 m						
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales	
%Dirección	18,47	13,93	8,79	11,42	14,92	8,90	6,16	9,27	91,86	
Máximos	14,83	11,24	7,67	9,01	12,60	10,62	11,71	11,26	14,83	
Dir. Media	1,86	41,47	90,69	136,80	179,10	220,88	269,67	318,68	43,16	
Mag. Media	3,91	3,30	2,81	3,09	3,30	3,07	2,70	3,00	0,47	
Desv. STD.	4,45	3,75	3,15	3,48	3,76	3,48	3,17	3,41	3,57	
				170 m						
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales	
%Dirección	20,35	14,24	9,60	12,14	12,64	8,13	5,89	8,66	91,65	
Máximos	13,63	13,88	36,72	11,81	27,06	14,20	9,51	17,91	36,72	
Dir. Media	2,21	42,12	89,78	138,66	177,02	222,04	269,76	318,30	45,58	
Mag. Media	3,99	3,51	3,03	3,37	3,57	3,20	2,73	3,08	0,67	
Desv. STD.	4,59	4,03	3,74	3,85	4,19	3,72	3,14	3,63	3,85	
				175 m						
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales	
%Dirección	20,20	14,88	9,87	10,71	12,77	7,77	5,56	9,36	91,12	
Máximos	29,87	45,07	58,41	89,96	42,15	34,12	73,15	46,40	89,96	
Dir. Media	1,97	41,79	89,70	136,40	178,48	221,77	271,17	318,68	39,03	
Mag. Media	4,23	3,73	3,31	3,70	3,89	3,53	3,27	3,52	0,75	
Desv. STD.	5,00	4,67	4,50	5,72	4,80	4,56	5,32	4,61	4,68	
				180 m						
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales	
%Dirección	18,63	15,27	9,98	11,65	12,22	7,68	6,82	10,08	92,32	
Máximos	42,81	29,57	91,57	61,80	63,43	69,84	79,75	78,26	91,57	
Dir. Media	1,01	41,90	87,77	135,34	178,76	223,14	270,60	317,82	31,79	
Mag. Media	4,72	4,16	4,26	4,15	4,62	4,12	4,84	4,60	0,73	
Desv. STD.	5,95	5,33	7,07	5,77	6,45	6,32	9,00	7,12	6,22	
				185 m						
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Totales	
%Dirección	19,34	14,15	9,60	9,69	11,24	8,37	7,96	11,71	92,07	
Máximos	98,90	125,39	69,97	87,41	71,74	67,16	93,02	93,45	125,39	
Dir. Media	1,50	42,73	91,70	135,10	180,11	224,54	269,20	316,85	18,41	

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Mag. Media	5,91	5,89	6,32	6,79	5,62	6,17	7,03	6,02	0,89
Desv. STD.	9,69	10,15	10,89	11,36	8,79	9,76	12,76	10,74	10,05

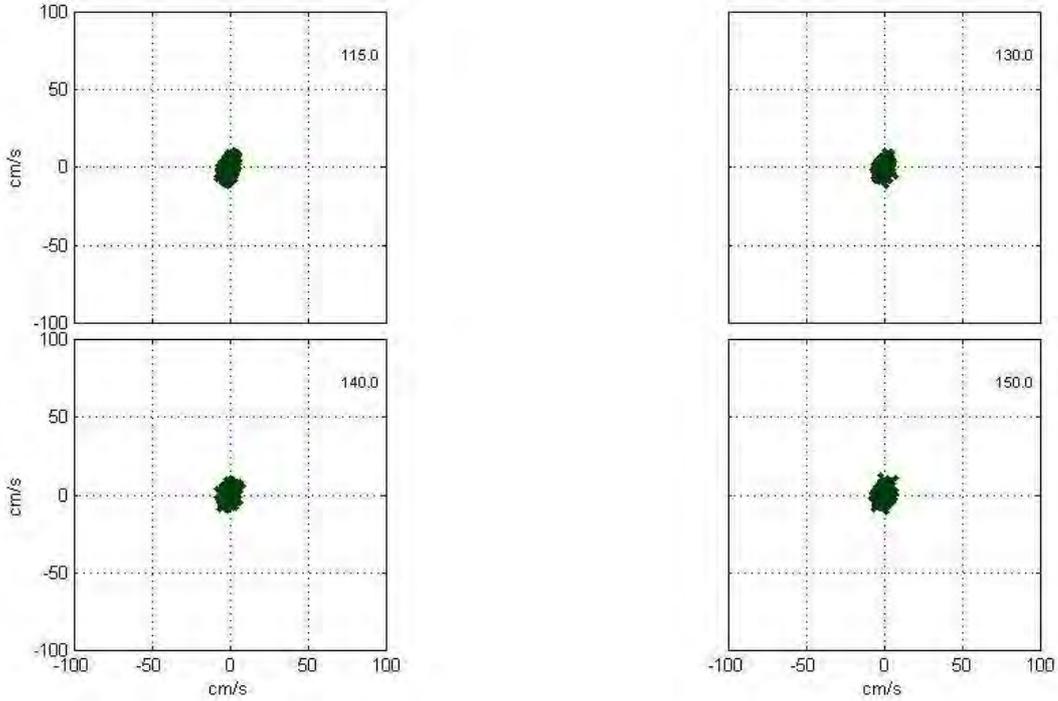


Figura 86. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 115 y 150 m.

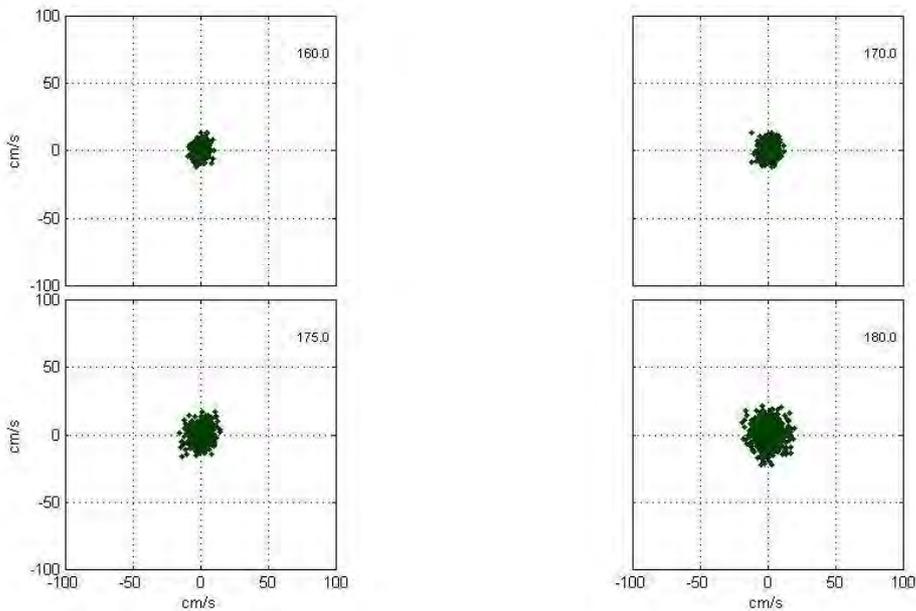


Figura 87. Diagramas de dispersión de las componentes de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 160 y 180 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

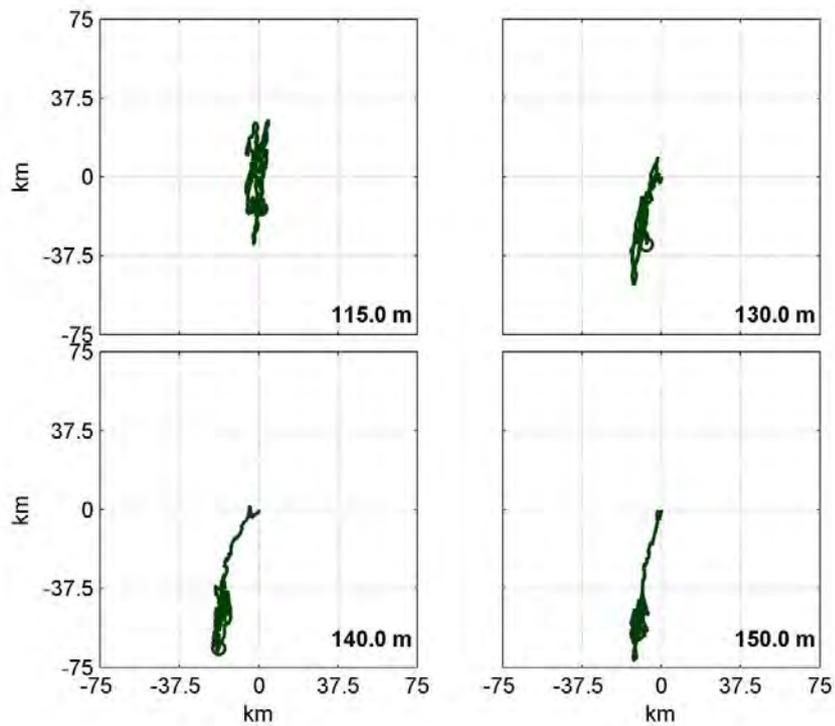


Figura 88. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 115 y 150 m.

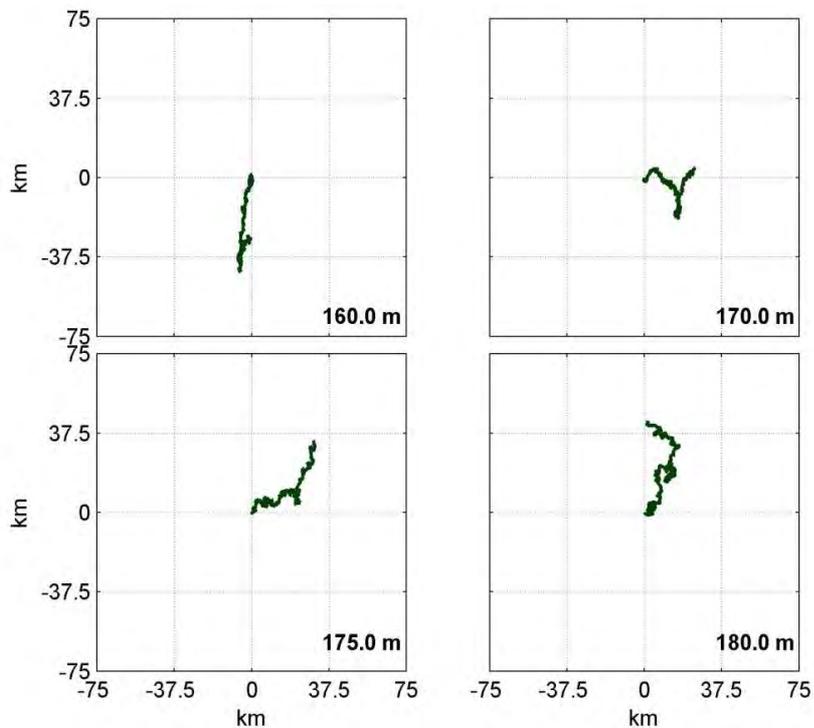


Figura 89. Diagramas del Vector Progresivo estimado para las corrientes la zona norte de Puyuhuapi entre los 160 y 180 m.

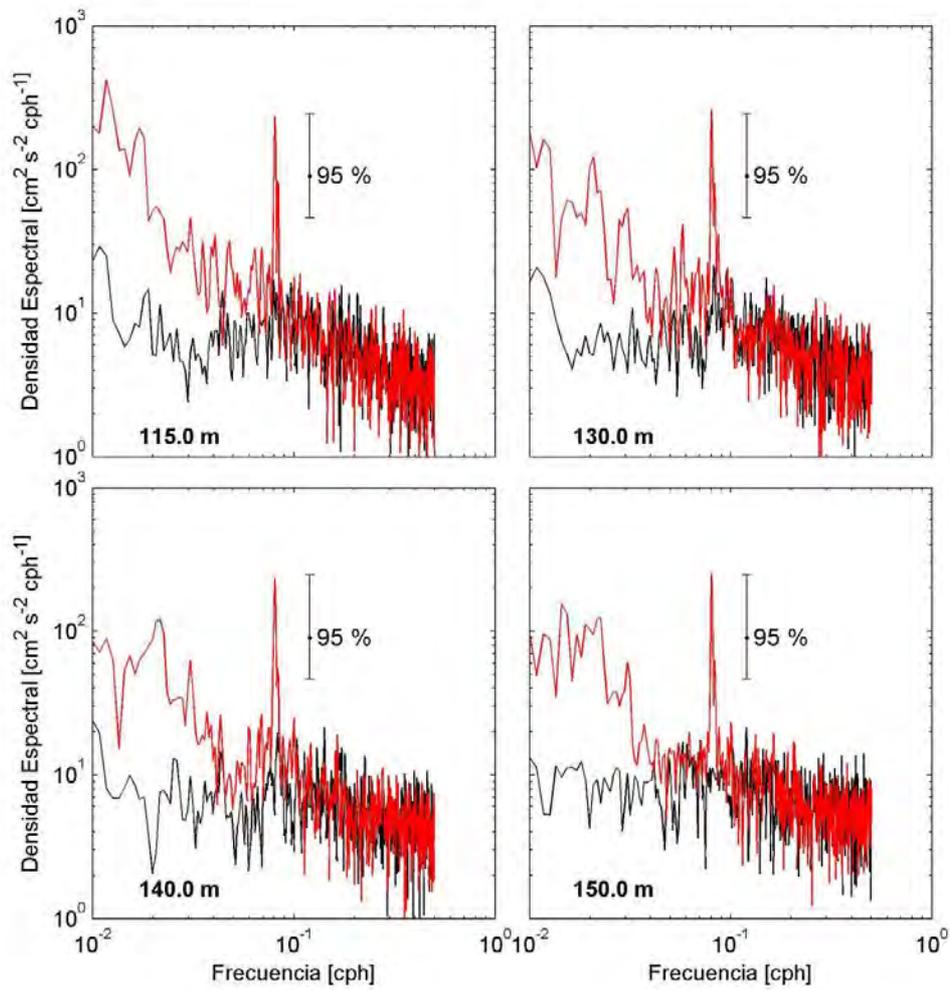


Figura 90. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 115 y 150 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

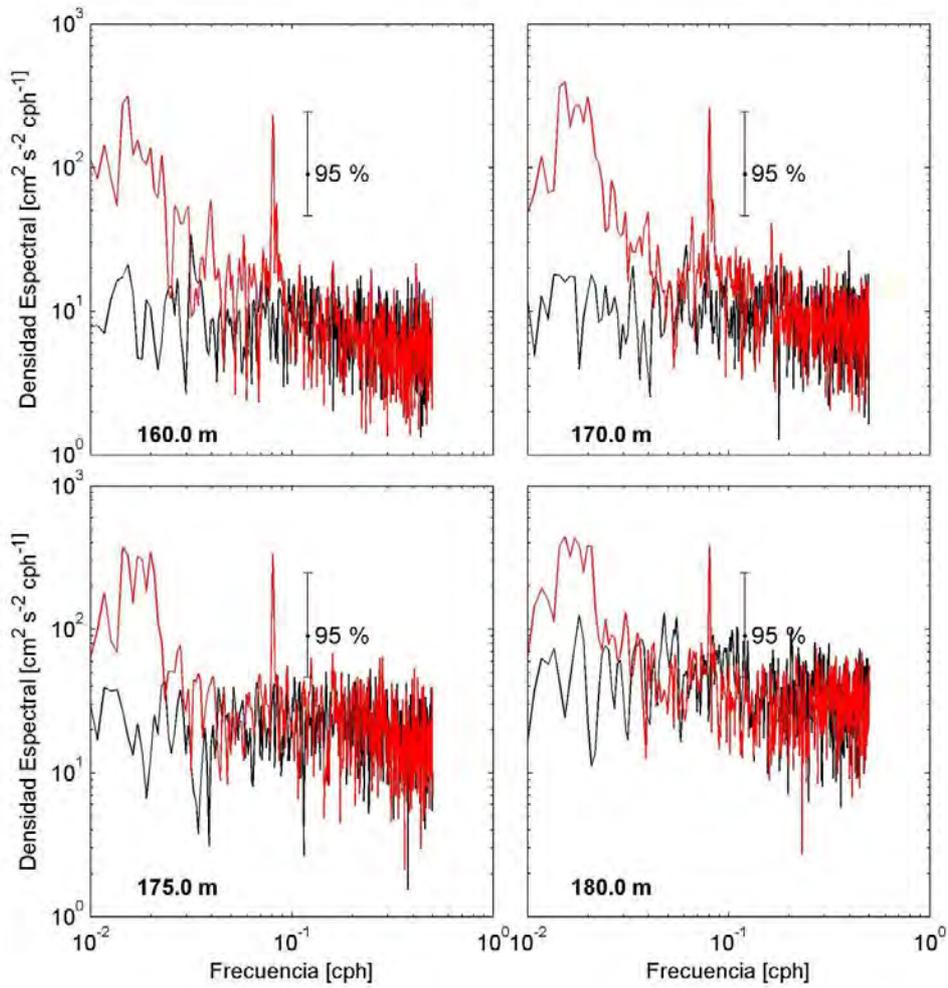


Figura 91. Espectros de energía de las componentes U(negro) y V (rojo) de las corrientes de la zona norte de Puyuhuapi entre los 160 y 180 m.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

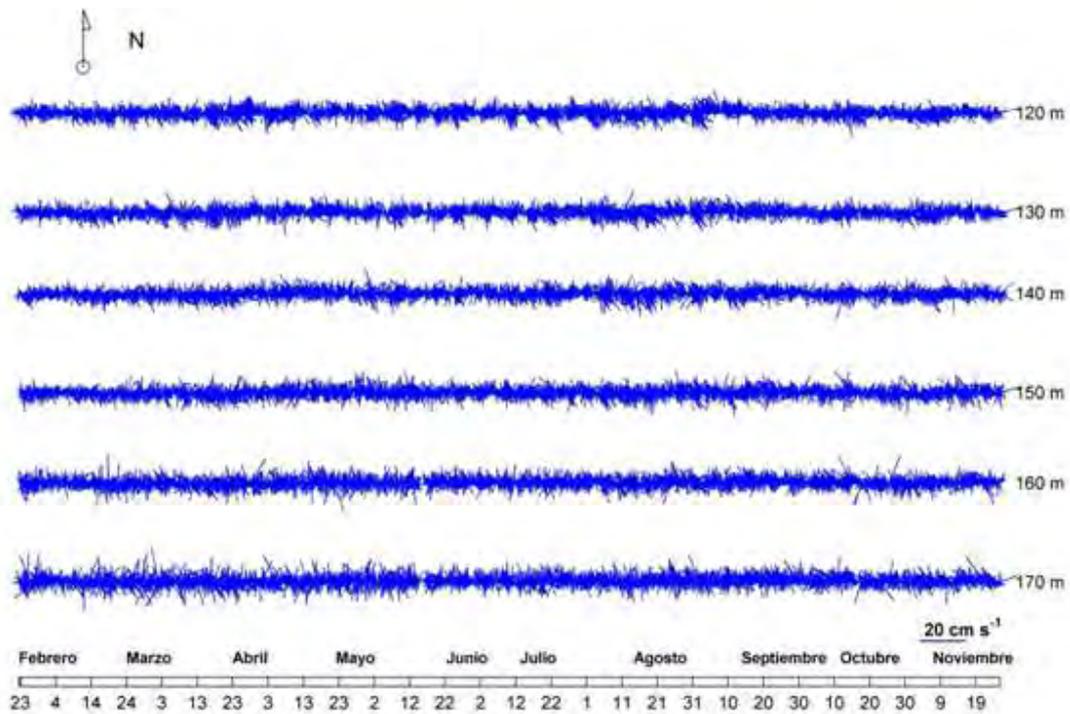


Figura 92. Diagrama de trazos de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

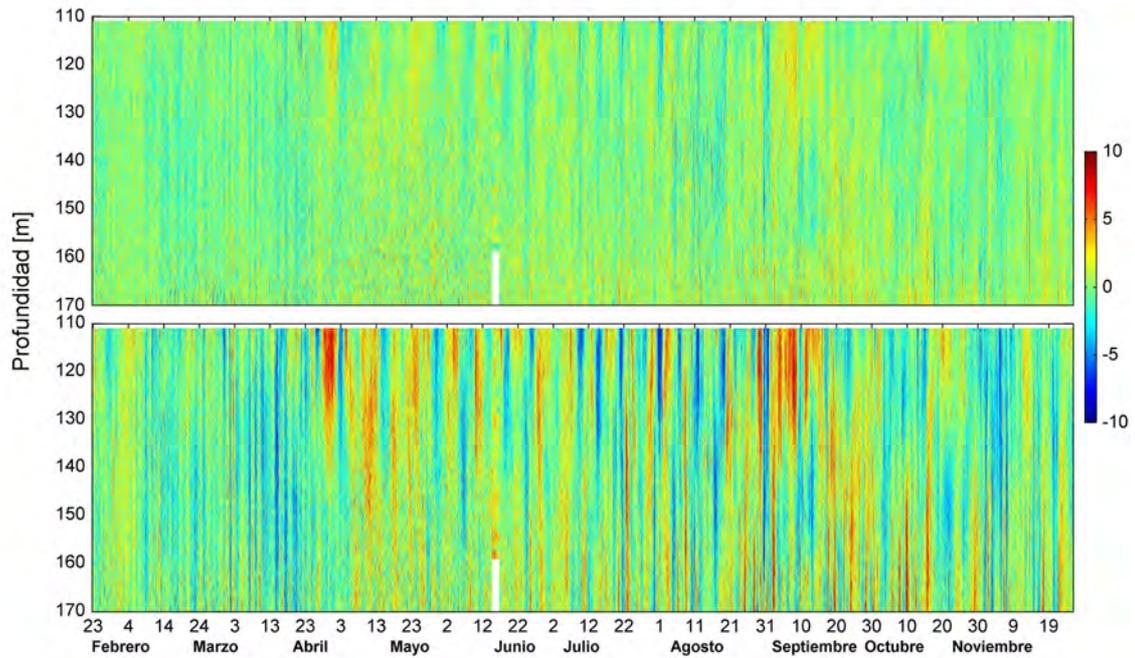


Figura 93. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi. Las unidades están expresadas en cm/s.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

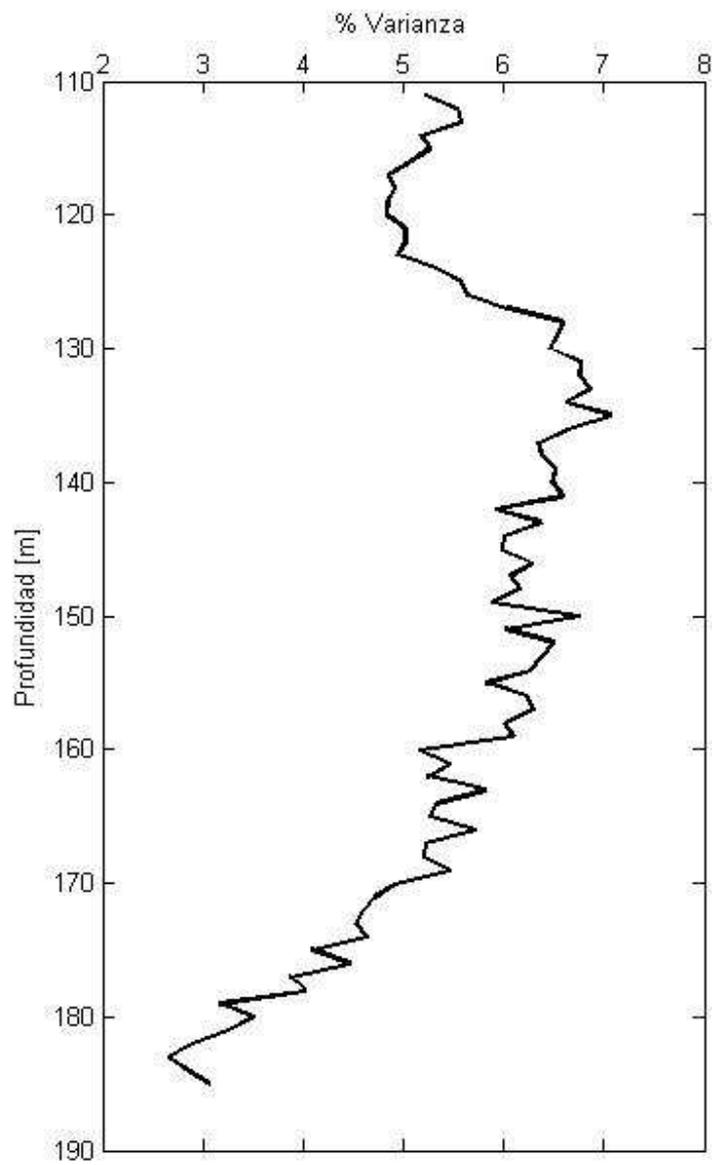


Figura 94. Importancia de la marea en profundidad en el norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

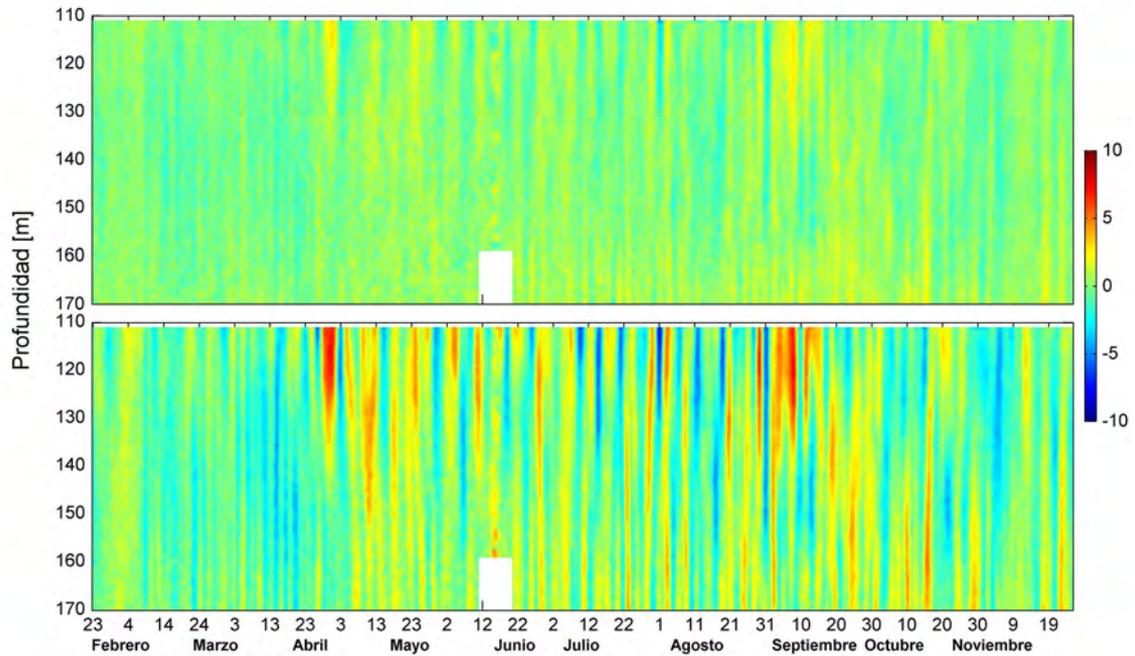


Figura 95. Series filtradas con Coseno-Lanczos amplitud media 40h. Contornos de las componentes U (encima) y V (abajo) de las corrientes medidas en la zona norte de Puyuhuapi. Las unidades están expresadas en cm/s.

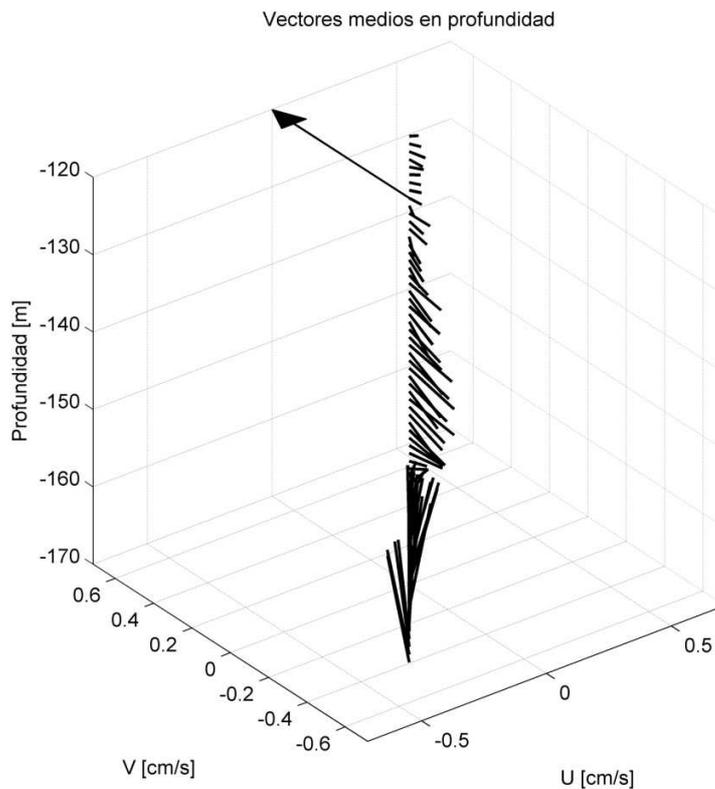


Figura 96. Vector promedio en profundidad al norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

4.12. Recopilación de información en SERNAPESCA y salmoneras sobre la mortalidad de peces por baja de oxígeno del 2014 al 2016.

Año 2014

En general los valores que se registraron mostraron bajos porcentajes de mortalidad (0.003-8 %); no superando el 1% en la mayoría de los casos (Figura 97). Los centros de cultivo con mortalidades mayores al 1% fueron Punta Paredes (110201) y Angostura (110059) de la empresa Los Fiordos (Figura 98), que destacaron valores entre 1 y 6%; mientras Punta Krauss (110152) perteneciente a la empresa Tornagaleones, mostró un máximo de 8% (Figura 97). Todos estos centros mantienen en cultivo a la especie Salmón del Atlántico en estado adulto y se encuentran localizados al interior del Seno Magdalena (Figura 17). Las mortalidades se registraron entre la semana 1 y 9 del año 2014, correspondiente a la estación de verano.

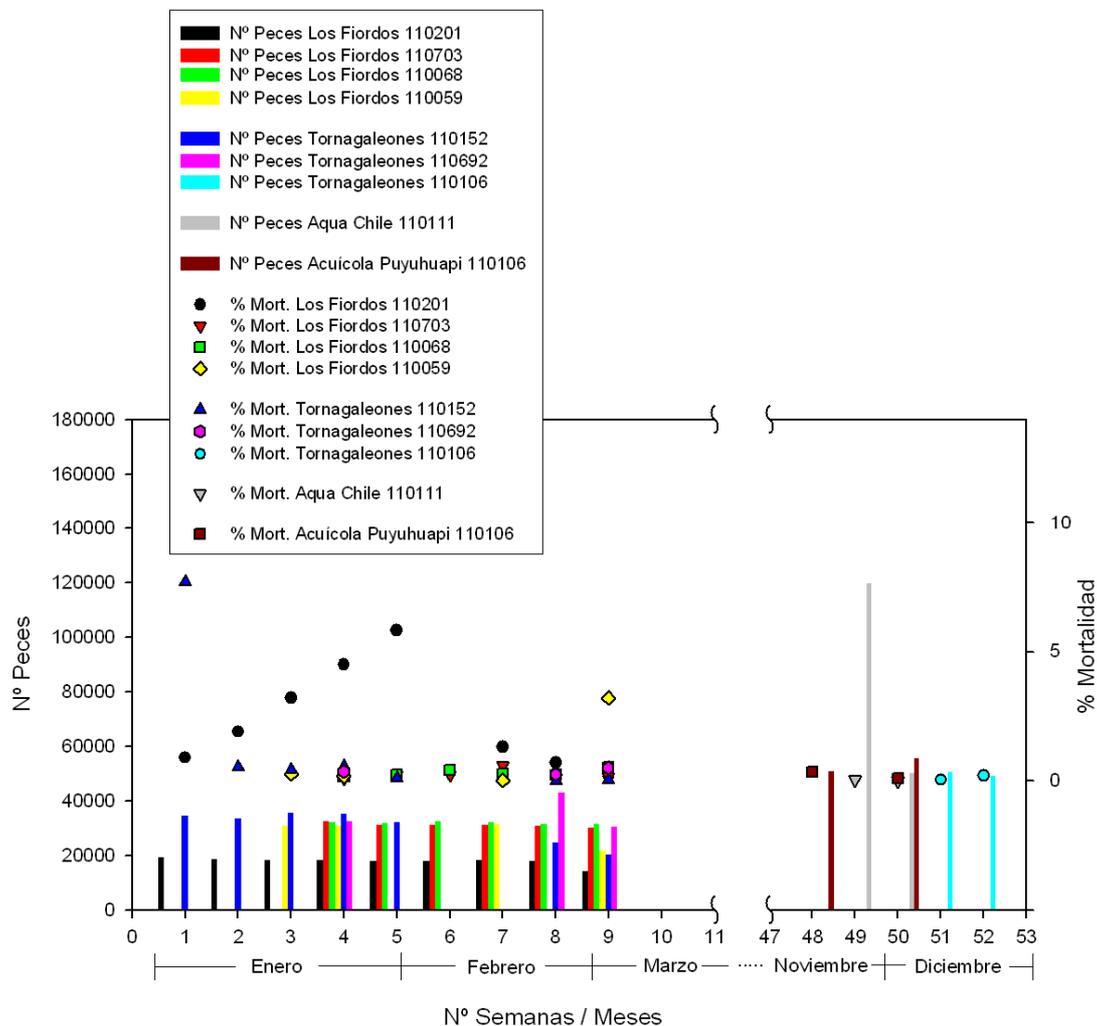


Figura 97. Porcentaje de mortalidad (puntos) y Nº de peces (barras) registrados durante el año 2014 en el área de estudio.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

Año 2015

Al igual que en el año 2014, los valores que se registraron mostraron bajos porcentajes de mortalidad (0.002-5 %); no superando el 0.5% en la mayoría de los casos (Figura 98). Los centros de cultivo con mortalidades mayores al 1% fueron, Isla Marta (110071) de la empresa Los Fiordos y Estero Queulat (110302) de la empresa Puerto Aguirre (Figura 98); que destacaron valores de 5 y 3%, respectivamente. Las mortalidades fueron registradas durante la semana 46 (verano) en Isla Marta (110071) donde se mantenía en cultivo adultos de Salmón del Atlántico, y durante la semana 20 (otoño) en Estero Queulat (110302) con cultivo de adultos de Trucha Arcoiris. Ambos centros están localizados en sectores con influencia de agua dulce; Isla Marta se encuentra ubicada al sur de río Marta y Estero Queulat frente a la descarga del río Ventisquero sur (Figura 17).

Año 2016

Al igual que en los años 2014 y 2015, los valores que se registraron mostraron bajos porcentajes de mortalidad (0.02-3 %); no superando el 0.4% en la mayoría de los casos (Figura 99). El único centro de cultivo con mortalidades mayores al 1% fue Amparo Grande (110068) de la empresa Los Fiordos (Figura 99), que destacó un valor máximo de 3% durante la semana 1 del 2016 (verano). Este centro mantiene en cultivo adultos de Trucha Arcoiris.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

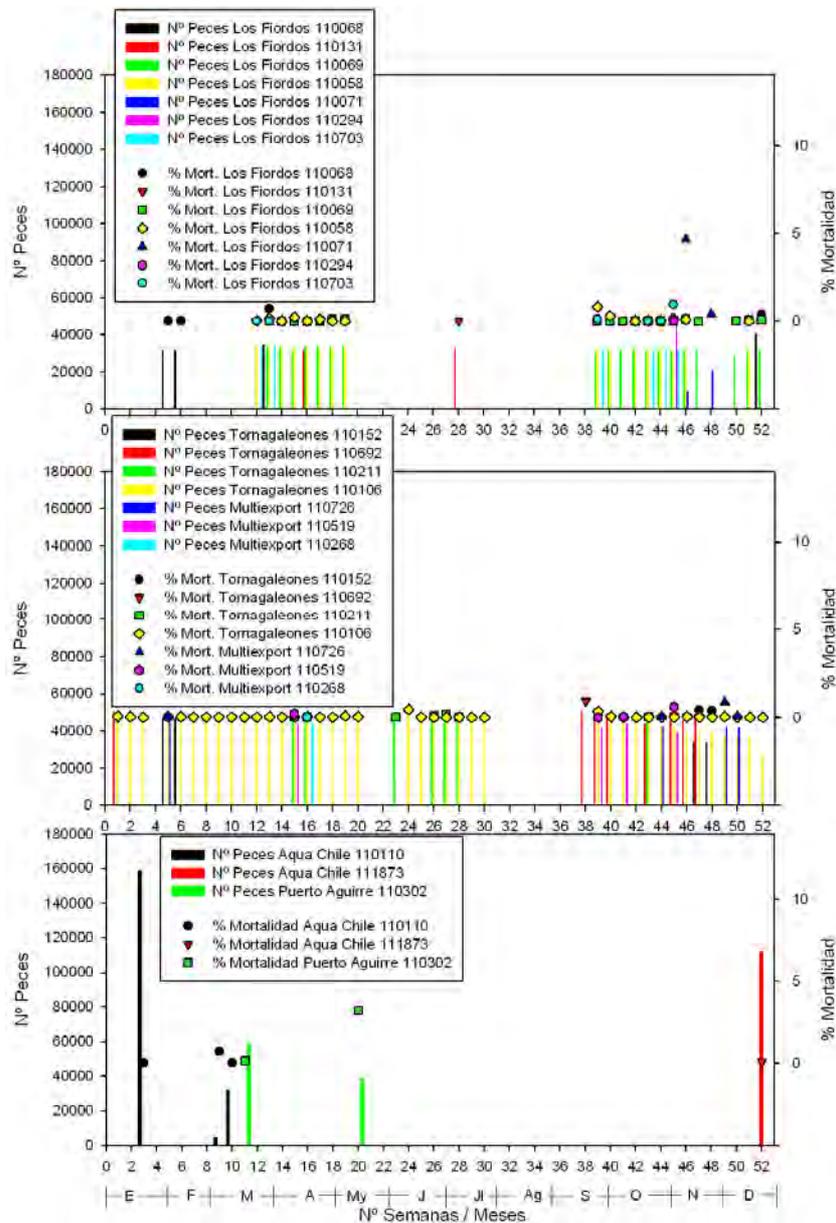


Figura 98. Porcentaje de mortalidad (puntos) y N° de peces (barras) registrados durante el año 2015 en los centros de cultivo del área de estudio.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

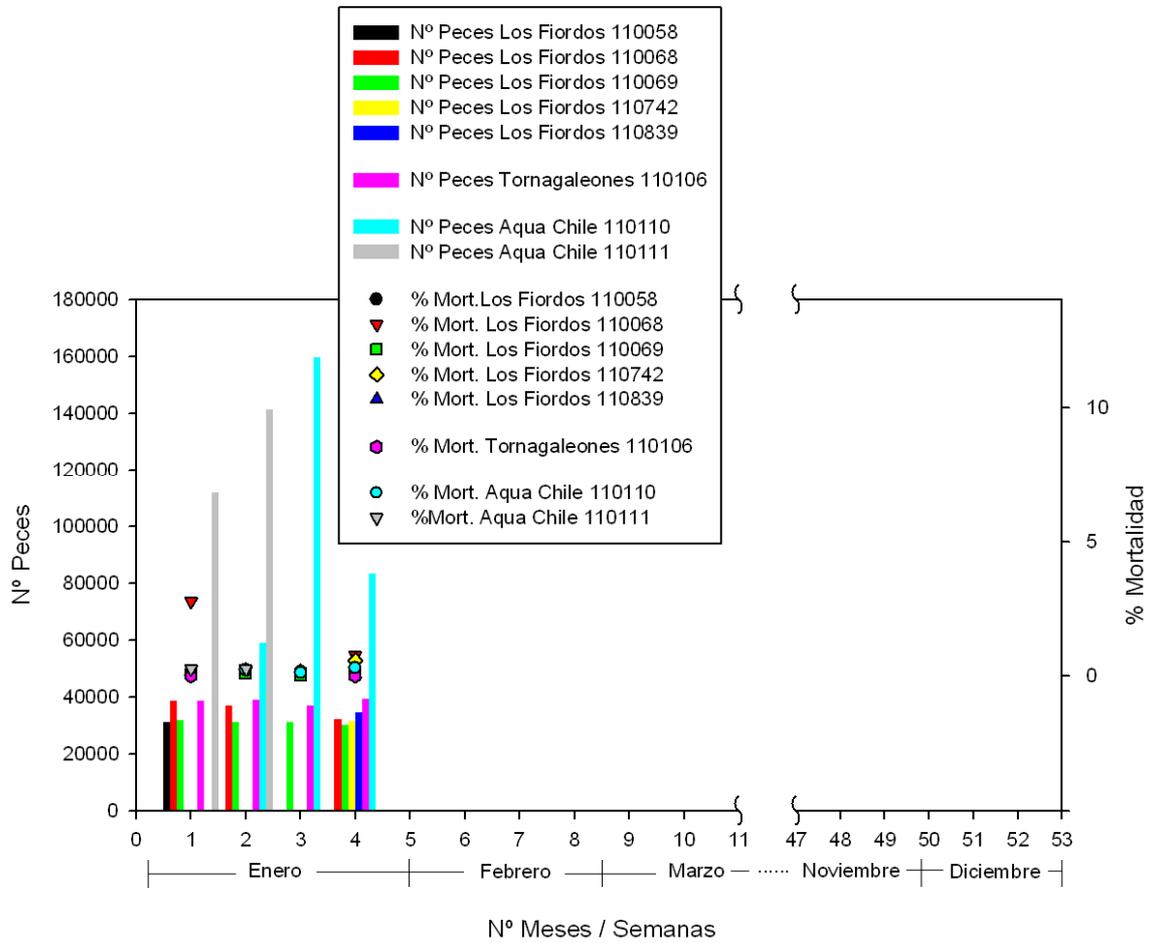


Figura 99. Porcentaje de mortalidad (puntos) y Nº de peces (barras) registrados durante el año 2016 en el área de estudio.

5. Análisis y discusión de los resultados

De acuerdo a los objetivos generales del proyecto, esta sección concentra su atención en el análisis y discusión de la variabilidad de la hipoxia y la ventilación profunda (enero-noviembre 2016). Además, se explicaran las posibles causas que dieron origen a dos eventos de baja de OD registrados durante el verano del 2016. Al final de la sección fue incluido un análisis estadístico entre las corrientes de Melinka y Puyuhuapi por la importancia que tiene este régimen en el transporte de las propiedades físicas y químicas del agua de mar.

5.1. Variabilidad de la hipoxia/ventilación

En el total de series de tiempo de OD obtenidas en la zona de Melinka (Figura 34) y el fiordo Puyuhuapi (Figura 40 y 44), la hipoxia (OD menor a 2 mL/L y 30 % de saturación) fue registrada en la capa profunda, cercana al fondo, aunque no ocurrió en forma permanente (Figura 101 a y b), como era de esperar de acuerdo a lo descrito en la literatura para la zona (i.e. Silva y Vargas, 2014). Además, de estos registros de hipoxia profundos, también se registró un evento de aguas de bajo contenido de OD en la cercanía de la superficie (~7 m) en la zona de Melinka (Figura 36) y en el anclaje sur en Puyuhuapi (~30 m) (Figura 39). Debido a que ellos ocurrieron en diferentes estratos de profundidad (capa superficial v/s capa profunda), no están asociados a la presencia de una masa de agua única (ASAA o AESS), por lo tanto serán analizados por separado en la próximas secciones.

En la zona de Melinka el OD profundo mostró un ciclo estacional, con máximas concentraciones durante el invierno y la primavera, que fueron más altas que las registradas en Puyuhuapi (Figura 100a). La hipoxia en Melinka se registró de febrero a junio y a partir de ese mes los valores aumentaron, como resultado de un proceso de ventilación profunda de esta capa y que se extendió a toda la columna durante el invierno. En este mismo lugar los registros hidrográficos mostraron una columna de agua totalmente mezclada (Figura 22), de acuerdo al cálculo del parámetro de estratificación definido por Haralambidou (2010). Las mediciones hidrográficas se realizaron inmediatamente después del paso de un sistema atmosférico de baja presión con vientos predominantes del Noroeste (Figura 30). En general todas las variables medidas mostraron un comportamiento homogéneo desde la superficie hasta el fondo (Figura 22).

En el anclaje Puyuhuapi sur, los valores de OD fueron menores, y su fluctuación en profundidad se comportó de forma opuesta a los OD de Melinka. En Puyuhuapi sur, la hipoxia se extendió de abril a octubre y solo en los meses de marzo y noviembre, se registró una ventilación menor de esta zona con valores ligeramente superiores a los 2 mL/L. Al norte del fiordo igualmente la condición de hipoxia se mantuvo, aun siendo esta serie más somera que las anteriores (120 m). Sin embargo, a partir de agosto los valores se incrementaron llegando a sobrepasar levemente los 2 mL/L, para después nuevamente disminuir hacia la primavera. En este mismo lugar, a una profundidad aproximada (122 m), Pérez-Santos (2017), detectó un evento de ventilación similar al registrado este 2016. Los registros hidrográficos históricos, obtenido por mediciones esporádicas en los cruceros oceanográficos realizados en el fiordo Puyuhuapi, siempre han mostrado la hipoxia por debajo de los 100 m (Silva et al., 1997; Silva y Vargas, 2011; Schneider et al., 2014) y los resultados de los nuevos muestreos durante este proyecto también lo confirmaron (Figura 26 y 27). Sin embargo, este proceso no es permanente durante todo el año, lo cual solo

pudo ser detectado mediante las series temporales de OD registrada a este nivel de profundidad localizado por encima del umbral sur.

Debido a la similitud en el comportamiento de las series de Melinka y la del anclaje norte en Puyuhuapi, se realizó una regresión lineal para determinar la relación estadística entre ambas zonas, arrojando un valor de $r^2=0.37$ (Figura 100 b). Este resultado puso de manifiesto la clara conexión que existe entre la zona exterior de los fiordos representada en este caso por los datos de Melinka y el interior del fiordo Puyuhuapi. Aunque el valor estadístico fue bajo, se debe tener en cuenta que los equipos no estuvieron midiendo en el mismo nivel de profundidad y también la lejanía (150 km) entre ambos puntos de mediciones, con varios obstáculos topográficos entre ellos, ej., islas, canales, etc. La diferencia en la magnitud de los valores de OD puede ser explicada por el consumo que experimenta esta variable en su traslado desde las aguas oceánicas hacia el interior de los fiordos (Silva y Vargas, 2014).

Un análisis espectral en el tiempo del tipo ondeleta (Torrence and Compo, 1998) realizado a la serie de OD, reflejo el dominio del periodo sinóptico (4-16 días) en el mes de agosto para la serie de Melinka y del norte de Puyuhuapi (Figura 101). La mayor intensidad espectral se observó en el periodo de 16 días durante agosto 2016 en la serie de Melinka. Este nuevo resultado confirmó que el evento de ventilación observado en la capa intermedia del fiordo Puyuhuapi fue debido al aporte de aguas con mayor concentración de OD desde la zona exterior con influencia oceánica.

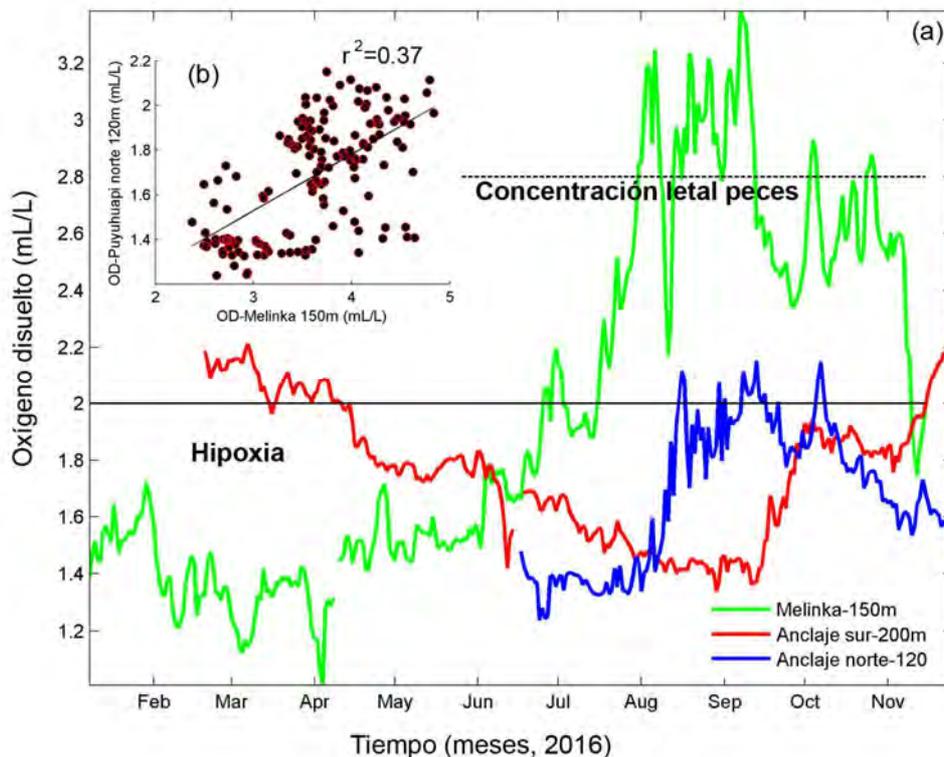


Figura 100. (a) Series de OD obtenida con MiniDOT en las aguas profundas del sector de Melinka y el fiordo Puyuhuapi. (b) Regresión lineal entre la serie de Melinka y el anclaje norte en Puyuhuapi.

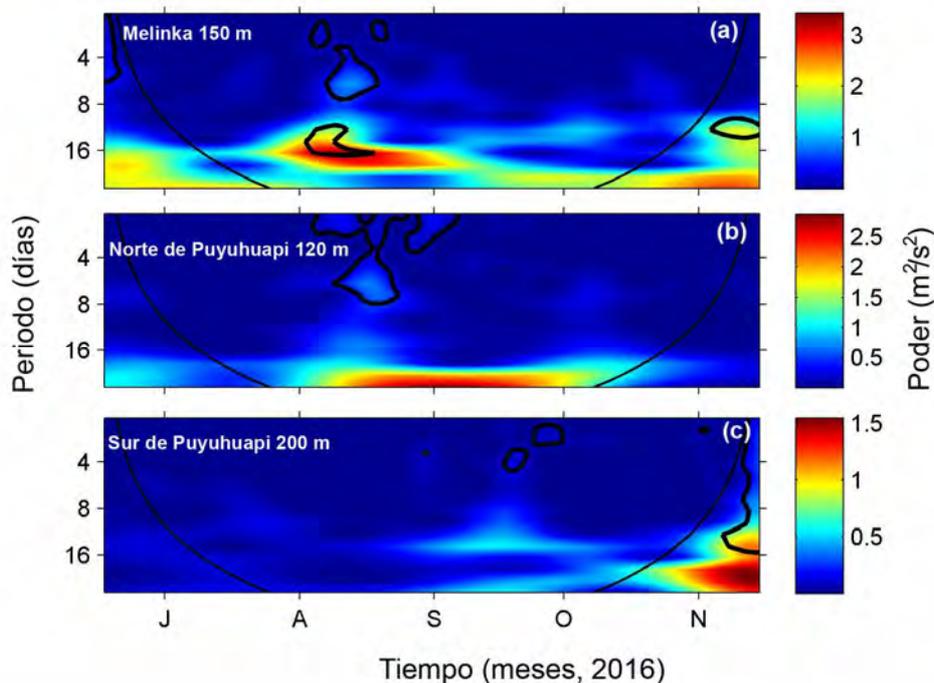


Figura 101. Análisis de ondeleta realizado a las series de OD ubicadas en los anclajes de (a) Melinka y del sector norte (b) y sur (c) del fiordo Puyuhuapi.

En la búsqueda del origen de la señal sinóptica en el OD y del posible mecanismo físico que causa la ventilación (incremento de OD por encima de 2 mL/L), se realizó un análisis similar a los datos de la presión atmosférica y a las componentes zonal y meridional del viento de la estación de Melinka (Figura 102). Los resultados mostraron que tanto en la presión atmosférica como en los vientos zonales (vientos del Oeste) la señal sinóptica se registro en agosto como en el OD y también en abril. Justo en el mes de abril la serie de tiempo de OD comienza su proceso de ascenso de valores. Tanto en abril como en agosto la señal obtenida en la presión atmosférica correspondió con el paso de sistema de bajas presiones (~1000 hPa) que al pasar por esta zona produjeron viento del Oeste fuertes (5-10 m/s, promedios diarios).

Siguiendo con el análisis, se extrajo la serie de corriente del ADCP referente a la profundidad de 120 metros, por tener esta la mejor calidad de datos cerca de la ubicación del MicroCat/MiniDOT (Figura 103 a y c, componente U y V). Se realizó el mismo análisis de ondeleta a la componente zonal y meridional de la corriente, observándose una señal sinóptica entre los 4-8 días desde febrero a abril en la componente zonal (Figura 103 b), pero no en agosto como se registro en el viento. Sin embargo, en la componente meridional se destacó la señal de 4 días en agosto, como en el OD y el viento zonal (Figura 103 d). En ambas series se observó una señal intensa en la banda de 20-30 días durante septiembre-noviembre para la componente zonal y adicionalmente para julio en la meridional. Ross et al., (2015), relacionó este periodo con la influencia de la oscilación atmosférica conocida Modo Baroclónico anular. Esta oscilación tuvo la capacidad de producir un movimiento en la pycnoclina (15-20 m) en la región del Baker. El evento fue estudiado usando datos del backscatter de un ADCP de 300 kHz. Sin embargo, se cree que dado la profundidad en que

ha sido registrado este comportamiento en Melinka, este comportamiento podría atribuirse al paso de ondas internas que cubrieron todo el espesor de la capa profunda desde los 100 m hasta los 140 m de profundidad, ayudando por tanto al transporte de aguas ventiladas hacia el interior de los fiordos.

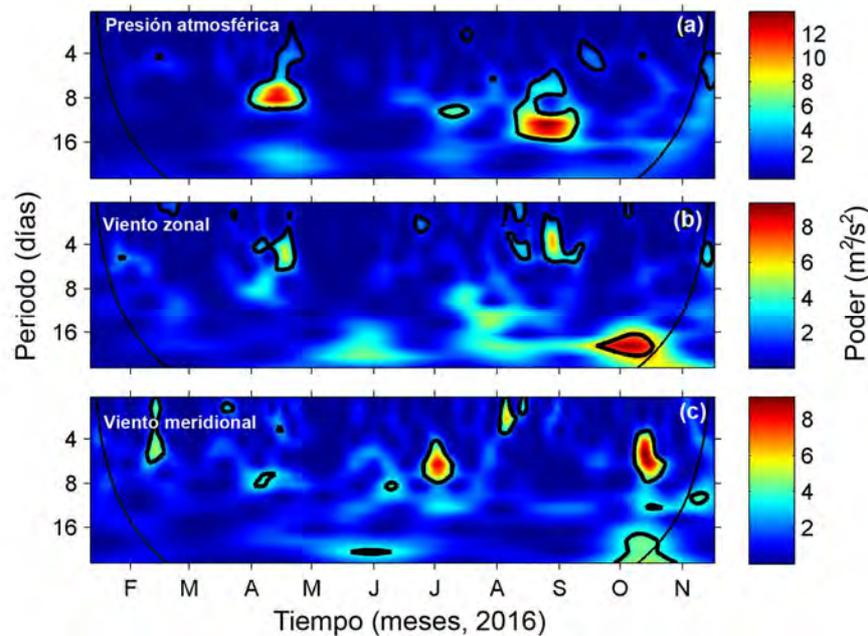


Figura 102. Análisis de ondeleta realizado a las series de (a) presión atmosférica, (b) viento zonal y (c) viento meridional obtenidos de la estación meteorológica instalada en la Isla de Melinka, en el periodo febrero-noviembre 2016.

El estudio del comportamiento de la hipoxia relacionado con las masas de aguas presentes en las zona de Melinka, arrojó que el 18.8% de sus registros se localizaron en la posición del AESS y solo el 0.2% en la posición del ASAA (Figura 104a). En esta zona la mayor cantidad de datos de OD se registraron por encima de la hipoxia, representando en total el 80%, de ellos, el AESS con 47% seguido de la ASAA con 33%. La relación lineal entre los registros temporales de la salinidad y el OD en este punto de muestreo tuvo una pendiente negativa con un alto valor estadístico de $r=-0.88$, estando entonces asociado los valores bajos de salinidad con OD altos y viceversa. Este resultado representa la respuesta a la ventilación o incremento del OD por la llegada de la masa de agua ASAA (Pérez-Santos et al., 2017).

Aunque el AESS ha sido siempre asociado a la hipoxia, esta masa de agua también registró valores de OD elevados, hasta los 4.5 mL/L, con un mínimo de 1.3 mL/L. En Silva y Vargas (2014), se menciona que esta masa de agua ingresa desde la zona oceánica hacia el Golfo de Corcovado con concentraciones de OD ~ 3 mL/L. Sin embargo, su registro temporal por mayor tiempo indicó que esta concentración en la zona exterior puede ser más alta.

En el interior de la Patagonia, en el nivel del fondo (anclaje sur en Puyuhuapi), los niveles de OD fueron más bajos que los registrados en Melinka. En este punto el 70% de los valores correspondientes a la hipoxia se situaron en el AESS y un 27.8 % en el ASAA (Figura 104). Por otro lado, solo 1.1 % de los valores de OD se registraron por encima de la

hipoxia, en ambas masas de agua. Es de esperar que a esta profundidad los valores de OD sean bajos debido a la disminución de sus concentraciones por el consumo y degradación de la materia orgánica en el recorrido que experimentan las aguas desde el océano exterior hacia el interior de los fiordos y canales (Silva y Vargas, 2014). Además, la baja ventilación del fiordo por la presencia de sus umbrales al sur y norte refuerzan la disminución del OD cerca del fondo (Schneider et al., 2014).

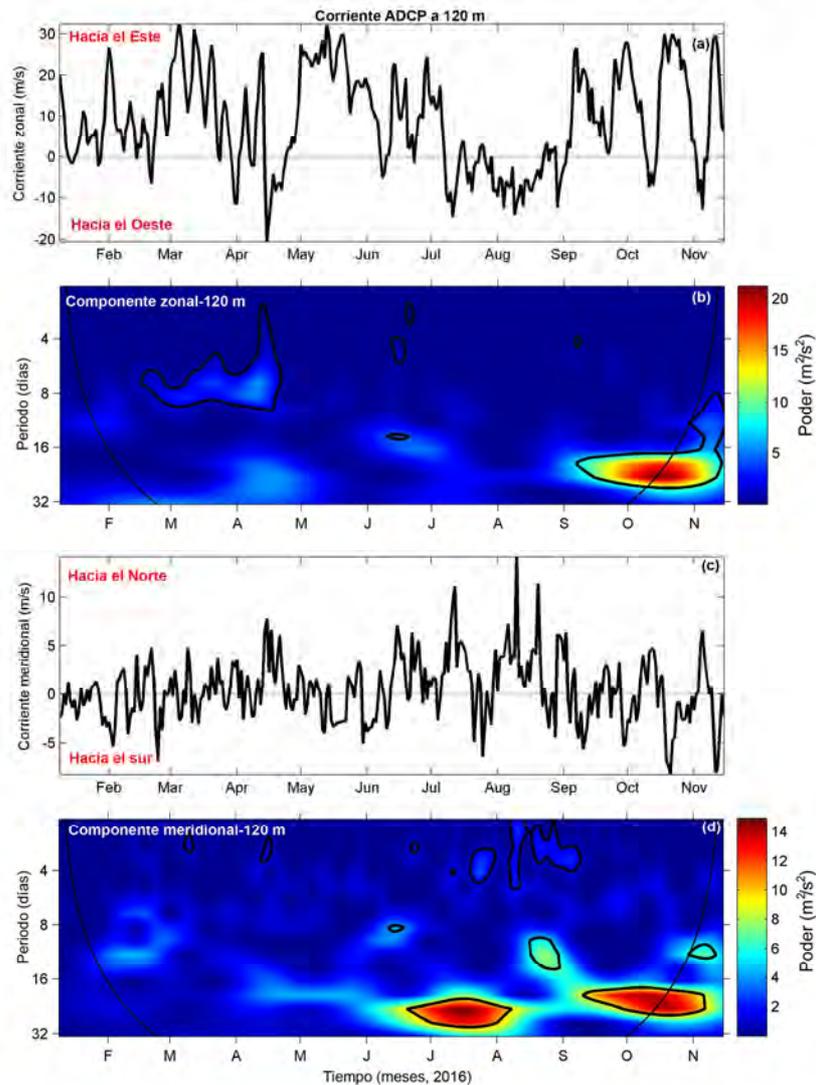


Figura 103. (a) Componente zonal y (c) meridional de la corriente obtenida del ADCP en el nivel de 120 metros. (b y d) Análisis de ondeleta realizado a la componente zonal y de la corriente en el anclaje de Melinka de febrero a noviembre 2016.

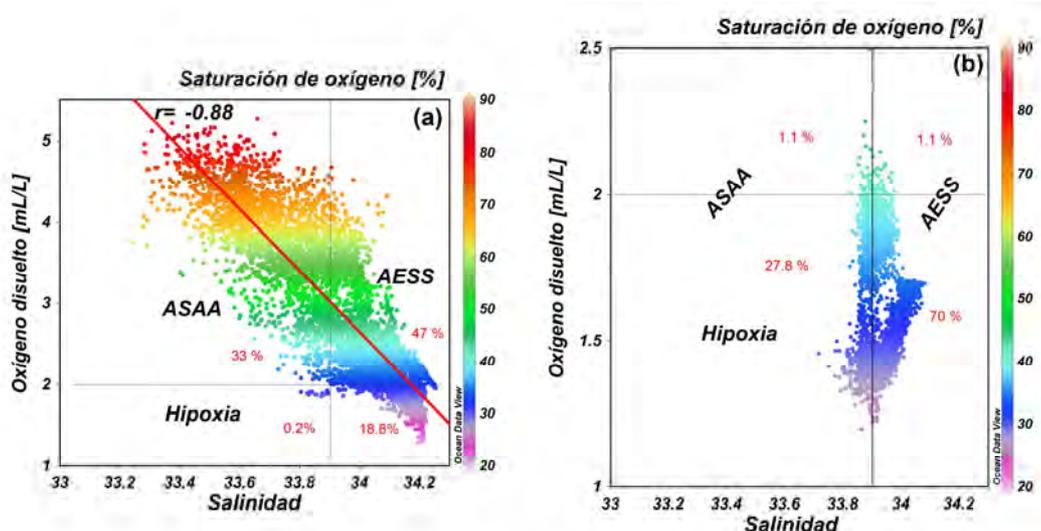


Figura 104. (a) Diagrama salinidad vs. OD y porcentaje de saturación obtenidos del MicroCat y MiniDOT ubicados en el nivel de fondo del anclaje de Melinka en el periodo enero-noviembre del 2016 y en (b) en el anclaje sur de Puyuhuapi durante junio-noviembre del 2016.

5.2. Eventos de baja de OD superficial en Melinka.

Para entender las causas que originaron el evento superficial de baja de OD en la región de Melinka, se analizaron los procesos oceanográficos que pudieron contribuir con este evento, descrito anteriormente en las figuras 36 y 37. Teniendo en cuenta los valores bajos de OD y altos de clorofila-a, las fechas del evento fueron del 16 al 30 de marzo del 2016.

El análisis de las condiciones del viento durante el mes marzo, mostró el predominio de los vientos del Sur debido a la influencia de los centros de altas presiones. La figura 105a muestra un ejemplo del comportamiento del viento satelital obtenido del producto ASCAT (<ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/MWF/L3/ASCAT/>, Bentamy et al., 2011) para el día 12 de marzo del 2016. Los vientos de Sur fueron fuertes en el todo el borde costero del archipiélago de las Guaitecas y la Isla de Chiloé. A lo largo de la costa Chilena continental, los vientos del Sur debido a la influencia del anticiclón o centro de altas presiones del Pacífico sur (Ancapichún y Garcés-Vargas, 2015; Schneider et al., 2017), producen transporte de Ekman hacia afuera de la costa que genera surgencia de aguas frías, ricas en nutrientes (Sobarzo et al., 2007; Daneri et al., 2007) produciendo altos valores de producción primaria y riqueza biológica (Daneri et al., 2007; Thiel et al., 2007).

Usando los datos de viento satelital se calculó el esfuerzo del viento y el transporte y bombeo de Ekman para los días del evento, de acuerdo a la metodología de Pérez-Santos et al., (2010). Los resultados mostraron valores intensos del esfuerzo del viento meridional a lo largo de la costa exterior desde los 40°-45° sur (ejemplo, Figura 105b, flechas color negro). Como resultado del esfuerzo del viento se produjo un transporte de Ekman hacia fuera de la costa (flechas color rojo) que disminuyó su magnitud hacia el océano. Unido al origen del transporte de Ekman que favoreció la surgencia costera, se produjo un bombeo de Ekman positivo (velocidad vertical ascendente) que también favoreció el afloramiento

costero en un sector ~200 km costa afuera (Figura 105b, área en colores positivos). La magnitud del bombeo de Ekman positivo favorable al afloramiento registrada en esos días fue similar a la reportada por Bravo et al., (2015) en la costa norte de Chile (~30° sur).

Por otro lado, se calculó el índice de afloramiento y el acumulado del transporte de Ekman usando esta vez los datos de la estación meteorológica instalada en Melinka (Figura 106). En general se observaron varios eventos de vientos del Sur que produjeron valores del esfuerzo del viento entre 0.02-0.05 Pascales (Figura 106a), originando índices de afloramientos negativos que representan el origen de la surgencia (Figura 106b). El cálculo del acumulado del transporte de Ekman fue mayormente negativo fortaleciendo el resultado del origen de la surgencia (Figura 106c).

El análisis de los vientos satelitales y de la estación meteorológica costera demostró que durante el periodo del evento de baja de OD superficial, ocurrió afloramiento costero por transporte y bombeo de Ekman (inyectando nutrientes) en el borde costero exterior de la Patagonia norte, que pudo influenciar la zona donde estaba ubicado el anclaje de Melinka. Los altos valores de clorofila-a detectados por la sonda YSI-6600 fueron la primera evidencia que la alta concentración de algas pudo generar un gran consumo de OD. Otras de las variables que demuestran la ocurrencia de la surgencia costera es la temperatura superficial del mar (TSM) extraídas desde satélites. El promedio mensual de la TSM para los meses del verano 2016, mostró las temperaturas más bajas cerca de la costa exterior de Chiloé, como típicamente ocurre durante una surgencia (Sobarzo et al., 2007), evidenciando que la surgencia costera fue un proceso que ocurrió durante este verano en la zona cercana a nuestro área de estudio (Figura 107).

En la dinámica del evento se observó que el momento de los valores mínimos de OD y máximos de clorofila-a ocurrieron durante el periodo de sicigia de la marea (Figura 108). Durante esos días (18 al 26 de marzo 2016) se reportaron las amplitudes más altas del OD (4-5 mL/L) y la clorofila-a (120-130 ug/L). La marea semidiurna dominó el comportamiento de todas variables antes y después del evento, permitiendo la ventilación de la zona durante el momento de llenante de marea (Figura 108, ejemplo línea E1). Durante este tiempo los valores de OD se incrementaron entre 4-8 m/l (5.7-11.4 mg/l) y la clorofila disminuyó. Mientras que, durante el vaciante de marea los valores de OD bajaron entre 1-3 ml/l (1.4-4.3 mg/l), concentraciones consideradas letales para la vida de los peces (Figura 109, ejemplo línea E2). La relación lineal entre la clorofila-a y el OD registró un valor de $r^2=0.29$, demostrando que los valores de clorofila-a alta estuvieron acompañados de registros de OD bajos y viceversa (Figura 108d). Aunque se registraron dos máximos y mínimos diarios de acuerdo a la marea semidiurna, la relación estadística entre ambas variables fue baja. En el informe de avance se reportó una relación estadística alta entre la marea y el OD. Sin embargo, usando la serie de marea de un puesto de nivel fijo como el de Melinka ese resultado cambió.

Finalmente podemos resumir que durante la ocurrencia de este evento de mínima de OD superficial el transporte y bombeo de Ekman favorecieron el afloramiento de aguas ricas en nutrientes en la zona exterior de la Patagonia originando un evento de floración de algas que supuestamente por las corrientes arriba a nuestro sitio de muestreo (anclaje), siendo detectado su evolución temporal por los instrumentos superficiales. Durante la ocurrencia del bloom la marea de sicigia participo en el transporte de concentraciones bajas/altas de OD y clorofila-a entre las aguas interiores y exteriores de este sector. El no contar con información de corrientes marinas en este punto imposibilitó distinguir la

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

dirección desde donde llegaron los mínimos de OD. Por otro lado, se utilizó información satelital de corrientes superficiales obtenidas de la base de datos de Aviso (<ftp://ftp.aviso.oceanobs.com/>), observándose en general una circulación costera hacia Norte que se extendió en todo el dominio analizado (39°-47° S). Para la totalidad de los días que coincidieron con el evento de florecimiento de algas la corriente en sentido Norte se desvió hacia el Noreste al encontrarse con el obstáculo que representa la Isla Guafo, favoreciendo así la entrada de nutrientes generados durante el afloramiento costero exterior (Anexo 14). Entonces, los valores de hipoxia superficial registrados se relacionaron con un evento de floración algas y no con el ascenso de la masa de agua AESS, pues en este nivel durante ese tiempo el Agua estuarina salada domino esa capa de agua (Figura 36).

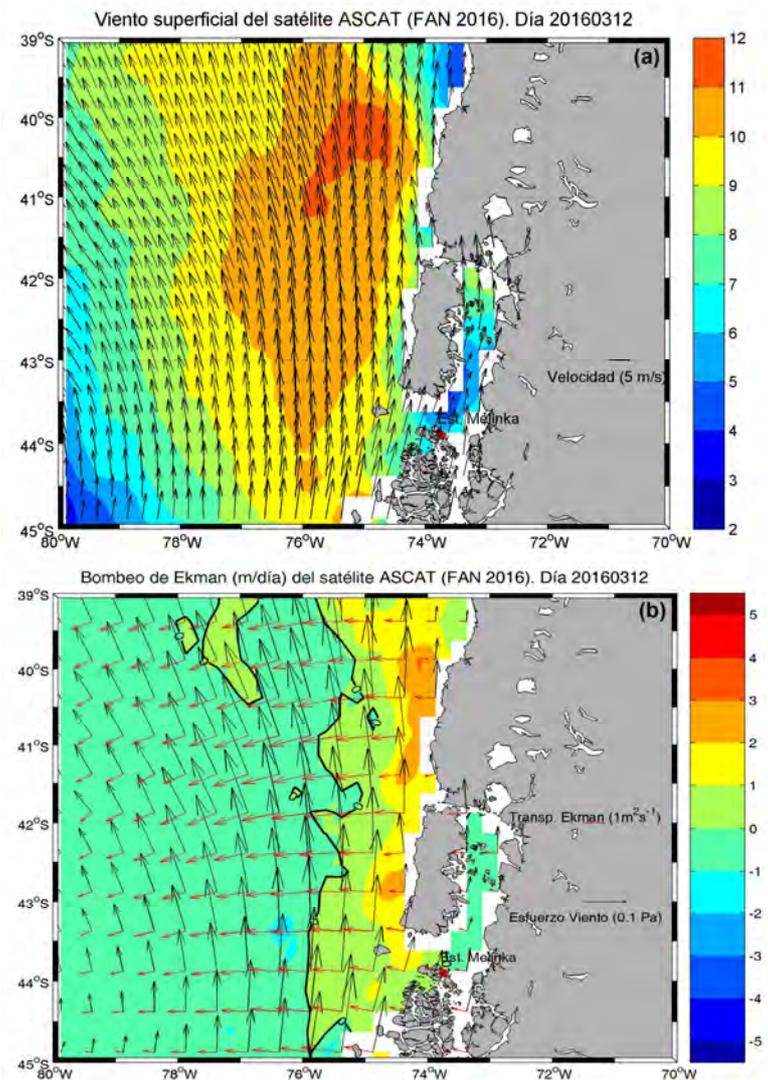


Figura 105. (a) Comportamiento del viento satelital superficial obtenido del producto ASCAT. (b) Esfuerzo del viento (flechas negras), transporte de Ekman (flechas rojas) y bombeo de Ekman (colores) derivados del viento satelital. Ambos resultados se presentan para el 12 de marzo 2016.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

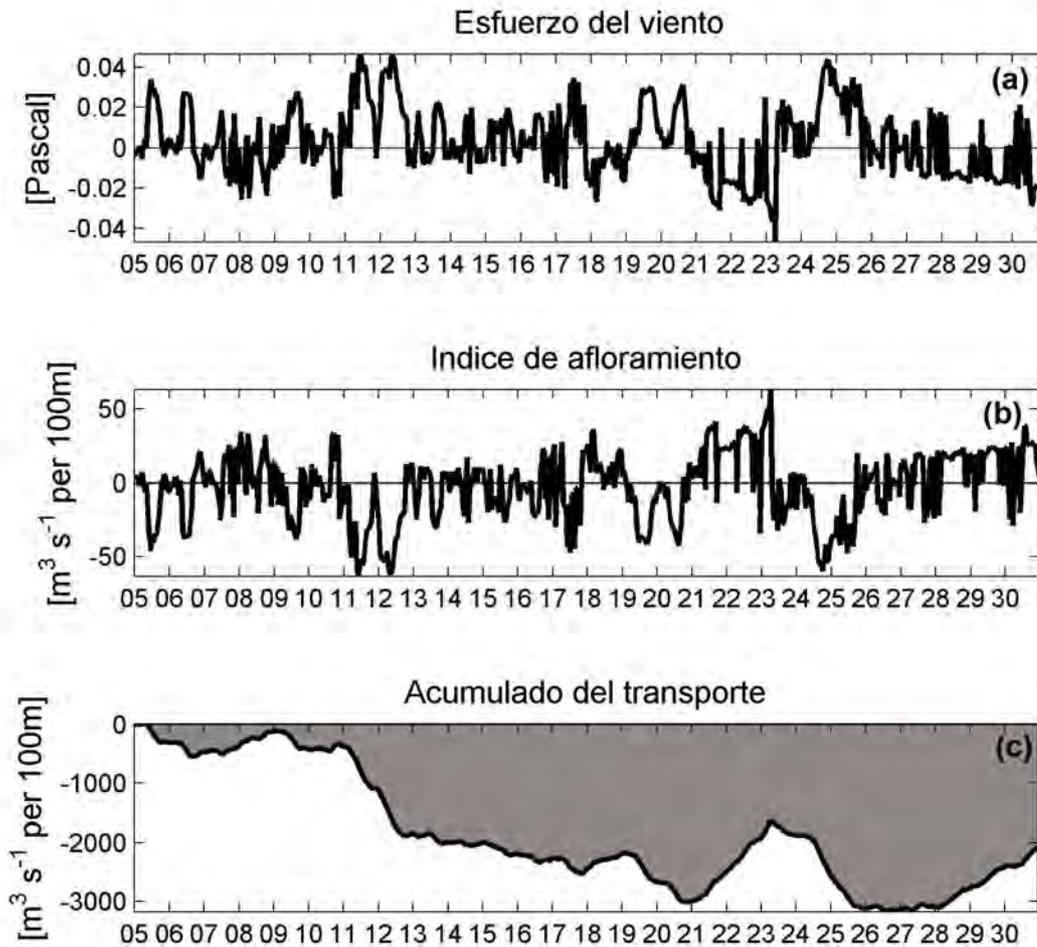


Figura 106. (a) Esfuerzo del viento, (b) Índice de afloramiento donde los valores negativos son favorables a la surgencia y los positivos a hundimiento. (c) Acumulado del transporte de Ekman, donde igualmente los valores negativos son favorables a la surgencia costera. Registros horarios de la estación meteorológica instalada en Melinka.

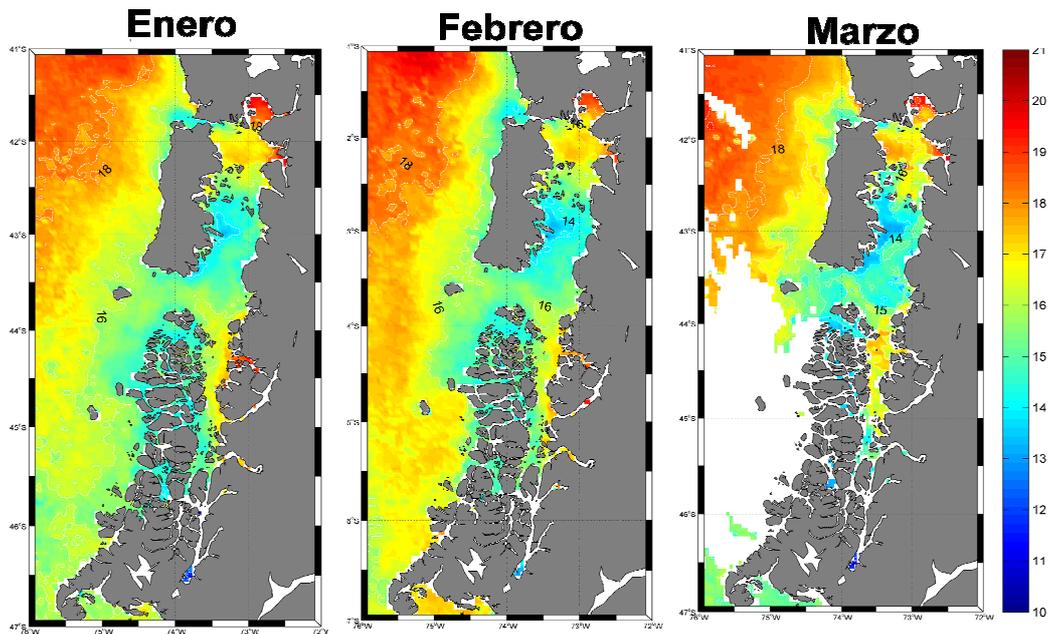


Figura 107. Imágenes del promedio mensual de la temperatura superficial del mar, obtenidas de Modis-Aqua durante el verano del 2016. Cortesía de Elías Pinilla, IFOP-Castro.

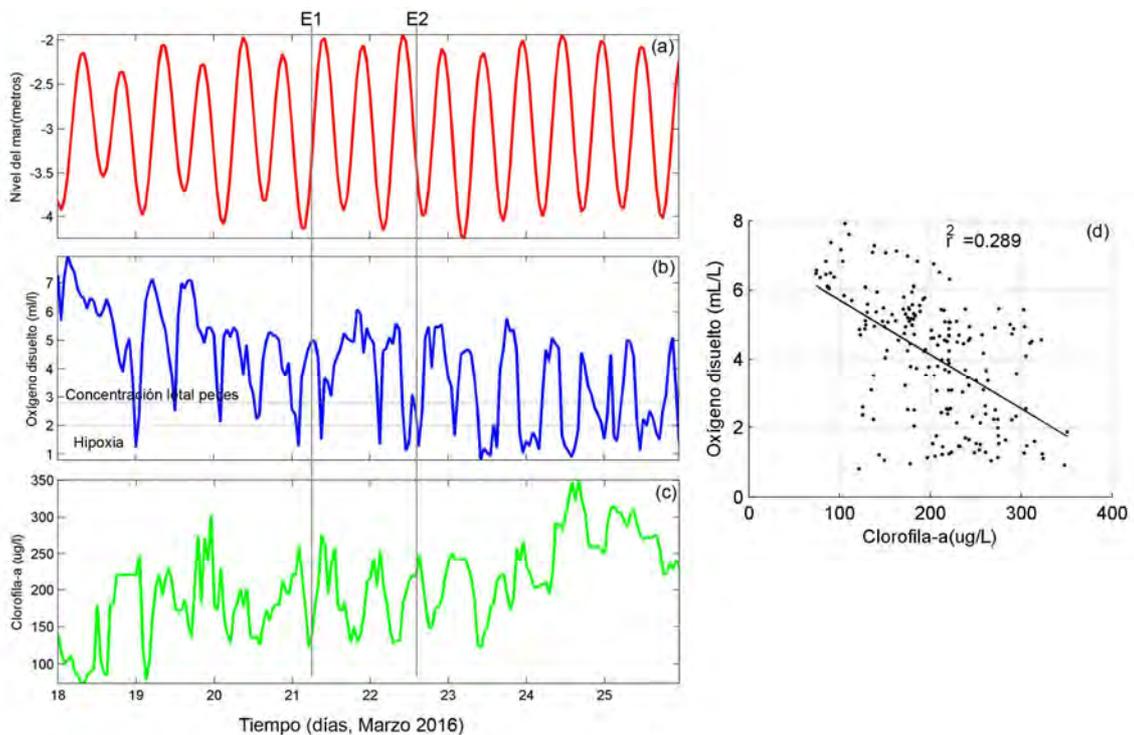


Figura 108. (a) Nivel del mar obtenido del puesto de nivel del SHOA instalado en el puerto de Melinka. (b y c) Serie de OD y clorofila-a de la sonda YSI a ~7 m. (d) Regresión lineal entre los datos de OD y clorofila-a para los días que se muestran en el gráfico.

5.3. Evento de baja de OD sub-superficial en el sur de Puyuhuapi.

Durante el mes de marzo y mediados de abril se registro una baja de OD en los sensores localizados a ~30 m de la superficie en la zona sur del fiordo Puyuhuapi (Figura 109). Los valores mínimos bordearon los 2.8 mL/L (4 mg/L), siendo esta la concentración letal para peces. Sin embargo, la serie de la superficie mostró un comportamiento contrario, destacando un incremento del OD hasta 7 mL/L. Este resultado indicó que el evento de baja de OD no cubrió toda la columna de agua superficial (0-30 m). Es de esperar que la alta estratificación originada en primavera y verano por el aporte de aguas dulces (Schneider et al., 2014) separe la capa superficial (0-10 m) de la sub-superficial (10-50 m), debilitando el intercambio de OD entre el fiordo y la atmósfera en esa parte de la columna de agua.

Los registros de clorofila-a y de OD de la boya oceanográfica instalada en el norte del fiordo, mostraron un evento de florecimiento de algas a mediados de febrero, cuyos valores altos se extendieron hasta finales de marzo. El momento máximo del florecimiento se extendió desde el día 19 de febrero 2016 a las 15: horas hasta el 21 de febrero 2016 a las 13:00. Durante el momento del máximo de clorofila-a, el OD y la saturación fueron altos en la boya (Figura 110a y b). Los perfiles de fluorescencia realizados con CTD en la boya (Anclaje norte) y en el anclaje sur, mostraron altos valores de fluorescencia (20-30 mg/m³) entre los 5-10 m en una capa que se extendió hasta los 30 m (Figura 110d y e), destacando de forma relativa la alta abundancia de algas presentes producto del florecimiento.

Al término del evento de florecimiento las concentraciones de OD disminuyeron en la superficie, tanto en la boya como en el anclaje sur a 5 m (Figura 110a y b), demostrando la conexión entre ambos puntos dentro del mismo fiordo. Sin embargo, en la serie de 30 m los valores de OD continuaron disminuyendo hasta llegar al límite de la concentración letal para peces. Aunque la serie de 5 m de nuevo aumento sus valores debido a su mayor interacción con la atmósfera, a los 30 m los valores continuaron bajos hasta principios de abril. Es esperar que la alta concentración de algas incrementara la cantidad de materia orgánica y el proceso de remineralización en la capa sub-superficial haya contribuido aún más a la disminución del OD (Silva, 2006). El fiordo Puyuhuapi ha mostrado altos valores de producción primaria (533 g C m⁻² y⁻¹) comparable con otros fiordos de la costa sur de British Columbia y el sistema de afloramiento de Concepción, Chile (Daneri et al., 2012).

Finalmente se puede resumir que el evento de baja de OD detectado en el sur del fiordo Puyuhuapi, en la capa sub-superficial (30 m) fue debido a la ocurrencia de un florecimiento de algas durante el verano 2016 (febrero). Los registros temporales de OD (Figura 53x1) y los obtenidos con CTD en las diferentes estaciones del año 2016 (Figura 25), descartan la posibilidad de que el evento de baja de OD haya sido producido por el ascenso de las aguas con bajo OD desde la capa hipoxica profunda, debajo de los 100 metros en el fiordo. Por otro lado se confirma, que la masa de agua AESS no tuvo relación con el origen esta baja de OD, pues en esa capa estuvo dominada por las aguas estuarinas saladas (Figura 30). Es importante destacar que el fiordo Puyuhuapi estuvo en descanso sanitario (sin actividad productiva) desde abril a junio del 2016, por lo que no fue posible poder asociar esta baja de OD con una eventual mortalidad de salmones en las empresas que operan en la región (Figura 99).

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

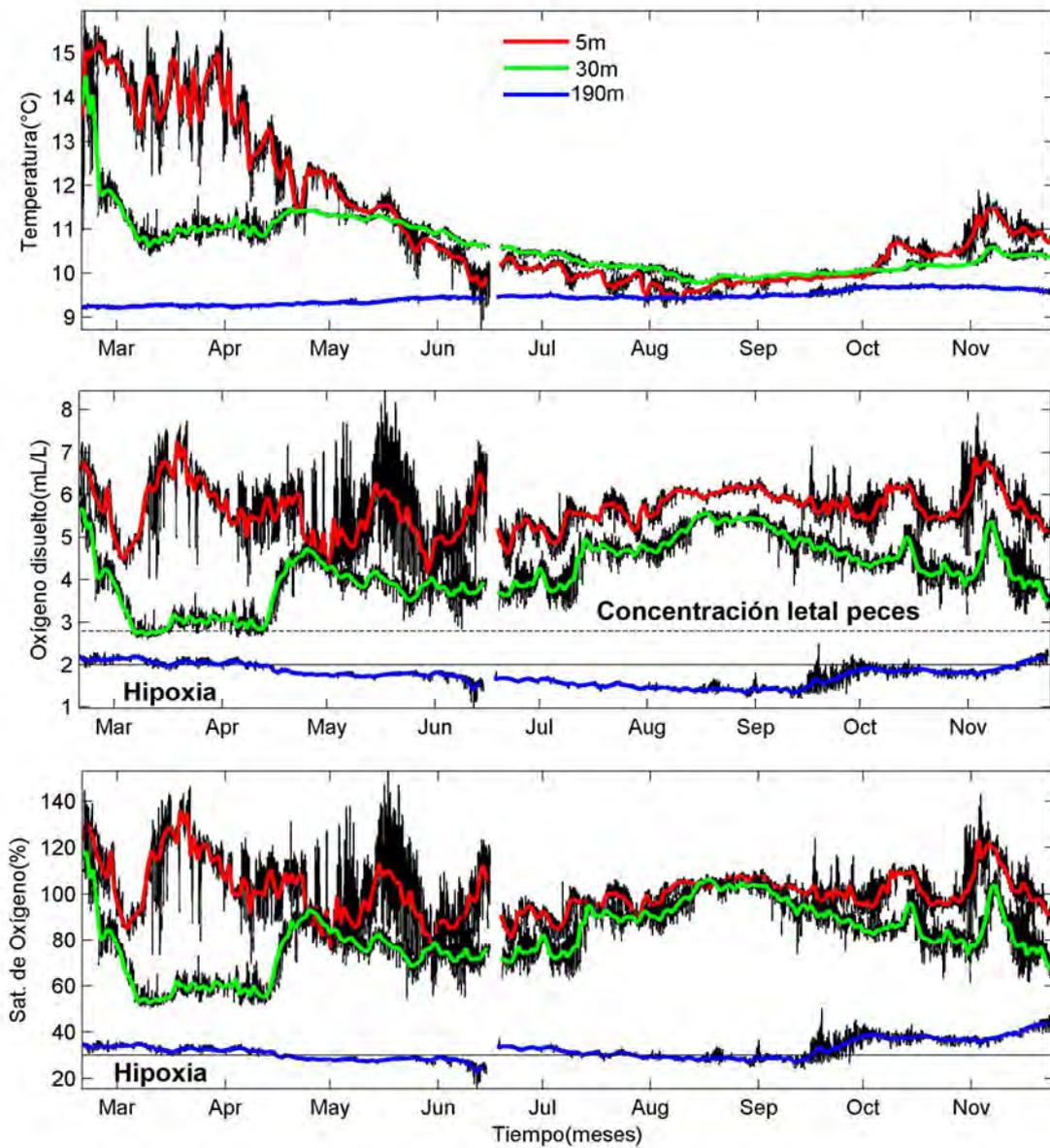


Figura 109. Series temporales de la temperatura del agua, OD y porcentaje de saturación de OD obtenidos por equipos MiniDOTs en el sur del fiordo Puyuhuapi en el periodo febrero-noviembre del 2016.

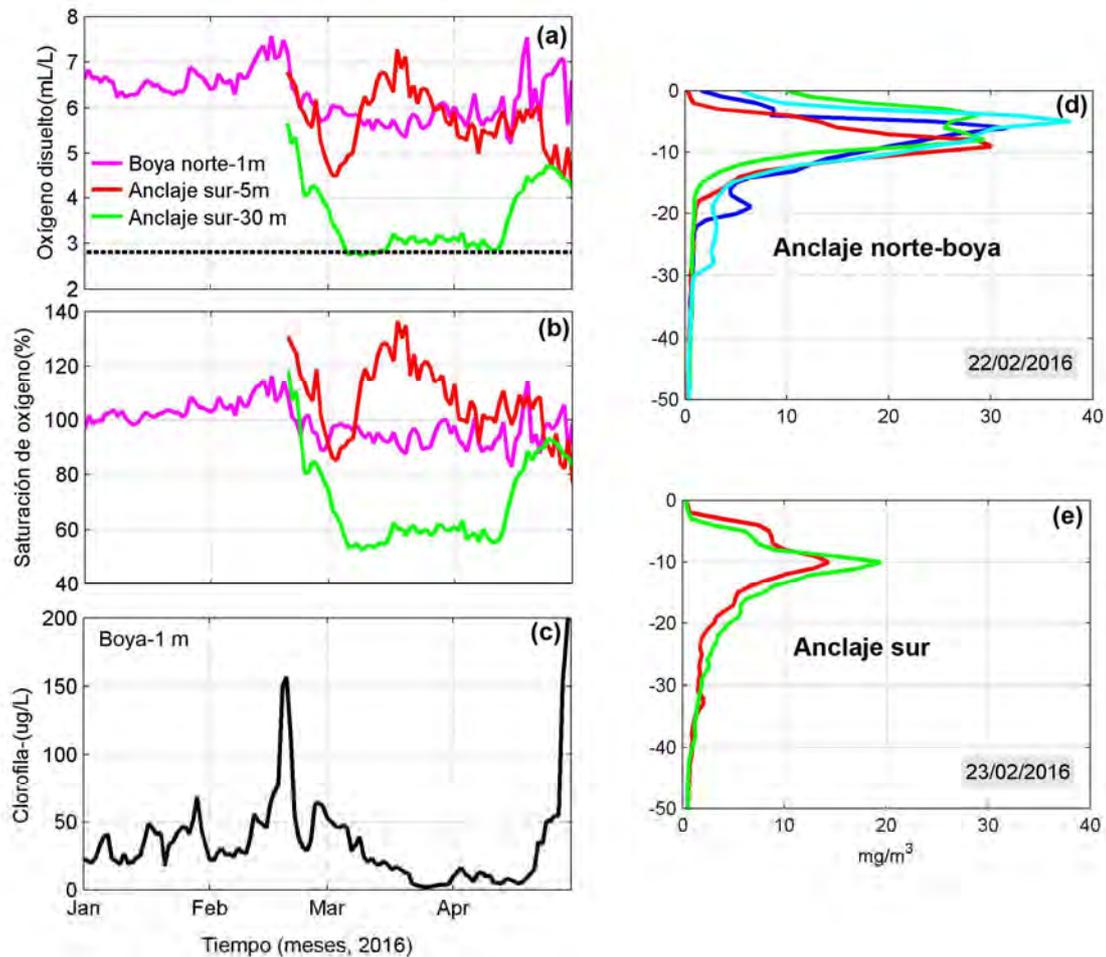


Figura 110. (a, b y c) Series de OD, porcentaje de saturación y clorofila-a obtenidas en la boya y en el anclaje sur en el fiordo Puyuhuapi de enero a abril 2016. (d y e) Perfiles de fluorescencia obtenidos con CTD en l anclaje norte y sur durante febrero 2016.

5.4. Relación entre las corrientes de Melinka y Puyuhuapi.

En la zona de estudio las corrientes mostraron ser muy intensas en Melinka superando los 50 cm/s en la zona bajo los 100 m de profundidad, estas corrientes mostraron estar bien alineadas con la costa en el sentido Este-Oeste. En este sector, las corrientes a lo largo mostraron el desarrollo de pulsos con valores negativos (hacia el océano) y en otras ocasiones fueron positivas (se dirigen hacia el interior, canal Moraleda). Al efectuar una comparación (en el dominio del tiempo) entre las corrientes de Melinka y las corrientes a lo largo de Puyuhuapi se pudo apreciar que los intensos periodos negativos y positivos observados en Melinka no son distinguibles en la zona de Puyuhuapi Norte (en el centro del fiordo). Esto sugiere que las corrientes en el sector medio del fiordo Puyuhuapi no parecen responder a los intensos flujos y contra-flujos que se presentan en Melinka (Figura 111). De hecho las corrientes medias de Puyuhuapi Norte indican que las corrientes del sector se

dirigen hacia la cabeza del fiordo, en contra de lo que se espera observar en un ambiente dominado por el flujo estuarino (Figura 83).

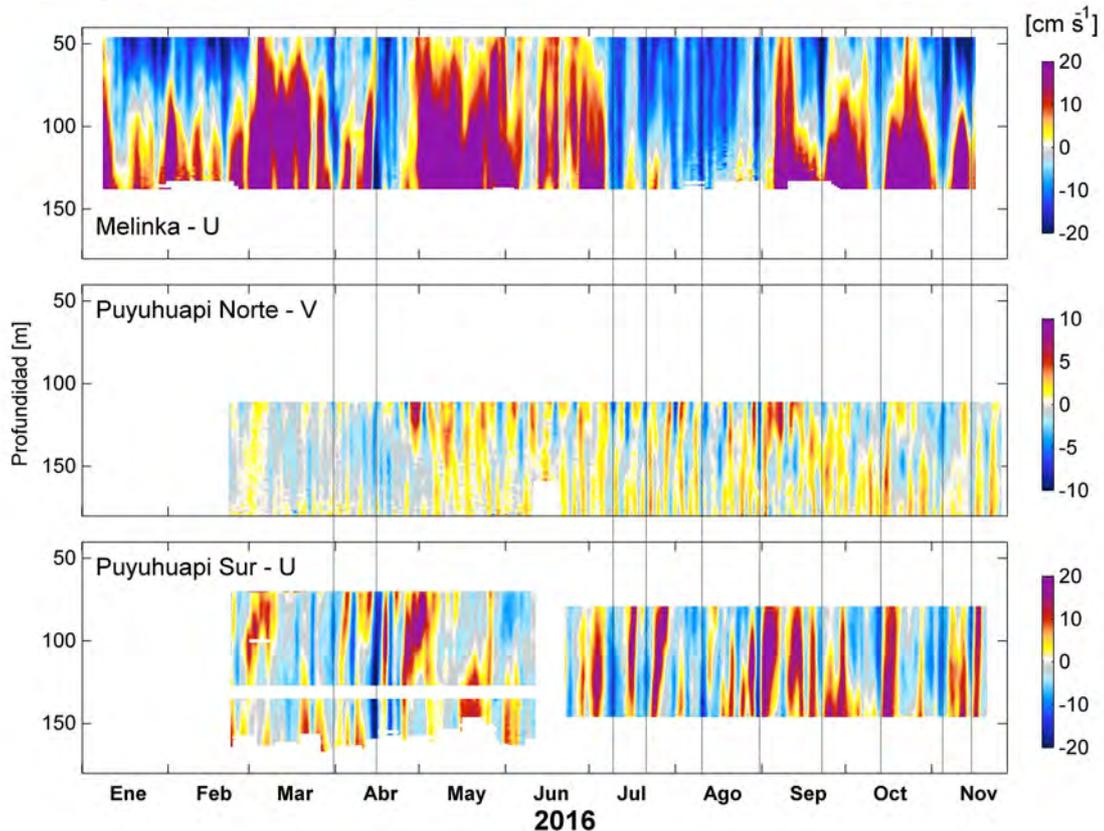


Figura 111. Corrientes de máxima intensidad en la zona de Melinka, Puyuhuapi Norte y Puyuhuapi Sur. Las líneas negras se han dibujado como referencias.

Al observar la consistencia del flujo a lo largo medido en Melinka, con las corrientes registradas en Puyuhuapi Sur, se pudo observar que por un lado las corrientes del sector sur del fiordo son más intensas y de magnitud más concordante con Melinka, que con el patrón de corrientes al interior del fiordo. En Melinka eventos hacia el interior del canal Moraleda y hacia el interior de Puyuhuapi son positivos, mientras que las corrientes negativas indican corrientes saliendo tanto de Melinka como de Puyuhuapi. En la figura 111 (líneas verticales) se han marcado algunos eventos de salida como referencias, pero cabe destacar que las corrientes de Melinka para eventos de baja frecuencia parecen estar más conectados entre Melinka y Puyuhuapi Sur, que entre Melinka y el interior del fiordo. Este patrón sugiere que las corrientes penetran por Melinka hacia el Moraleda, luego poseen grandes interferencias geográficas que no permiten una conexión directa entre el sector Moraleda con el interior de Puyuhuapi. Sin embargo, el flujo predominante penetra por el lado sur del fiordo y se dirige hacia la cabeza en contra del flujo estuarino. El patrón sugerido debe ser contrastado con información complementaria de corrientes en el sector y se espera sean parte de estudios de continuidad del presente trabajo.

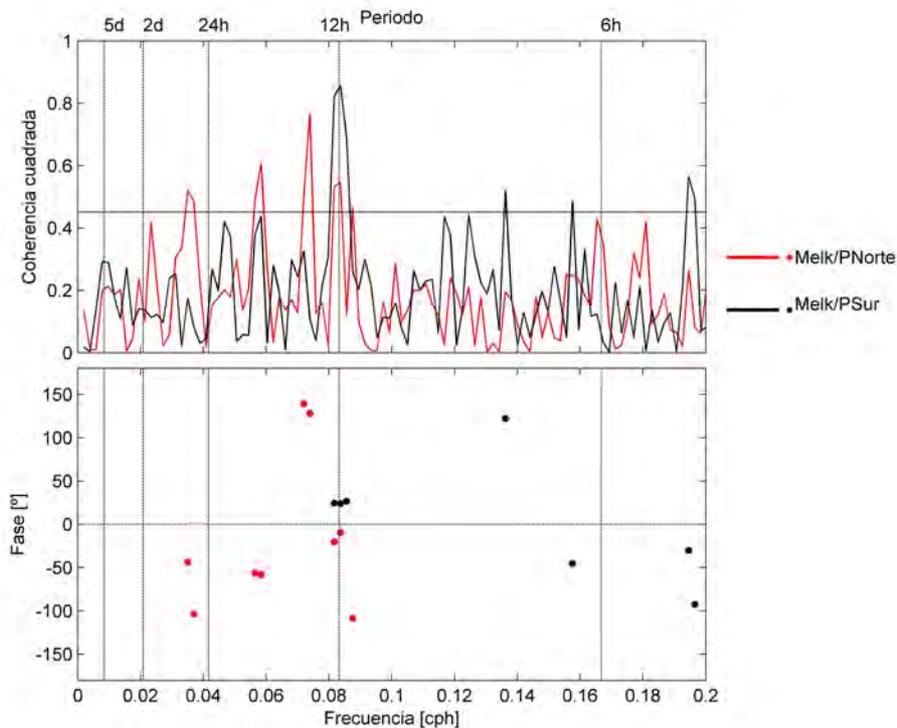


Figura 112. Espectros de coherencia cuadrada y fase entre las corrientes a lo largo medidas en Melinka y Puyuhuapi Norte (Melk/ P Norte) y entre Melinka y Puyuhuapi Sur (Melk/ P Sur). El nivel de confianza mostrado en el espectro de coherencia es del 95%, solo las fases con coherencias mayores al 95% de confianza han sido graficadas.

Una forma de estimar el grado de relación entre las variables en el dominio de la frecuencia es el análisis de espectros de coherencia y fase (Figura 112). Se realizó este análisis con corrientes a lo largo en los tres sectores, usando la información de las corrientes a 120 m de profundidad mostradas en la figura 111. El espectro de coherencias indica que existen oscilaciones altamente consistentes en ambos sectores, siendo el más evidente el que ocurren en las oscilaciones semi-diurnas donde el grado de relación entre Melinka y las corrientes de Puyuhuapi Sur fue del orden de 0.8 de coherencia cuadrada cuantificando este grado de concordancia antes indicado. El grado de relación entre las corrientes de Melinka y las del interior del fiordo fue significativamente menor (c.a. 0.55), levemente mayor a la confianza del 95%, indicando el menor grado de relación entre las variables. Los espectros de fase significativa, indican que en esta frecuencia (semi-diurna) las corrientes están prácticamente en fase y es posible que la marea sea un forzante que contribuye en la consistencia del flujo a lo largo de esta región.

En la zona de Melinka, la máxima correlación obtenida fue de 0.35 a 120 m de profundidad, asociado al rezago de 2 días para la componente U. Mientras, que a los 80 m se observó un similar rezago, pero un tanto más baja (Anexo 15). Este resultado sugiere que oscilaciones sub-inerciales de la presión atmosférica pueden forzar oscilaciones sub-inerciales en las corrientes a lo largo del canal del Guafo en un lapso de 2 días en las corrientes profundas, por tanto es posible que las oscilaciones de baja frecuencia de las corrientes profundas haya sido forzado por oscilaciones del campo de presión atmosférica

en la zona. Los valores más altos de correlación se registraron en Puyuhuapi sur con 0.5 en la componente U a 120 m, y de 0.32 a 80 m, igualmente en la corriente U (Anexo 16). En este lugar el rezago fue de 1 día y las series se de-correlacionan más rápido que en Melinka, indicando la influencia de otros procesos que necesitan mayor estudio. En Puyuhuapi norte se registraron los valores más bajos de correlación entre 0.2-0.3, con un rezago de 3 días para la corriente U y de 2 días para la V (Anexo 17). Los datos de corrientes marinas de obtenidas en este lugar, mostraron corrientes U más débiles que las V, debido a la orientación del canal en este punto (Figura 93). Sin embargo, el rezago de ambas componentes fue similar al de Melinka, indicando la conexión de entre estas dos zonas y su dependencia con los procesos atmosféricos regionales.

6. CONCLUSIONES

1. Los registros hidrográficos alrededor del anclaje ubicado en el suroeste del golfo de Corcovado (zona de Melinka) y la transecta realizada desde ese punto hacia la costa permitieron conocer el comportamiento estacional de las masas de agua y su desplazamiento vertical en esta zona. Durante el verano, otoño y primavera se detectó la presencia de ASAAM, ASAA y AESS. Mientras, en invierno se registró una columna de agua mezclada dominada totalmente por el ASAA. La presencia del Agua estuarina salada fue débil cubriendo solo los primeros metros de la superficie durante el verano. En invierno y primavera no se registró hipoxia en toda la columna de agua ($OD < 2$ mL/L), mientras que en verano y otoño la hipoxia se localizó por debajo de los 150 m con valores de OD entre 1-2 mL/L, concordante con la presencia del AESS. Durante el período de mediciones, no se registro ascenso de aguas hipóxicas en la transecta cerca de la costa. La clorofila-a fue alta en verano (~ 70 mg/m³) y primavera (~ 250 mg/m³), en los primeros 50 metros de la columna de agua. Durante el invierno y el otoño no se observó máximo de clorofila-a. En general se observó una estacionalidad bien marcada en todas las variables analizadas (temperatura del agua, salinidad, OD, clorofila-a y nutrientes).
2. En el fiordo Puyuhuapi también se registraron las mismas masas de agua (ASAAM, ASAA y el AESS). Sin embargo, el Agua estuarina salada se presentó en mayor proporción, abarcando los primeros 10 m de la columna de agua, sobre todo en el sector norte del fiordo, que está más cerca de la desembocadura del río Cisnes. La hipoxia se observó en la capa profunda de todas las estaciones y fue más marcada en la zona norte, con mínimos cercanos a 1 mL/L por debajo de los 100-120 m y asociada a la presencia de el AESS. Los perfiles de clorofila-a mostraron altos valores en todas las estaciones del año muestreadas (10-50 mg/m³), registrándose en el norte se los máximos más elevados.
3. Los nutrientes medidos en Puyuhuapi; tanto en la estación anclaje norte y estación anclaje sur, mostraron una distribución espacio-temporal bastante similar, la que en general fue caracterizada por una distribución de dos capas. En esta distribución, la de la entrada de agua dulce provoca bajas concentraciones de nitrato/fosfato y altas de ácido silícico en la capa superficial. En profundidad la influencia de la entrada de aguas oceánicas al fiordo aumenta las concentraciones de todos los nutrientes, excepto de la concentración de nitrito cuyos mayores valores se obtienen principalmente en los primeros metros de la columna de agua donde se concentra la mayor actividad fitoplanctónica. En la estación de muestreo de Melinka la columna de agua no presentó

- influencia de agua dulce, por lo tanto los bajos valores medidos en superficie especialmente dentro de la estación de primavera-verano, podrían estar relacionados con el consumo de nutrientes por parte de la comunidad fitoplanctónica. En invierno todos los nutrientes evidenciaron el efecto de la mezcla de la columna de agua, presentado concentraciones cuasi homogéneas.
4. La estación meteorológica instalada en la isla de Melinka destacó el predominio de los vientos de componente Oeste y del Noroeste, seguido de los vientos del Norte y el Sur. Los vientos del Sur, estuvieron relacionados con el paso de los sistemas de altas presiones, que fueron más frecuentes durante el verano y los del Norte con el paso de las bajas presiones. La velocidad máxima fue de 14.4 m/s con una racha de 23.2 m/s reportada en la dirección Oeste.
 5. En la estación meteorológica instalada en la isla Magdalena desde abril del 2014, los vientos del Oeste predominaron con un 36 % del total de casos. A continuación, se destacaron las direcciones Norte-Noreste y Sur-Suroeste, coincidiendo con la dirección del eje del fiordo Puyuhuapi.
 6. En el estudio del régimen de marea en los tres sitios de muestreos se registro el comportamiento de la marea mixta semidiurna con el dominio de la componente lunar principal semidiurna (M_2) que mostró su mayor amplitud en el puesto de marea ubicado al norte de Puyuhuapi, en el muelle de la isla Magdalena, con 0.86 metros.
 7. La serie temporal de la temperatura, la salinidad y el OD obtenida cerca del fondo (~150 m) en la zona de Melinka permitió detectar que el proceso de hipoxia profunda no fue permanente en todo el año. Durante la primavera y el otoño la presencia del AESS coincidió con la capa hipoxica, pero a partir de mayo la salinidad comenzó a disminuir y el OD a aumentar como resultado de la llegada del ASAA. El OD a ~150 m alcanzó su máximo en septiembre (5 mL/L). En este mismo mes se alcanzaron las temperaturas más altas (10.2° C). Aunque el AESS ha sido siempre asociado a la hipoxia, esta masa de agua también registró valores de OD por encima de los 2 mL/L, pero no superando los 3 mL/L, proveniente de la zona oceánica exterior.
 8. La serie temporal de la temperatura, la salinidad y el OD obtenida cerca del fondo en el sur (~200 m) y en el norte (220 m) de Puyuhuapi mostraron temperaturas del agua más bajas que en Melinka, entre 9.2 y 9.6° C, registrando un ligero incremento de sus valores desde el invierno a la primavera. El AESS dominó esta capa profunda de la columna de agua Sin embargo, a finales de septiembre fue reemplazada por el ASAA (serie del sur). La hipoxia se registró durante otoño e invierno, pero en verano y primavera el OD aumentó por sobre el nivel de hipoxia, producto de la entrada de agua levemente más oxigenada, provocando la ventilación de ella. Una serie de OD obtenida a los 120 metros de profundidad registro un comportamiento similar a la serie de OD de Melinka a 150 m, demostrando la conexión entre las zonas y la importancia de la ventilación profunda en la Patagonia norte.
 9. En la búsqueda de los procesos que pudieran haber participado en el incremento del OD profundo en la zona de Melinka y su ingreso hacia el interior del fiordo Puyuhuapi, se encontró que los vientos jugaron un papel importante. Por otro lado, las ondas internas profundas con periodos entre 20-30 días, observadas en los datos de corrientes marinas, podrían estar contribuyendo en el transporte de concentraciones altas de OD, desde el océano hacia el fiordo, impidiendo que la hipoxia sea permanente. Un evento de ventilación profunda similar fue registrado el 2015 en Puyuhuapi, indicando

- entonces que este proceso se puede repetir anualmente. Sin embargo, se necesitan series más largas para confirmar esta hipótesis.
10. En la zona de Melinka, se registró un evento de baja de OD en la superficie (~7 m) en los días del 16 al 30 de marzo del 2016. Durante la ocurrencia de este evento el viento presente favoreció el transporte y bombeo de Ekman provocando el afloramiento de aguas costeras ricas en nutrientes de la zona oceánica exterior, originando un evento de floración de micro algas, las que supuestamente por las corrientes arribaron al sitio de muestreo. Los valores de OD disminuyeron a 1 mL/L, coincidiendo con altos incrementos de la clorofila-a. La hipoxia superficial registrada en este punto se relacionó con un evento de floración algas y no con el ascenso de la masa de agua AESS, pues en este nivel durante ese tiempo el Agua estuarina salada domino esa capa de agua. Esto es una evidencia de que el AESS no puede ocasionar mortalidad de salmones, pues su ubicación siempre fue registrada por debajo de los 100 m.
 11. Un segundo evento de baja de OD cercano a la superficie, fue registrado a alrededor de 30 m al sur del fiordo Puyuhuapi. Los valores bajos de OD se observaron también en marzo y se extendieron hasta abril, teniendo una mayor duración que el evento de Melinka. El análisis conjunto de los resultados, permitió concluir que este evento también fue debido a la ocurrencia de un florecimiento de algas en el fiordo Puyuhuapi durante el verano 2016 (febrero). Los registros temporales de OD y los obtenidos con CTD en las diferentes estaciones del año 2016, descartan la posibilidad de que el evento de baja de OD haya sido producido por el ascenso de las aguas con bajo OD desde la capa hipoxica profunda, debajo de los 100 metros en el fiordo. Por otro lado se confirma, que la masa de agua AESS no tuvo relación con el origen de esta baja de OD, pues esta capa también estuvo dominada por las Aguas estuarinas saladas. Es importante destacar que el fiordo Puyuhuapi estuvo en descanso sanitario desde abril a junio del 2016, por lo que no fue posible poder asociar esta baja de OD con una eventual mortalidad de salmones en las empresas que operan cerca de la zona de mediciones-
 12. De acuerdo a los datos de mortalidad de salmones que fueron afectados por bajas de OD entregados por SERNAPESCA para el fiordo Puyuhuapi, se determinó que las mayores mortalidades ocurrieron en primavera y verano entre 2014-2016. En general las mortalidades por esta causa no sobrepasaron en su mayoría el 5%, aproximadamente entre 100000-120000 peces.
 13. Las corrientes superficiales (1-30 m) al interior del fiordo Puyuhuapi mostraron que en la capa superficial se presentó un flujo hacia la cabeza del fiordo. Bajo los 30 m se presentó un flujo contrario en dirección hacia la boca. Este comportamiento es contrario a lo que esperado para un sistema estuarino.
 14. Las corrientes de baja frecuencia (> 1 día) fueron altamente consistentes entre los flujos observados en la zona de Melinka y la boca del fiordo Puyuhuapi, mientras que en el interior del fiordo parece no estar conectado directamente con las fluctuaciones observadas en Melinka, lo cual sugiere que el flujo se dirige desde Melinka hacia la boca del Puyuhuapi. Esta conexión podría estar modulada por la ocurrencia de periodos de sicigias y cuadraturas.

7. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda incluir en el monitoreo de la columna de agua los siguientes parámetros como condición mínima para reportar un evento de mortalidad por baja de OD. Los parámetros serían: temperatura del agua, salinidad, fluorescencia y el oxígeno disuelto (sensor óptico de preferencia).
2. Adicionalmente al muestreo superficial, se recomienda adicionar el muestreo del nivel de sub-superficie, entre los 15-30 metros, por ser esta la capa donde se localiza la mayor abundancia de micro algas que dada las condiciones podrían originar bajas de OD, generando mortalidades.
3. Cuando se detecte un evento de baja de OD dentro de las balsas jaulas, se recomienda realizar al menos dos perfiles (0-50 m) de temperatura del agua, salinidad, fluorescencia y oxígeno disuelto, a una distancia entre los 500-1000 m, con la finalidad de confirmar que la presencia de la baja de OD es un evento natural externo.
4. Instalar cadenas de sensores de OD usando las plataformas flotantes que tiene actualmente la salmonicultura como los pontones, muelles flotante y boyas oceanográficas que permitan registrar de forma temporal las variaciones de OD en la columna de agua hasta mínimo los 50 metros de profundidad. Los datos pueden transmitirse en línea a un centro recolector de datos para la toma de decisiones y así disminuir las posibles mortalidades que se generen por bajas naturales de OD.
5. Recomendamos la ejecución de una 2da etapa de este proyecto que abarque al menos dos periodos de mediciones continuas, durante la primavera y el verano, de las variables físicos-químicas medidas en la 1er etapa para entender mejor los forzantes de los eventos de baja de OD sub-superficiales (0-30 m) que pueden originar mortalidad de salmones. Además, adicionar el estudio de las comunidades biológicas implicadas en procesos de baja de OD durante eventos de florecimientos de algas (FAN) y su relación con los procesos bio-físicos que la generan.

8. REFERENCIAS

- Andersson, L. 1996. Trends in nutrient and oxygen concentrations in the Skagerrak-Kattegat. *J. Sea Res.* 35: 63-71.
- Ancapichún S., Garcés-Vargas. 2015. Variabilidad del Anticiclón Subtropical del Pacífico Sudeste y su impacto sobre la temperatura superficial del mar frente a la costa centro-norte de Chile. *Ciencias Marinas* (2015), 41(1): 1–20.
- Atlas, E., S. Hager, L. Gordon & P. Park. 1971. A practical manual for use of the Technicon Autoanalyzer in seawater nutrient analyses. O.S.U. Dept. of Oceanography. Technical Report, 215 pp.
- Bentamy, A. Katsaros, K. And P. Queffeuilou, 2011. Satellite air-Sea fluxes, book Remote Sensing of the Changing Oceans, 141-168.
- Boesh, D.F. 2008. Global warming and coastal dead zones. *National Wetlands Newsletter* 30: 11-21.
- Bravo L., M. Ramos, O. Astudillo, B. Dewitte, and K. Goubanova. 2015. Seasonal variability of the Ekman transport and pumping in the upwelling system off central-northern Chile (30° S) based on a high-resolution atmospheric regional model (WRF). *Ocean Sci. Discuss.*, 12, 3003–3041.

- Calvete, C; Sobarzo, M. 2011. Quantification of the surface brackish water layer and frontal zones in southern Chilean fjords between Boca del Guafo (43° 30'S) and Estero Elefantes (46° 30'S). *Continental Shelf Research* 31: 162-171.
- Caldwell, P. 1998. Sea-Level data processing on IBM-PC compatible computers version 3.0 (year 2000 compliant), University of Hawaii Sea Level Center, 80 pp.
- Castillo, M.I., Cifuentes, U., Pizarro, O., Djurfeldt, L., Cáceres, M. 2016. Seasonal hydrography and surface outflow in a fjord with a deep sill: the Reloncaví fjord, Chile. *Ocean Science* 12: 533-544.
- Daneri G., Lorena Lizárraga, Paulina Montero, Humberto E. González, Fabián J. Tapia. 2007. Wind forcing and short-term variability of phytoplankton and heterotrophic bacterioplankton in the coastal zone of the Concepción upwelling system (Central Chile), *Progress in Oceanography*, Volumes 92–95, Pages 92-96.
- Daneri, G., Montero P., Lizárraga L., Torres R., Iriarte J.L., Jacob B., González H.E. & Tapia F.J. 2012. Primary productivity and heterotrophic activity in an enclosed marine area of central Patagonia (Puyuhuapi channel; 44S, 73W). *Biogeosciences Discuss* 9, 5929–5968.
- Dávila, P.M., Figueroa, D., Müller, E., 2002. Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35-55°S), *Cont Shelf Res*, 22-3, 521-534.
- Diaz, R. J., Rosenberg, R. 2008. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science* 321: 926-929.
- Dyer, K. R., 1973: *Estuaries: a physical introduction*. John Wiley and Sons, 140 pp.
- Doodson, A.T., 1921. The harmonic development of the tide-generating potential. *Proc.*
- Emery, W. J. & R. Thomson. 1998. *Data Analysis methods in physical oceanography*. Pergamon press, 634 pp.
- Erlandson, C. P., Stigebrandt, A., Arneborg, L. 2006. The sensitivity of minimum oxygen concentrations in a fjord to changes in biotic and abiotic external forcing. *Limnology and Oceanography* 51: 631-638.
- Foreman, M.G.G., 1977. *Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction*. Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Victoria, B.C. 97 pp. (modificado 1992).
- González, H. E., Calderón, M. J., Castro, L., Clement, A., Cuevas, L. A., Daneri, G., Iriarte, J. L., Lizárraga, L., Martínez, R., Menschel, E., Silva, N., Carrasco, C., Valenzuela, C., Vargas, C. A., Molinet, C. 2010. Primary production and plankton dynamics in the Reloncaví Fjord and the Interior Sea of Chiloé, Northern Patagonia, Chile. *Marine Ecology Progress Series* 402: 13-30.
- Godin, G., 1972. *The Analysis of Tides*. University of Toronto Press, Toronto. 264 pp.
- Gordon, L.I, J.C. Jennings, Jr. A.A. Ross & J.M. Krest 1993.. A suggested protocol for continuous flow automated analysis of seawater nutrients (Phosphate, nitrate, nitrite and silicic acid, in the WOCE Hydrographic Program and the Joint Global Ocean Fluxes Study (JGOFS)). WOCE Hydrographic Program Office, Methods. Manual 91-1. 50 pp
- 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 ELEFANTES (CRUCERO CIMAR FIORDO 4). *Cienc. Tecnol. Mar*, 25 (2):45-76.

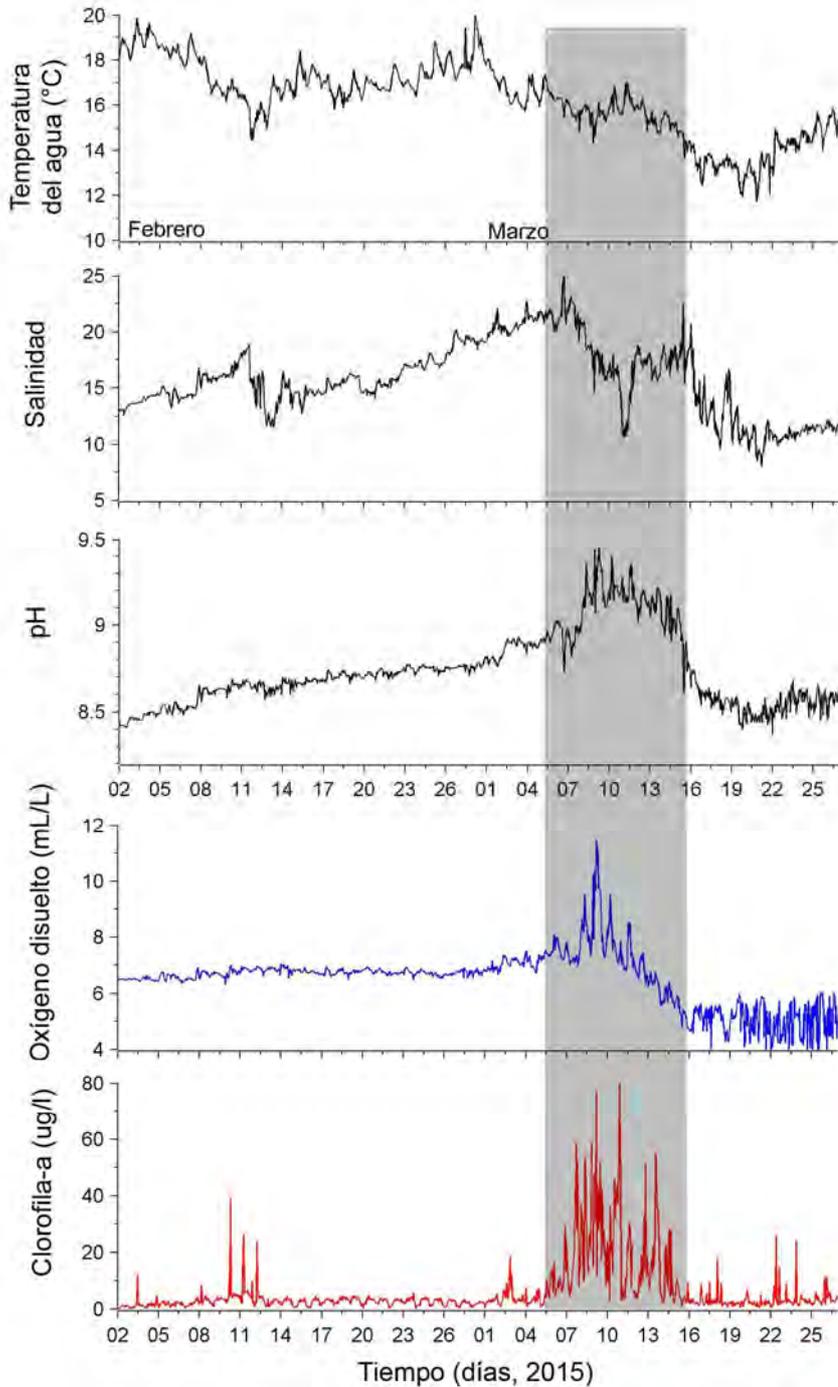
- Graneli, E., Wallström, K., Larsson, U., Graneli, W., Elmgren, R. 1990. Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea area. *Ambio* 19: 142-151.
- Gray, J., Wu, R. S, Or, Y. Y. 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Marine Ecology Progress Series* 238: 249-279.
- Holmer, M., Wildish, D., Hargrave, B., 2005. Organic enrichment from marine finfish aquaculture and effects on sediment biogeochemical processes. In: Hargrave, B. (Ed.), *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture. The Handbook of Environmental Chemistry, Part M, vol. 5.* Springer-Verlag, Berlin, pp. 181-206.
- Her Majesty's Nautical Almanac Office, 1961. *Explanatory Supplement to the Astronomical Ephemeris and the American Ephemeris and Nautical Almanac.* Her Majesty's Stationery Office, London.
- Iriarte, J. L., González, H. E., Liu, K. K., Rivas, C., Valenzuela, C. 2007. Spatial and temporal variability of chlorophyll and primary productivity in surface waters of southern Chile (41.5–43°S). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74: 471-480.
- Iriarte, J.L., Pantoja, S., González, H.E., Silva, G., Paves, H., Labbé, P., Rebolledo, L., Van Ardelan, M., Häussermann, V. 2012. Assessing the micro-phytoplankton response to nitrate in Comau Fjord (42°S) in Patagonia (Chile), using a microcosms approach. *Environ. Monit. Assess.* 185: 5055-5070
- Jacob, B.G., Tapia, F., Daneri, G., Iriarte, J.L., Montero, P., Sobarzo, M., Quiñones, R.A., 2014. Springtime size-fractionated primary production across hydrographic and PAR-light gradients in Chilean Patagonia (41-50°S). *Progress in Oceanography* 129: 75-84.
- Johansson, D., Ruohonen, K., Kiessling, A., Oppedal, F., Stiansen, J.E., Kelly, M., Juell, J.E. 2006. Effect of environmental factors on swimming depth preferences of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and temporal and spatial variations in oxygen levels in sea cages at a fjord site. *Aquaculture* 254: 594-605.
- Kemp, W. M., Boynton, W. R., Adolf, J. E., Boesch, D. F., Boicourt, W. C., Brush, G., Cornwell, J. C., Fisher, T. R., Glibert, P. M., Hagy, J. D., Harding, L. W., Houde, E. D., Kimmel, D. G., Miller, W. D., Newell, R. I. E., Roman, M. R., Smith, E. M., Stevenson, J. C. 2005. Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress Series* Mar 303: 1-29.
- Korpinen, S., Bondsdorff, E. 2015. Eutrophication and hypoxia: impacts of nutrient and organic enrichment. In *Marine Ecosystems: Human Impacts on Biodiversity, Functioning and Services*, eds T. P. Crowe and C. L. J. Frid. Published by Cambridge University Press. Cambridge University Press 2015. pp 202-243.
- Lafon, A., Silva, N., Vargas, C. A. 2014. Contribution of allochthonous organic carbon across the Serrano River Basin and the adjacent fjord system in Southern Chilean Patagonia: Insights from the combined use of stable isotope and fatty acid biomarkers. *Progress in Oceanography* 129: 98-113.
- Knap AH., Michaels AF., Dow RL., Johnson RJ., Gundersen K., Sorensen JC., Clos AR., Howse FA., Hammer M., Bates N., Doyle A., Waterhouse, T. (1993). *US Joint*

- Global Flux Study, Bermuda Atlantic Time-series Study. BATS Methods Manual, Version 3, Woods Hole, MA.
- Montero, P., Daneri, G., González, H.E., Iriarte, J.L., Tapia, F.J., Lizárraga, L., Sanchez, N., Pizarro, O., 2011. Seasonal variability of primary production in a fjord ecosystem of the Chilean Patagonia: implications for the transfer of carbon within pelagic food webs. *Continental Shelf Research* 31: 202-215.
- Montero, P., Daneri, G., Tapia, F. J., Iriarte, J. L., Crawford, D. W. Diatom florecimientos and primary production in a fjord ecosystem of central Patagonia. Submitted
- Montero, P., Pérez-Santos, I., Gutiérrez, M., Igor, G. Dinoflagellate florecimientos drive high rates of primary production during deep winter in a Chilean fjord ecosystem. En preparación.
- Haralambidou, K., G. Sylaios & V.A. Tsihrintzis. 2010. Salt-wedge propagation in a Mediterranean microtidal river mouth. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 90(4): 174-184.
- Olsen, L.M., Hernández, K.L., Van Anderlan, M., Iriarte, J.L., Sánchez, N., González, H.E., Tokle, N., Olsen, Y. 2014. Responses in the microbial food web to increased rates of nutrient supply in a southern Chilean fjord: possible implications of cage aquaculture. *Aquacult. Environ. Interact.* 6: 11-27.
- Oppedal, F., Juell, J. E., Johansson, D. 2007. Thermo- and photoregulatory swimming behaviour of caged Atlantic salmon: implications for photoperiod management and fish welfare. *Aquaculture* 265: 70-81.
- Officer, C. B. (1976), *Physical Oceanography of estuaries and associated coastal waters* 465 pp., John Wiley and Sons, New York.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley & S. Lentz. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Computers & Geosciences*, 28: 929-937.
- Peña, M. A., Katsev, S., Oguz, T., Gildbert, D. 2010. Modeling dissolved oxygen dynamics and hipoxia. *Biogeoscience* 7: 933-957.
- Pérez-Santos I., Wolfgang Schneider, Marcus Sobarzo, Raúl Montoya, Arnoldo Valle-Levinson, José Garcés. 2010. Surface wind variability and its implications for the Yucatán basin-Caribbean Sea dynamics. *Journal of Geophysical Research*, vol 115, C10052.
- Pérez-Santos I., José Garcés-Vargas, Wolfgang Schneider, Lauren Ross, Sabrina Parra, and Arnoldo Valle-Levinson. (2014). Double-Diffusive layering and mixing in Patagonian fjords, *Progress in Oceanography* 129, 35-49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2014.03.012>.
- Pérez-Santos, I. 2017. Deep ventilation event during fall and winter of 2015 in Puyuhuapi fjord (44.6°S). *Latin American Journal of Aquatic Research*. Vol. 45(1).
- Pickard, G. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *Journal Fisheries Board of Canada* 28: 1077-1106.
- Quiroga, E., Ortiz, P., Reid, B., Gerdes, D. 2013. Classification of the ecological quality of the Aysen and Baker Fjords (Patagonia, Chile) using biotic indices. *Marine Pollution Bulletin* 68: 117-126.
- Rabalais, N. N., Díaz, R. J., Levin, L. A., Turner, R. E., Gilbert, D., Zhang, J. 2010. Dynamics and distribution of natural and human-caused hipoxia. *Biogeosciences*, 7: 585-619.
- Rabalais, N. N. 2004. Eutrophication, in: *The Global Coastal Ocean Multiscale Interdisciplinary Processes*, edited by: Robinson, A. R., McCarthy, J., and

- Rothschild, B. J., *The Sea*, Vol. 13, Harvard University Press, pp 819-865.
- Rebolledo, L., González, H. E., Muñoz, P., Iriarte, J. L., Lange, C. B., Pantoja, S. 2011. Siliceous productivity changes in Gulf of Ancud sediments (42°S, 72° W), southern Chile, over the last 150 years. *Continental Shelf Research* 31(3): 356-365.
- Ross, L., I. Pérez-Santos, A. Valle-levinson, “Semidiurnal internal tides in a Patagonian fjord”. *Prog. Oceanogr.*, 129, Part A, 19-34, 2014.
- Ross L., Arnoldo Valle-Levinson, Iván Pérez-Santos, Fabian Tapia, Wolfgang Schneider. 2015. Baroclinic annular variability of internal motions in a Patagonian Fjord. *Journal of Geophysical Research Ocean*, 120, DOI: 10.1002/2014JC010669.
- Roy. Soc. Series A. 100: 306–323. Re-issued in the *International Hydrographic Review*, May 1954.
- Sievers, A.H., Silva, N., 2008. Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. In: Silva, N., Palma, S. (Eds.), *Progress in the Oceanographic Knowledge of Chilean Inner Waters, from Puerto Montt to Cape Horn*. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile, pp. 53-58.
- Sievers, A.H. 2006. Temperatura y salinidad en canales y fiordos australes. En: N. Silva & S. Palma (eds.), *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, desde Puerto Montt a cabo de Hornos*. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. pp. 31-36.
- Silva, N., Calvete, C. 2002. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre el Golfo de Penas y el Estrecho de Magallanes (crucero CIMAR-fiordo 2). *Ciencia y Tecnología Marina* 25 (1): 23-88.
- Silva, N., Prego, R., 2002. Carbon and nitrogen spatial segregation and stoichiometry in the surface sediments of southern Chilean inlets (41–56°S). *Estuarine and Coastal Shelf Science* 55: 763-775.
- Silva, N., Vargas, C. A. 2014. Hypoxia in Chilean Patagonian Fjords. *Progress in Oceanography* 129: 62-74.
- Silva, N., Vargas, C.A., Prego, R. 2011. Land–ocean distribution of allochthonous organic matter in surface sediments of the Chiloé and Aysén interior seas (Chilean Northern Patagonia). *Continental Shelf Research* 31: 330-339.
- Silva, N. Oxígeno disuelto, pH y nutrientes en canales y fiordos australes. 2006. En: *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. 37-43.
- 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). *Ciencia y Tecnología del Mar*, 20: 23 - 106.
- Soto, D., Norambuena, R., 2004. Evaluation of salmon farming effects on marine systems in the inner seas of southern Chile: a large-scale mensurative experiment. *Journal of Applied Ichthyology* 20, 493–501.
- Sobarzo M., Luis Bravo, David Donoso, José Garcés-Vargas, Wolfgang Schneider. 2007. Coastal upwelling and seasonal cycles that influence the water column over the continental shelf off central Chile. *Progress in Oceanography* 75 (2007) 363–382
- Schneider, W., Pérez-Santos, I., Ross, L., Bravo, L., Seguel, R., Hernández, F., 2014. On the hydrography of Puyuhuapi Channel (Chilean Patagonia). *Progress in Oceanography* 129: 8-18.

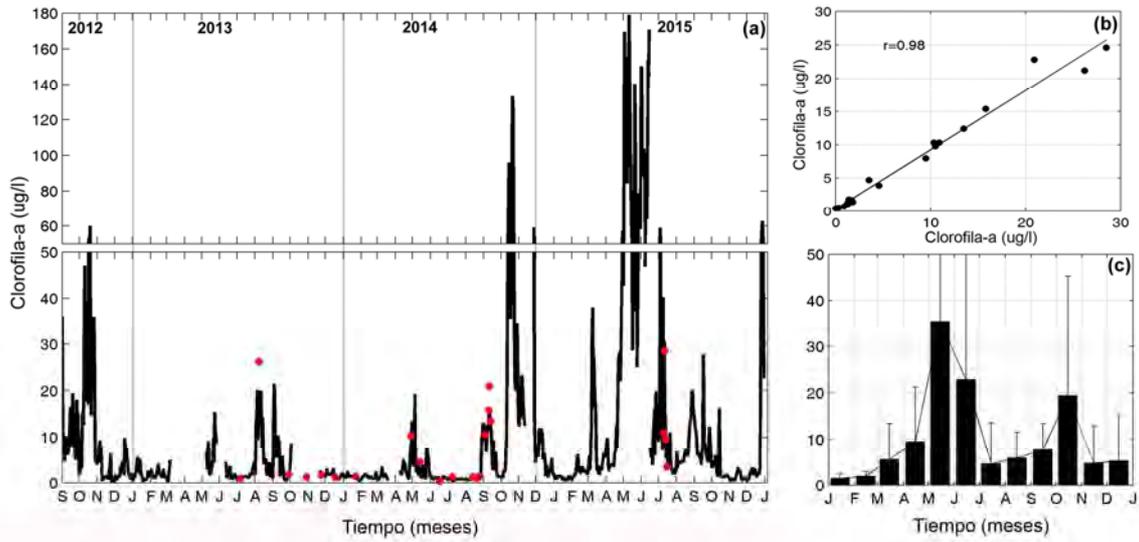
- Schneider W., David Donoso, José Garcés-Vargas, Rubén Escribano. 2017. Water-column cooling and sea surface salinity increase in the upwelling region off central-south Chile driven by a poleward displacement of the South Pacific High, *Progress in Oceanography*, Volume 151, Pages 38-48.
- Shen, J., Wang, T., Herman, J., Masson, P., Arnold, G. L. 2008. Hypoxia in a coastal embayment of the Chesapeake Bay: A model diagnostic study of oxygen dynamics. *Estuaries Coasts* 31: 652-663.
- SHOA PUB 3013. 1992. *Glosario de Marea y Corrientes* 2ª Ed., Valparaíso 59 pp.
- SHOA PUB 3202. 1999. *Instrucciones Oceanográficas N°2. Método oficial para el cálculo de los valores no armónicos de la marea (2ª Edición)*, Valparaíso 26 pp.
- Smith, V. H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. *Environmental Science and Pollution Research* 10: 126-139.
- Thiel et al., 2007. The Humboldt current system of northern and central Chile. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 45, 195-344.
- Torrence and Compo, 1998. A practical guide to wavelet analysis, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 79 (1), 61-78.
- Wannamaker, C.M., Rice, J.A. 2000. Effects of hypoxia on movements and behavior of selected estuarine organisms from the southeastern United States. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 249: 145-163.
- Welch, P.D, "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms," *IEEE Trans. Audio Electroacoustics*, Vol. AU-15 (June 1967), pp. 70-73. pp.
- Williams PJLeB., Jenkinson NW. (1982). A transportable micro-processor-controlled precise Winkler titration suitable for field station and shipboard use. *Limnology and Oceanography* 27: 576 – 584.
- Wu, R. S. S. Hypoxia: from molecular responses to ecosystem responses. 2002. *Marine Pollution Bulletin* 45: 35-45.
- Zhang, J., Gilbert, D., Gooday, A.J., Levin, L., Naqvi, S.W.A., Middelburg, J.J., Scranton, M., Ekau, W., Peña, A., Dewitte, B., Oguz, T., Monteiro, P.M.S., Urban, E., Rabalais, N.N., Ittekkot, V., Kemp, W.M., Ulloa, O., Elmgren, R., Escobar-Briones, E., Van der Plas, A.K., 2010. Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: synthesis and future development. *Biogeosciences* 7: 1443-1467.

9. ANEXOS



Anexo 1. Ejemplo de la respuesta de las variables marinas durante un evento de floración de algas ocurrido durante febrero-marzo del 2015.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



Anexo 2: (a) Valores de clorofila-a obtenidos en la boya oceanográfica a 1 metro de la superficie del mar. (b) Validación de los registros de clorofila-a de la boya (línea de color negro) con mediciones in-situ de clorofila-a (puntos de color rojo), analizadas en el laboratorio del CIEP. (c) Promedio mensual de la clorofila-a con su desviación estándar



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number	70406
-------------------	-------

Customer Information:

Company	University of Concepcion, Chile	Date	10/15/2012
Contact	Ursula Cifuentes		
PO Number	TBD		

Serial Number	035047
Model Number	SBE 03F

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.
2. Perform Routine Calibration Service.

Problems Found:

--

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.
2. Performed "Post Cruise" calibration of the temperature sensor.

Special Notes:

--



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number	70406
-------------------	-------

Customer Information:

Company	University of Concepcion, Chile	Date	10/15/2012
Contact	Ursula Cifuentes		
PO Number	TBD		

Serial Number	043489
Model Number	SBE 04C

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.
2. Perform Routine Calibration Service.

Problems Found:

--

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.
2. Performed "Post Cruise" calibration of the conductivity sensor.

Special Notes:

--



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number

70406

Customer Information:

Company	University of Concepcion, Chile	Date	10/15/2012
Contact	Ursula Cifuentes		
PO Number	TBD		

Serial Number	055191
Model Number	SBE 05T

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.

Problems Found:

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.

Special Notes:



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number

70406

Customer Information:

Company	University of Concepcion, Chile	Date	10/15/2012
Contact	Ursula Cifuentes		
PO Number	TBD		

Serial Number	2552420-0457
Model Number	SBE 25

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.
2. Perform Routine Calibration Service.

Problems Found:

--

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.
2. Replaced the internal lithium back-up batteries.
3. Performed complete system check and full diagnostic evaluation.

Special Notes:

--



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number

70406

Customer Information:

Company University of Concepcion, Chile **Date** 10/15/2012

Contact Ursula Cifuentes

PO Number TBD

Serial Number 290664

Model Number SBE 29

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.
2. Perform Routine Calibration Service.

Problems Found:

--

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.
2. Calibrated the pressure sensor.

Special Notes:

--



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number

70406

Customer Information:

Company	University of Concepcion, Chile	Date	10/15/2012
Contact	Ursula Cifuentes		
PO Number	TBD		

Serial Number	431520
Model Number	SBE 43

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.
2. Perform Routine Calibration Service.

Problems Found:

--

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.
2. Performed "Post Cruise" calibration of the oxygen sensor.
3. Performed full diagnostic evaluation.

Special Notes:

--



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number	70406
-------------------	-------

Customer Information:

Company	University of Concepcion, Chile	Date	10/15/2012
----------------	---------------------------------	-------------	------------

Contact	Ursula Cifuentes
----------------	------------------

PO Number	TBD
------------------	-----

Serial Number	WS3S-1311 fluorometer
Model Number	WETLabs

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.

Problems Found:

--

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.

Special Notes:

--



SEA-BIRD ELECTRONICS, INC.

13431 NE 20th St. Bellevue, Washington 98005 USA

Phone: (425) 643-9866 Fax: (425) 643-9954 www.seabird.com

Service
Report

RMA Number	70889
-------------------	-------

Customer Information:

Company	EMS/Kansai Environmental Engineering Center Co., Ltd.	Date	10/15/2012
Contact	Hiroyoshi Yoshii		
PO Number	EMS-120906/A		

Serial Number	430116
Model Number	SBE 43

Services Requested:

1. Evaluate/Repair Instrumentation.
2. Perform Routine Calibration Service.

Problems Found:

1. Warranty anode replacement: Will replace the anode and inspect the getter lead.

Services Performed:

1. Performed initial diagnostic evaluation.
2. Performed "Post Cruise" calibration of the oxygen sensor.
3. Replaced the SBE 43 Anode sub assembly.
4. Performed internal inspection and O-ring replacement.
5. Performed hydrostatic pressure test.
6. Performed "Final" calibration of the oxygen sensor.
7. Performed full diagnostic evaluation.

Special Notes:

--

Sea-Bird Electronics, Inc.

13431 NE 20th Street, Bellevue, WA 98005-2010 USA

Phone: (+1) 425-643-9866 Fax (+1) 425-643-9954 Email: seabird@seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 1520
CALIBRATION DATE: 21-Sep-12

SBE 43 OXYGEN CALIBRATION DATA

COEFFICIENTS

Soc = 0.5352

Voffset = -0.5053

Tau20 = 1.95

A = 1.2300e-003

B = 2.1594e-005

C = -1.0848e-007

E nominal = 0.036

NOMINAL DYNAMIC COEFFICIENTS

D1 = 1.92634e-4 H1 = -3.30000e-2

D2 = -4.64803e-2 H2 = 5.00000e+3

H3 = 1.45000e+3

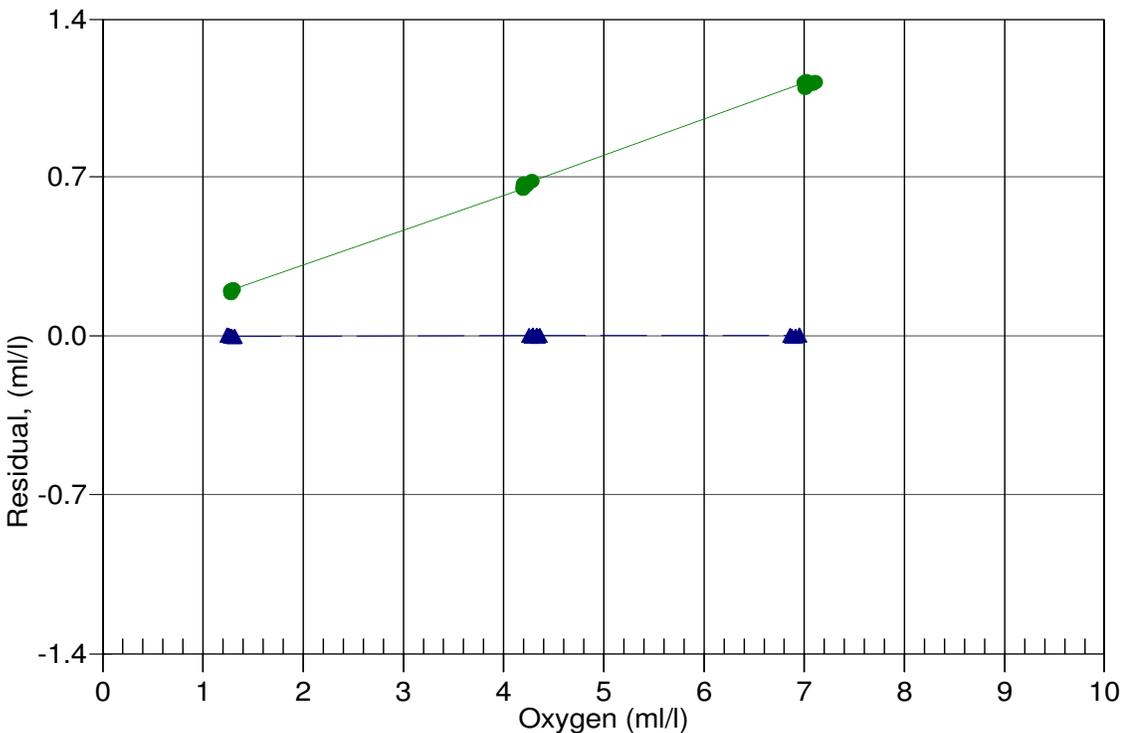
BATH OX (ml/l)	BATH TEMP ITS-90	BATH SAL PSU	INSTRUMENT OUTPUT(VOLTS)	INSTRUMENT OXYGEN(ml/l)	RESIDUAL (ml/l)
1.24	2.00	0.05	0.745	1.24	0.00
1.26	6.00	0.05	0.773	1.26	0.00
1.27	12.00	0.05	0.814	1.27	-0.00
1.29	20.00	0.04	0.872	1.29	-0.00
1.31	26.00	0.04	0.916	1.30	-0.00
1.32	30.00	0.04	0.947	1.32	-0.00
4.25	2.00	0.05	1.324	4.25	0.00
4.28	6.00	0.05	1.415	4.27	-0.00
4.29	12.00	0.04	1.551	4.30	0.00
4.33	20.00	0.04	1.737	4.33	0.00
4.34	26.00	0.04	1.871	4.34	-0.00
4.36	30.00	0.04	1.968	4.36	0.00
6.86	12.00	0.04	2.175	6.86	0.00
6.86	6.00	0.05	1.966	6.86	-0.00
6.87	2.00	0.05	1.829	6.87	-0.00
6.88	20.00	0.04	2.462	6.88	-0.00
6.91	30.00	0.04	2.823	6.91	-0.00
6.95	26.00	0.04	2.697	6.96	0.00

$$\text{Oxygen (ml/l)} = \text{Soc} * (\text{V} + \text{Voffset}) * (1.0 + \text{A} * \text{T} + \text{B} * \text{T}^2 + \text{C} * \text{T}^3) * \text{OxSol}(\text{T},\text{S}) * \exp(\text{E} * \text{P} / \text{K})$$

V = voltage output from SBE43, T = temperature [deg C], S = salinity [PSU], K = temperature [Kelvin]

OxSol(T,S) = oxygen saturation [ml/l], P = pressure [dbar], Residual = instrument oxygen - bath oxygen

Date, Delta Ox (ml/l)



● 09-Dec-08 0.8641
▲ 21-Sep-12 1.0000

Sea-Bird Electronics, Inc.

13431 NE 20th Street, Bellevue, WA 98005-2010 USA

Phone: (+1) 425-643-9866 Fax (+1) 425-643-9954 Email: seabird@seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 0664
CALIBRATION DATE: 03-Oct-12

SBE29 PRESSURE CALIBRATION DATA
5076 psia S/N 2606545 TCV: -6

QUADRATIC COEFFICIENTS:

PA0 = 3.200273e+003
PA1 = -8.831295e-001
PA2 = -2.215260e-006

STRAIGHT LINE FIT:

M = -8.871099e-001
B = 3.194678e+003

PRESSURE PSIA	INST OUTPUT(N)	COMPUTED PSIA	ERROR %FS	LINEAR PSIA	ERROR %FS
14.78	3575.0	14.77	-0.00	23.26	0.17
1115.22	2347.0	1115.37	0.00	1112.63	-0.05
2115.35	1225.0	2115.12	-0.00	2107.97	-0.15
3115.46	96.0	3115.47	0.00	3109.52	-0.12
4115.30	-1039.0	4115.45	0.00	4116.39	0.02
5065.34	-2123.0	5065.17	-0.00	5078.01	0.25
4115.33	-1039.0	4115.45	0.00	4116.39	0.02
3115.32	96.0	3115.47	0.00	3109.52	-0.11
2115.42	1225.0	2115.12	-0.01	2107.97	-0.15
1115.24	2347.0	1115.37	0.00	1112.63	-0.05
14.79	3575.0	14.77	-0.00	23.26	0.17

Straight Line Fit:

Pressure (psia) = M * N + B (N = binary output)

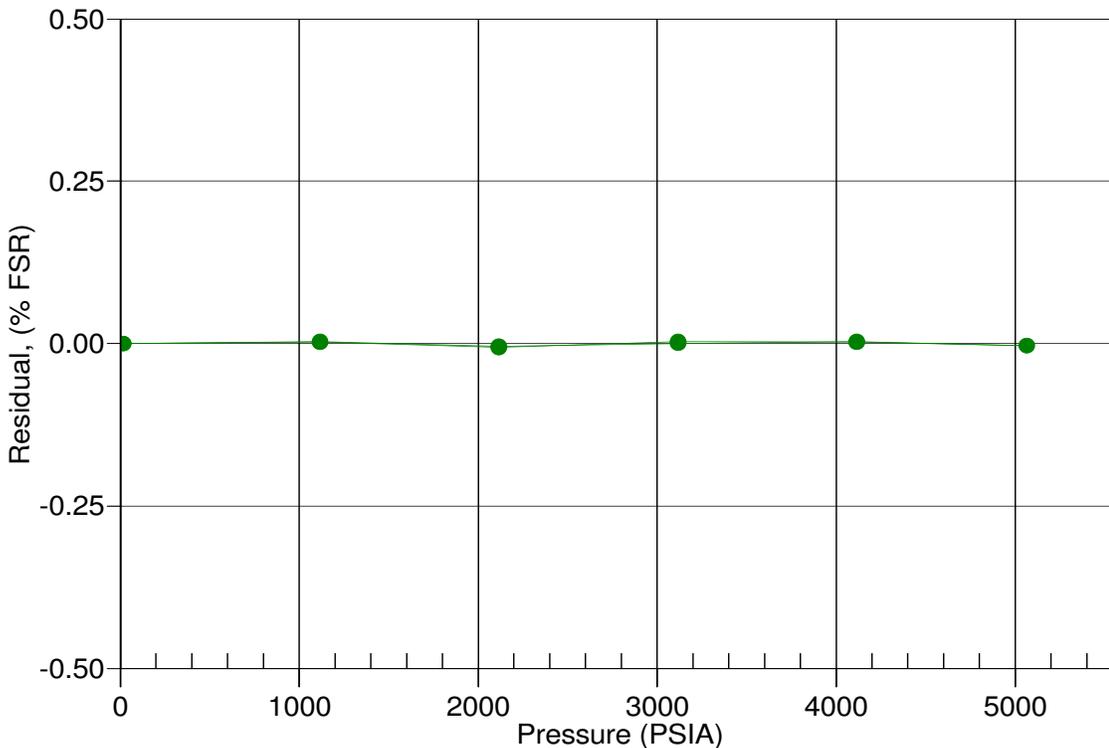
Quadratic Fit:

pressure (psia) = PA0 + PA1 * N + PA2 * N²

Residual = (instrument pressure - true pressure) * 100 / Full Scale Range

Date, Avg Delta P %FS

03-Oct-12 -0.00



Sea-Bird Electronics, Inc.

13431 NE 20th Street, Bellevue, WA 98005-2010 USA

Phone: (+1) 425-643-9866 Fax (+1) 425-643-9954 Email: seabird@seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 5047
CALIBRATION DATE: 20-Sep-12

SBE3 TEMPERATURE CALIBRATION DATA
ITS-90 TEMPERATURE SCALE

ITS-90 COEFFICIENTS

g = 4.35108861e-003
h = 6.38581233e-004
i = 2.15103159e-005
j = 1.90917294e-006
f0 = 1000.0

IPTS-68 COEFFICIENTS

a = 3.68121181e-003
b = 5.98796532e-004
c = 1.53239816e-005
d = 1.91061283e-006
f0 = 2958.970

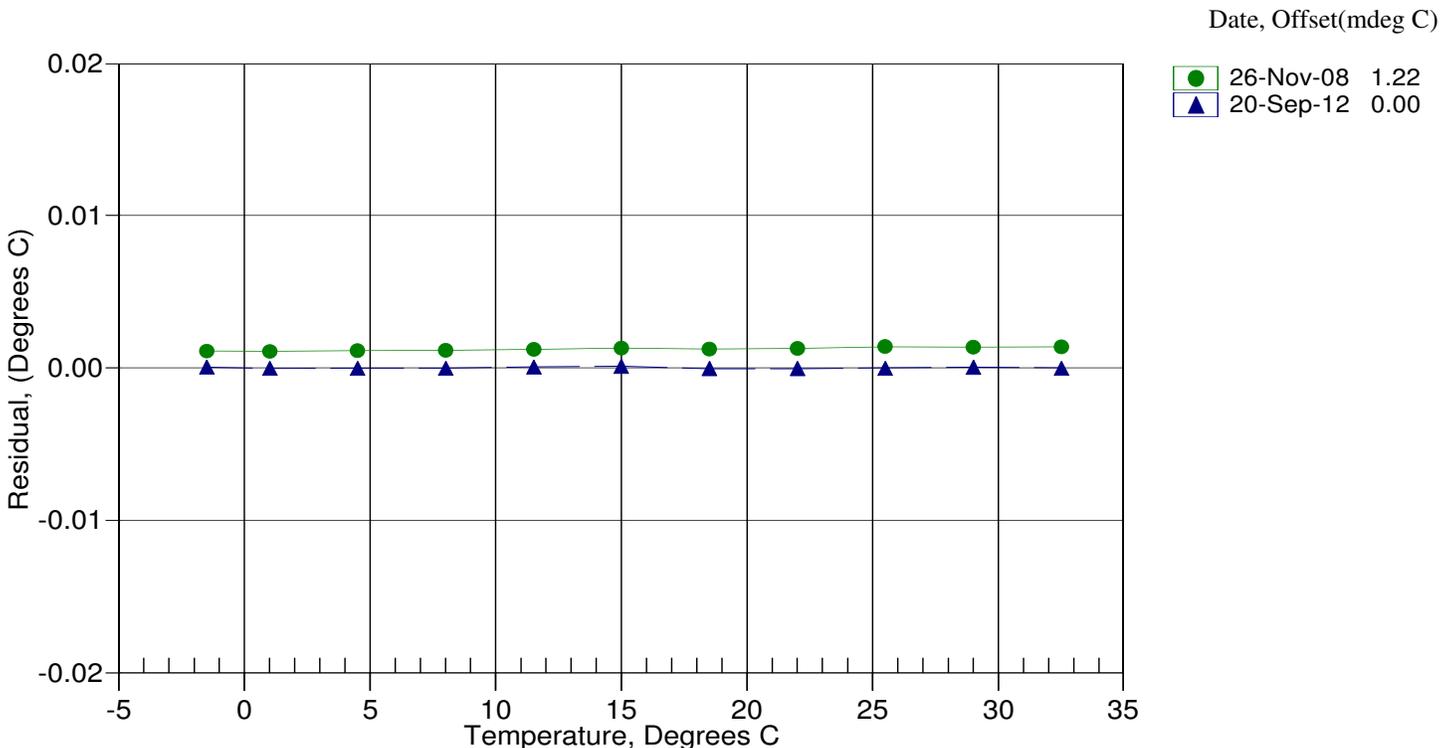
BATH TEMP (ITS-90)	INSTRUMENT FREQ (Hz)	INST TEMP (ITS-90)	RESIDUAL (ITS-90)
-1.5000	2958.970	-1.5000	0.00004
1.0000	3129.879	1.0000	-0.00004
4.5000	3380.994	4.5000	-0.00002
8.0000	3646.269	8.0000	-0.00003
11.5000	3926.099	11.5001	0.00006
14.9999	4220.838	15.0000	0.00009
18.5000	4530.864	18.4999	-0.00006
22.0000	4856.532	21.9999	-0.00006
25.5000	5198.184	25.5000	-0.00000
29.0000	5556.142	29.0000	0.00003
32.5000	5930.715	32.5000	-0.00000

Temperature ITS-90 = $1 / \{g + h[\ln(f_0/f)] + i[\ln^2(f_0/f)] + j[\ln^3(f_0/f)]\} - 273.15$ (°C)

Temperature IPTS-68 = $1 / \{a + b[\ln(f_0/f)] + c[\ln^2(f_0/f)] + d[\ln^3(f_0/f)]\} - 273.15$ (°C)

Following the recommendation of JPOTS: T_{68} is assumed to be $1.00024 * T_{90}$ (-2 to 35 °C)

Residual = instrument temperature - bath temperature



Sea-Bird Electronics, Inc.

13431 NE 20th Street, Bellevue, WA 98005-2010 USA

Phone: (+1) 425-643-9866 Fax (+1) 425-643-9954 Email: seabird@seabird.com

SENSOR SERIAL NUMBER: 3489
CALIBRATION DATE: 20-Sep-12

SBE4 CONDUCTIVITY CALIBRATION DATA
PSS 1978: C(35,15,0) = 4.2914 Siemens/meter

GHIJ COEFFICIENTS

g = -1.01115477e+001
h = 1.56918128e+000
i = -2.40110113e-003
j = 2.71008572e-004
CPcor = -9.5700e-008 (nominal)
CTcor = 3.2500e-006 (nominal)

ABCDM COEFFICIENTS

a = 6.92702670e-007
b = 1.56284846e+000
c = -1.00986812e+001
d = -7.83388422e-005
m = 6.2
CPcor = -9.5700e-008 (nominal)

BATH TEMP (ITS-90)	BATH SAL (PSU)	BATH COND (Siemens/m)	INST FREQ (kHz)	INST COND (Siemens/m)	RESIDUAL (Siemens/m)
0.0000	0.0000	0.00000	2.54200	0.00000	0.00000
-1.0000	34.6763	2.79435	4.93283	2.79434	-0.00001
1.0000	34.6767	2.96517	5.04230	2.96518	0.00001
15.0001	34.6784	4.25649	5.80292	4.25649	-0.00000
18.5000	34.6784	4.60205	5.98997	4.60204	-0.00001
29.0001	34.6769	5.68206	6.53986	5.68208	0.00002
32.5001	34.6707	6.05348	6.71843	6.05347	-0.00001

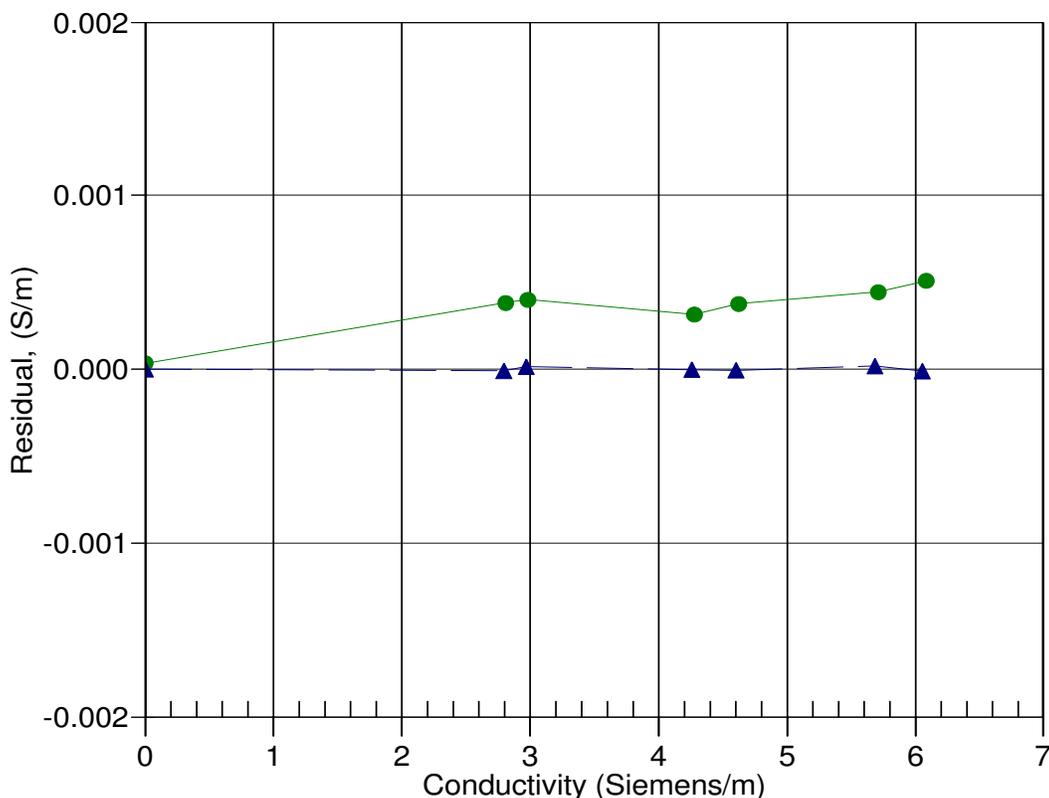
Conductivity = $(g + hf^2 + if^3 + jf^4) / 10(1 + \delta t + \epsilon p)$ Siemens/meter

Conductivity = $(af^m + bf^2 + c + dt) / [10(1 + \epsilon p)]$ Siemens/meter

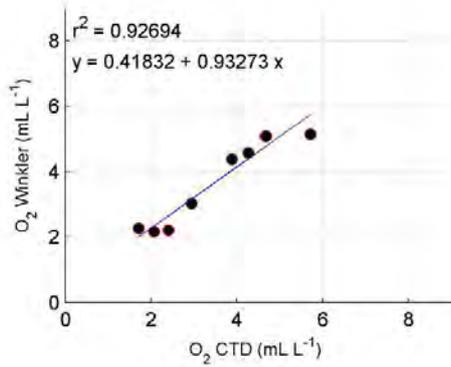
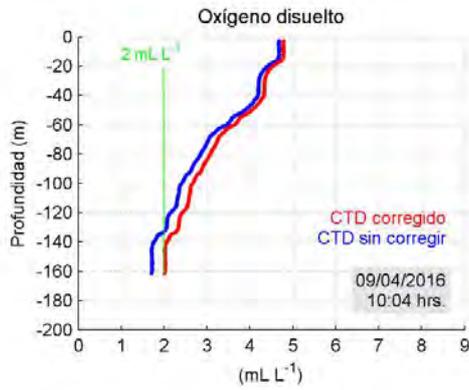
t = temperature[°C]; p = pressure[decibars]; δ = CTcor; ϵ = CPcor;

Residual = (instrument conductivity - bath conductivity) using g, h, i, j coefficients

Date, Slope Correction

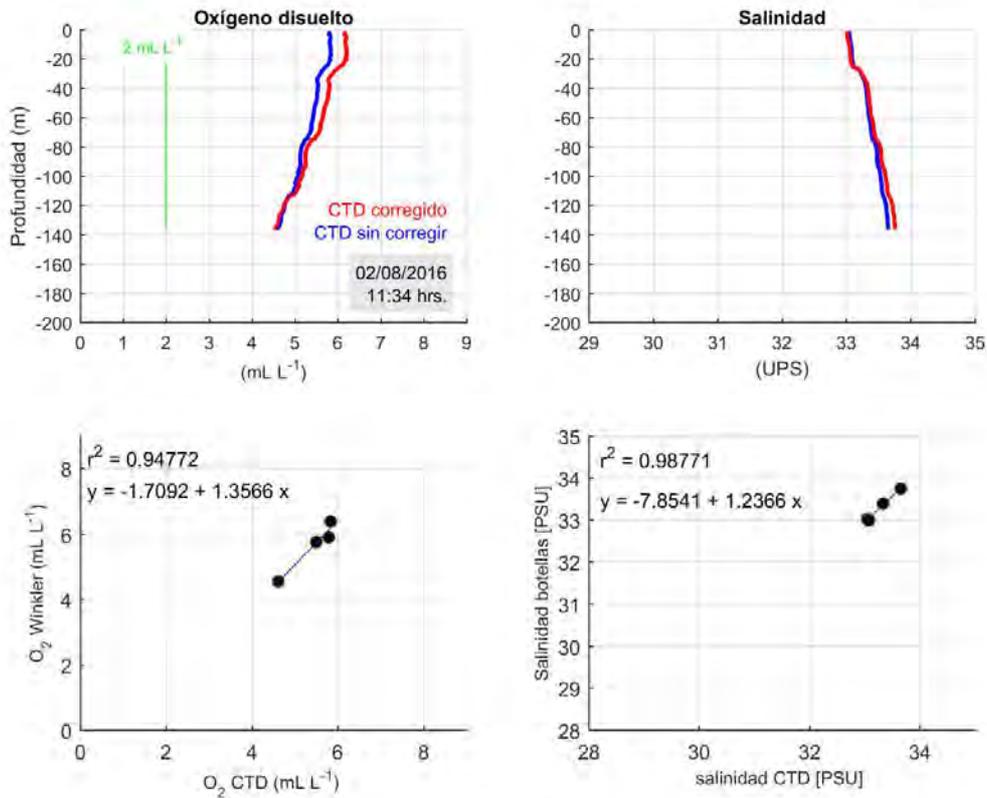


Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



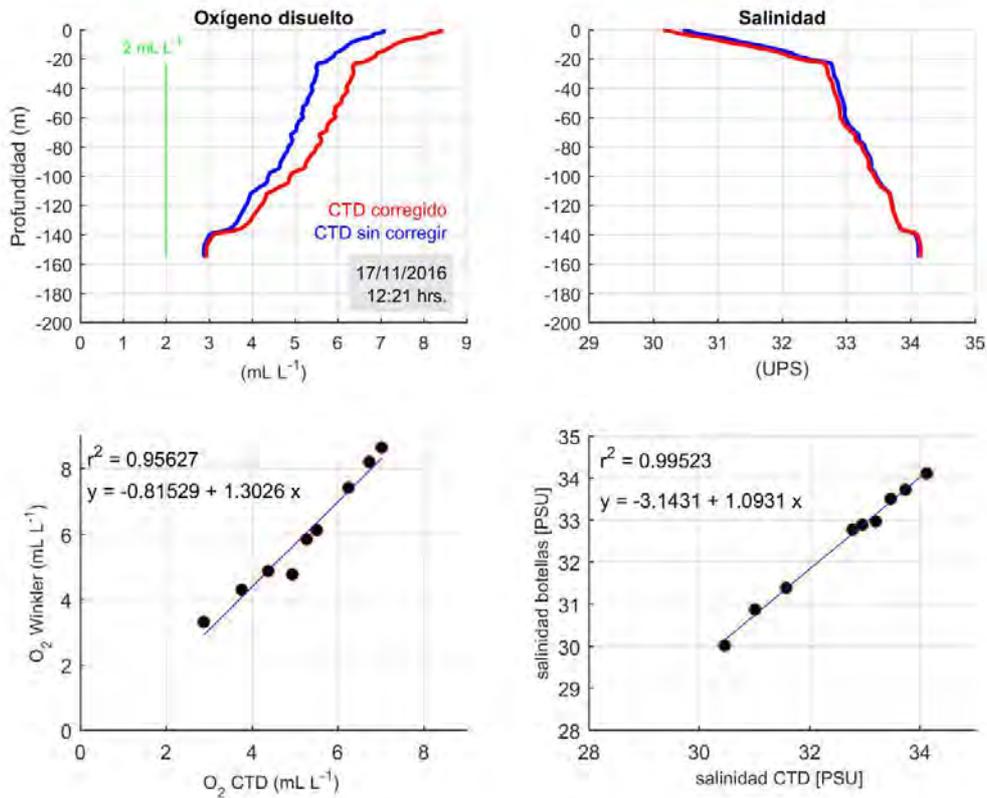
Anexo 4. (Panel superior) perfiles de OD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler. (Panes inferior) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 9 de Abril 2016 en Melinka.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



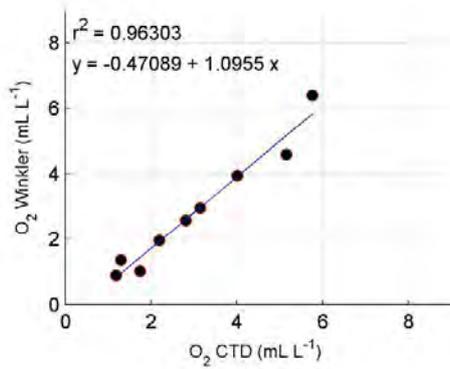
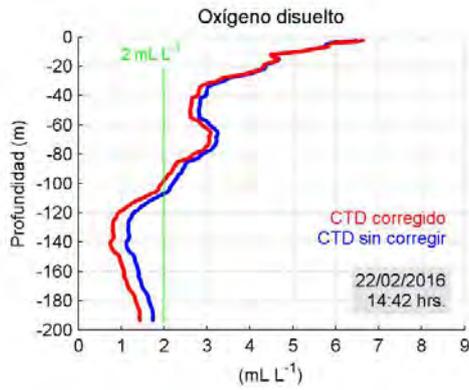
Anexo 5. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 2 de Agosto 2016 en Melinka.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



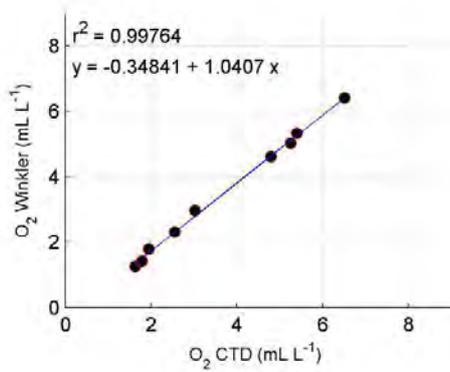
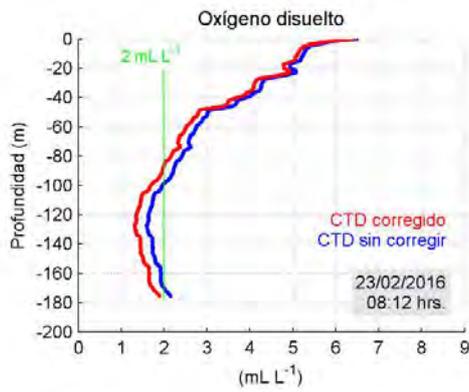
Anexo 6. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 17 de Noviembre 2016 en Melinka.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



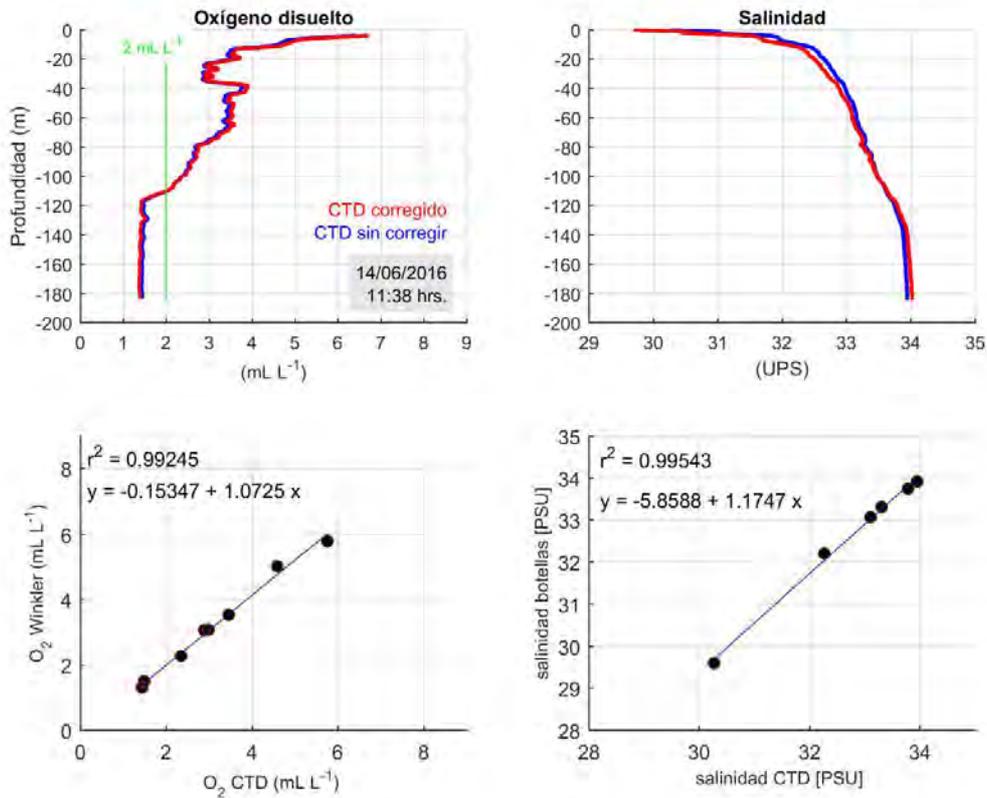
Anexo 7. (Panel superior) perfiles de OD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler. (Paneles inferior) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 22 de Febrero 2016 en el norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



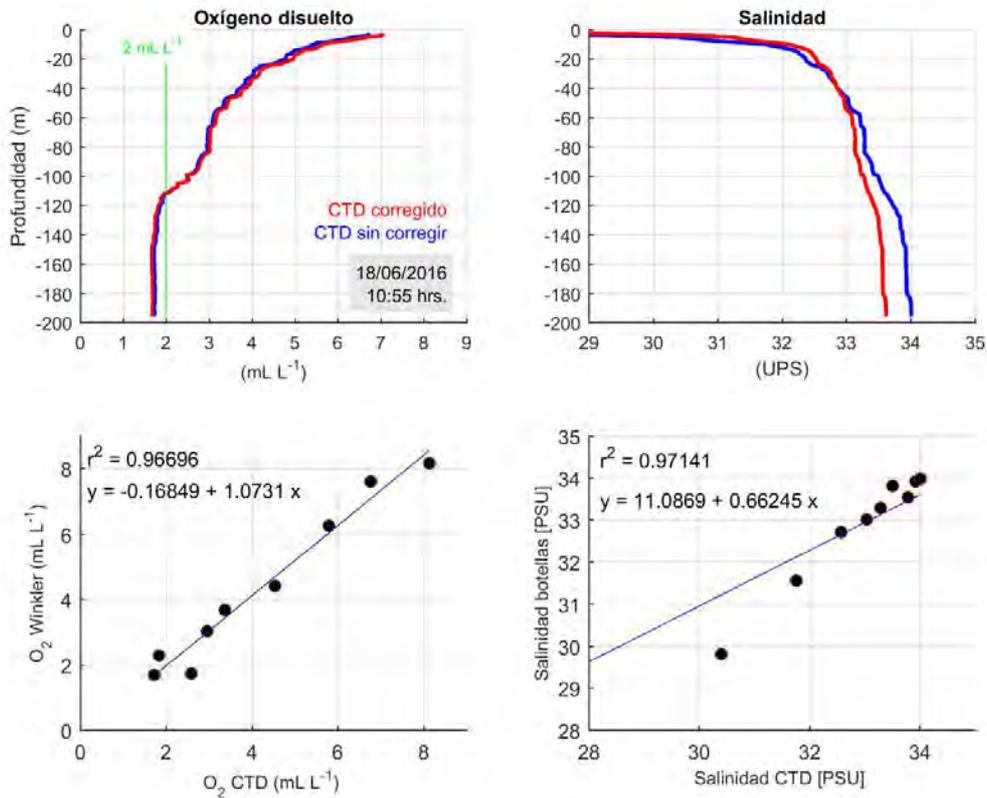
Anexo 8. (Panel superior) perfiles de OD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler. (Paneles inferior) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 23 de Febrero 2016 en el sur de Puyuhuapi

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



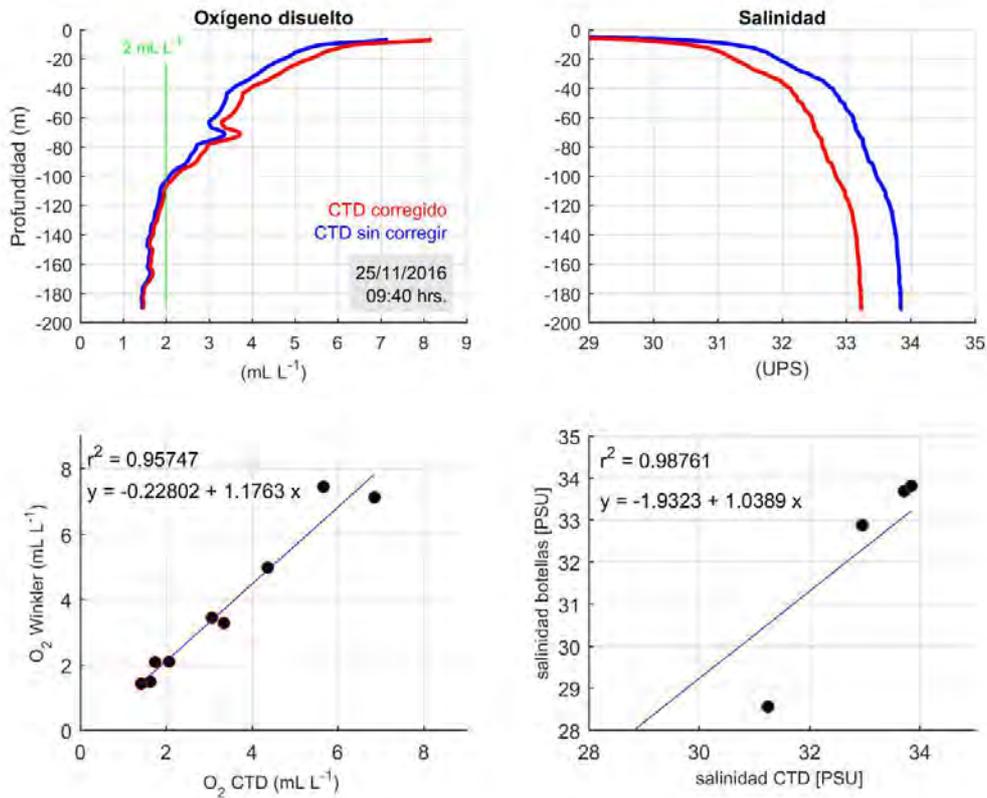
Anexo 9. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 14 de Junio 2016 en el norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



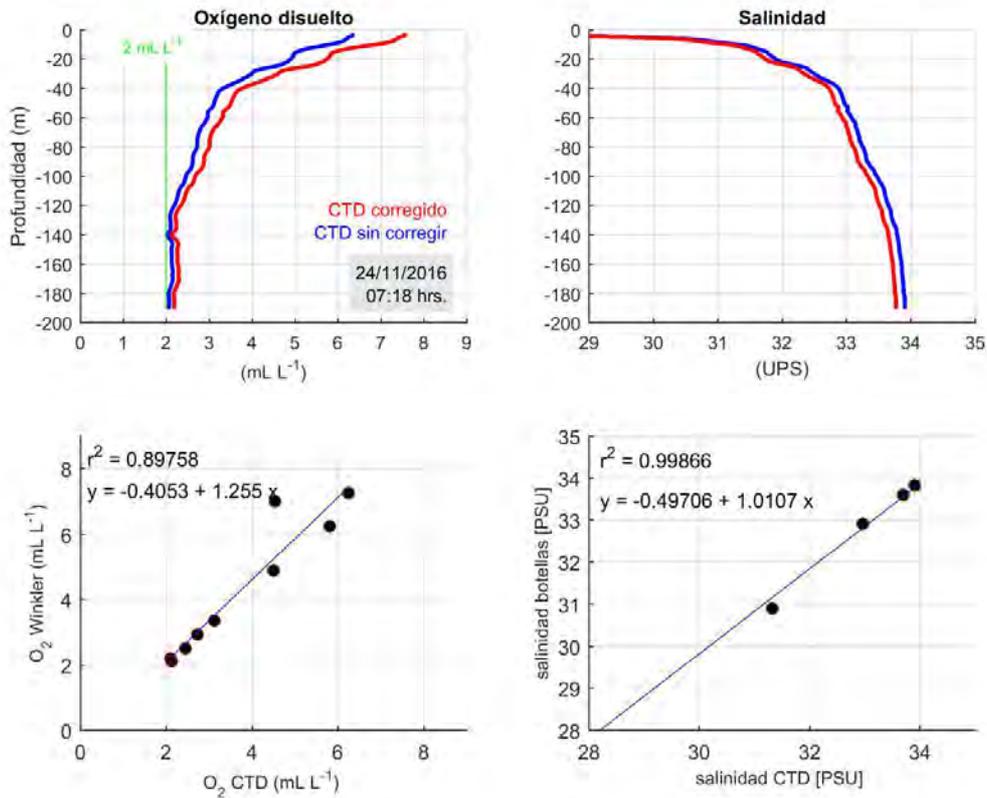
Anexo 10. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 18 de Junio 2016 en el sur de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



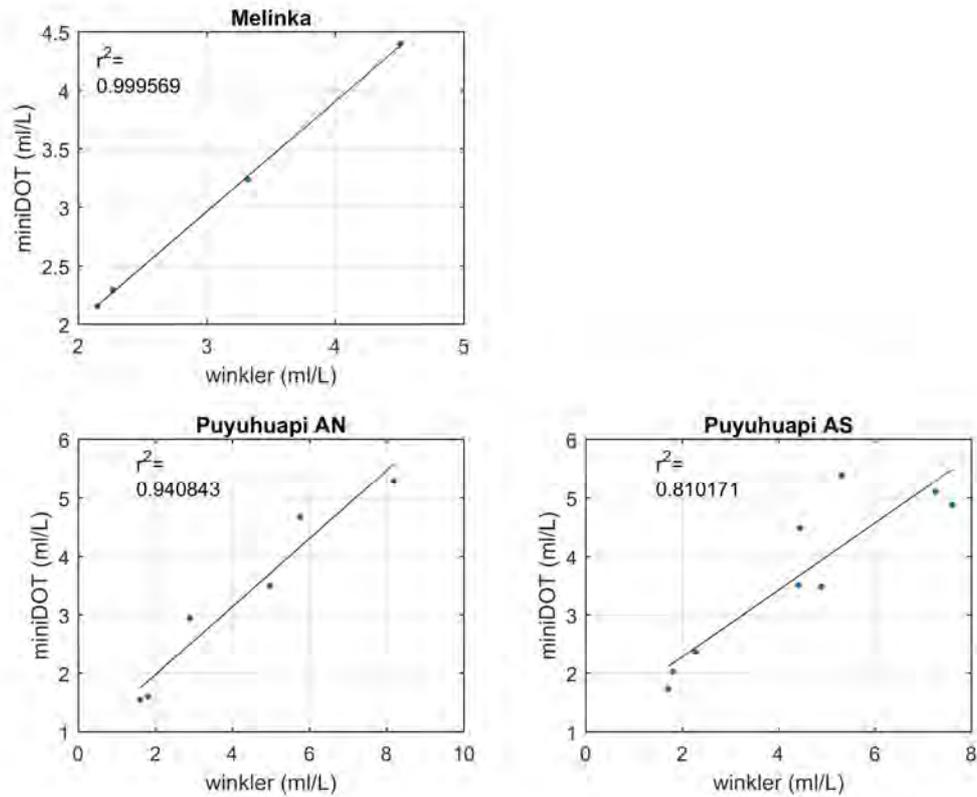
Anexo 11. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 25 de Nviembre 2016 en el norte de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



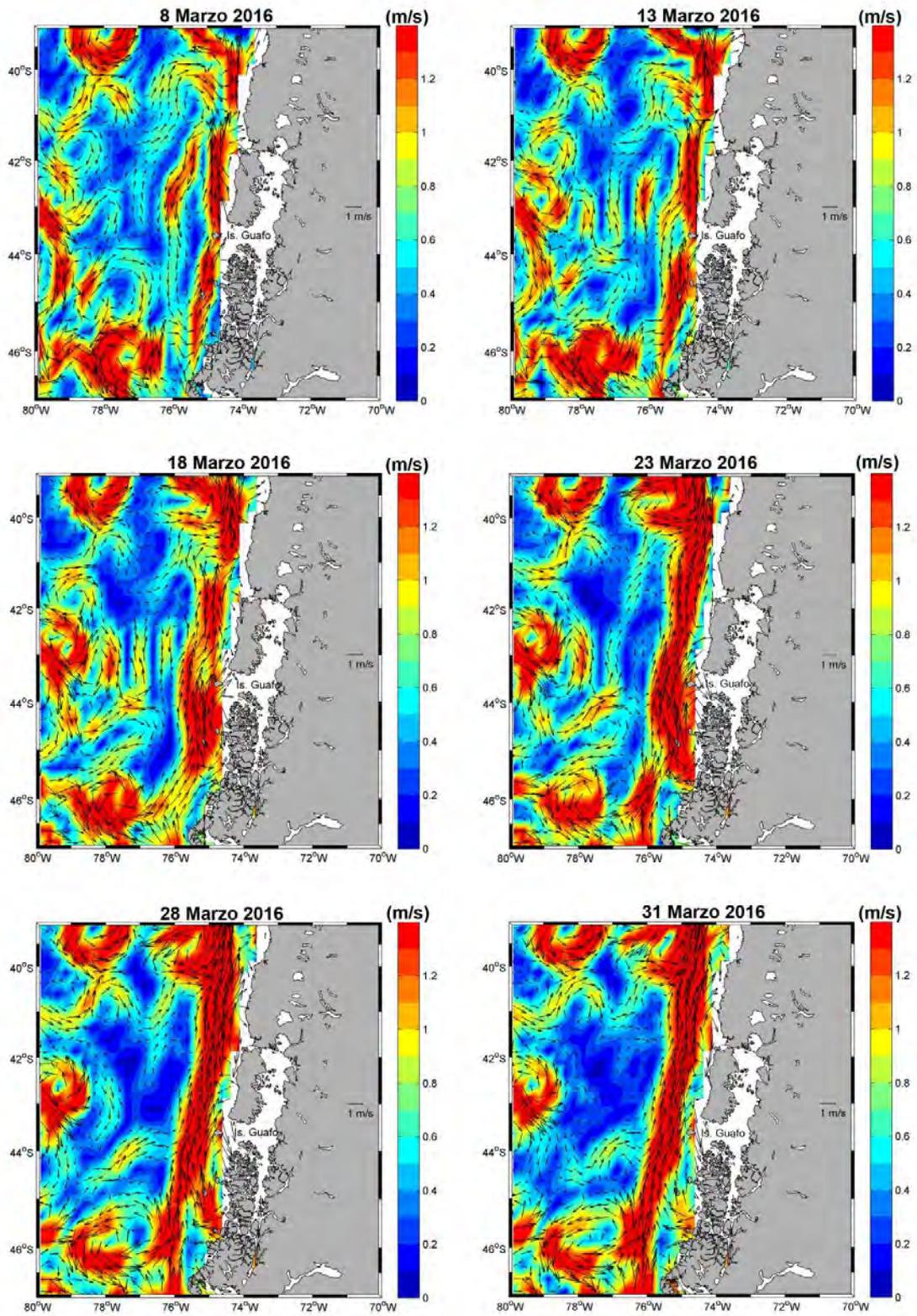
Anexo 12. (Panel superior) perfiles de OD y salinidad del CTD sin corregir (línea azul) y los corregidos (línea roja) con el método Winkler y mediante salinómetro. (Paneles inferiores) regresión lineal realizada entre los datos del CTD y los análisis de laboratorios, durante el 24 de Noviembre 2016 en el sur de Puyuhuapi.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón



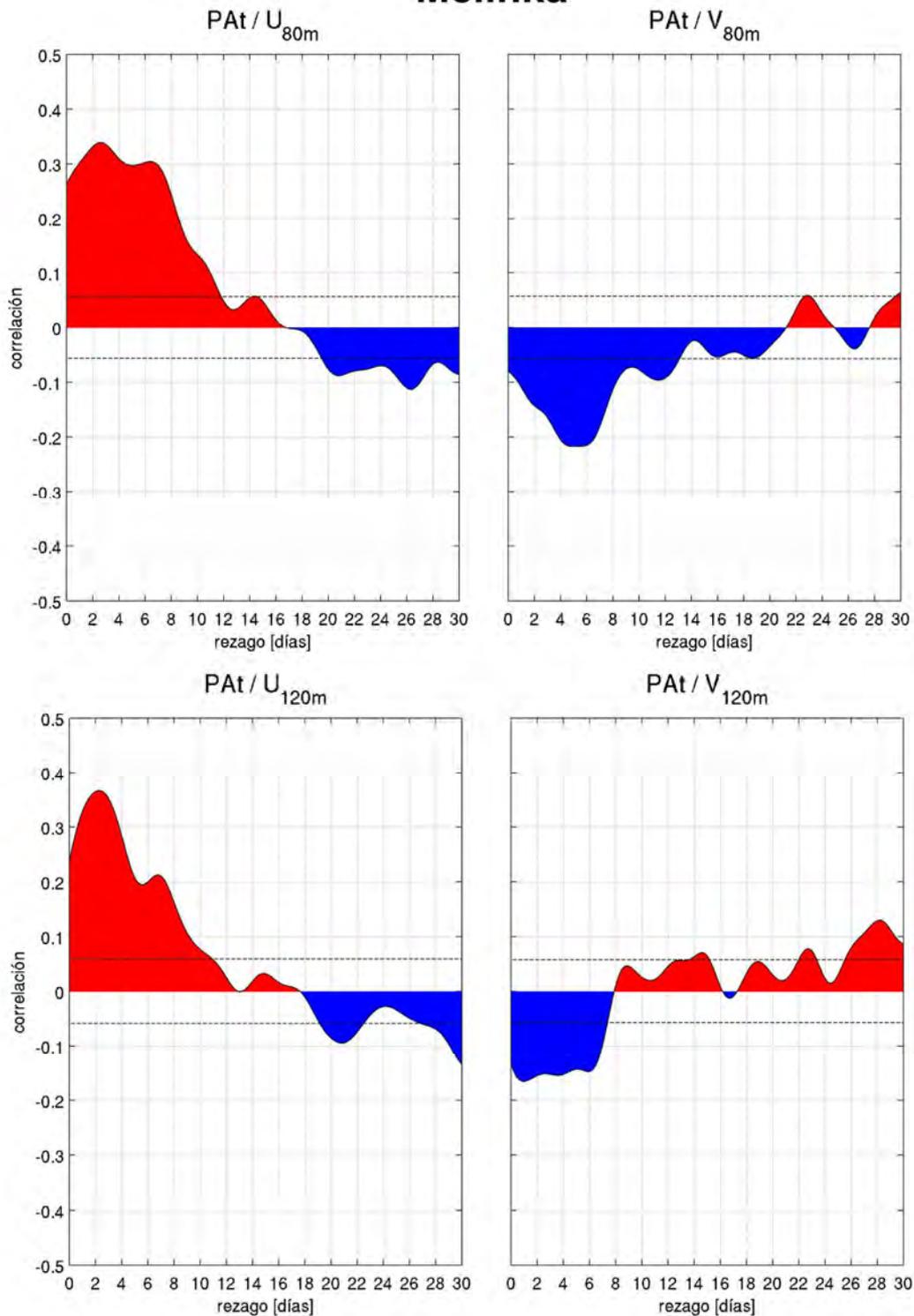
Anexo 13. Relación estadística entre los resultados obtenidos por el método Winkler y los registros de sensores de OD modelo MiniDot instalados en los diferentes anclajes. Los resultados de Melinka corresponden al MiniDot instalado a 10 metros del fondo durante enero, abril, agosto y noviembre 2016. Mientras, que los resultados de Puyuhuapi AN (norte) se elaboraron con los registros de los meses de junio y noviembre usando los niveles de 5, 30 y 120 metros. En Puyuhuapi AS (sur) se utilizaron los niveles de 5, 30 y 10 metros cerca del fondo para los meses de febrero, junio y noviembre del 2016.

Presencia natural de aguas de bajo oxígeno en zonas de cultivo de salmón

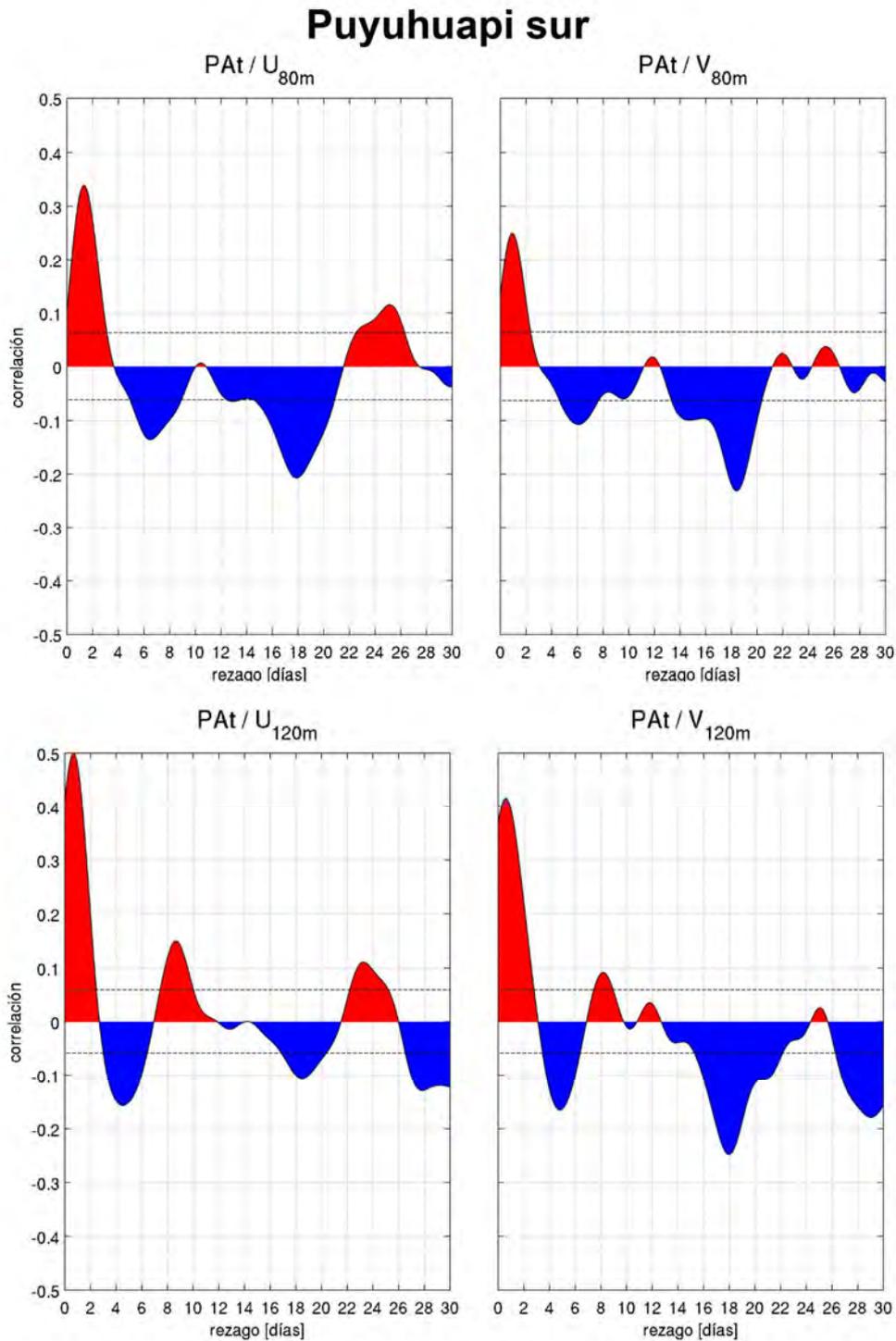


Anexo 14. Corrientes superficiales obtenidas de altimetría satelital durante marzo del 2016.

Melinka

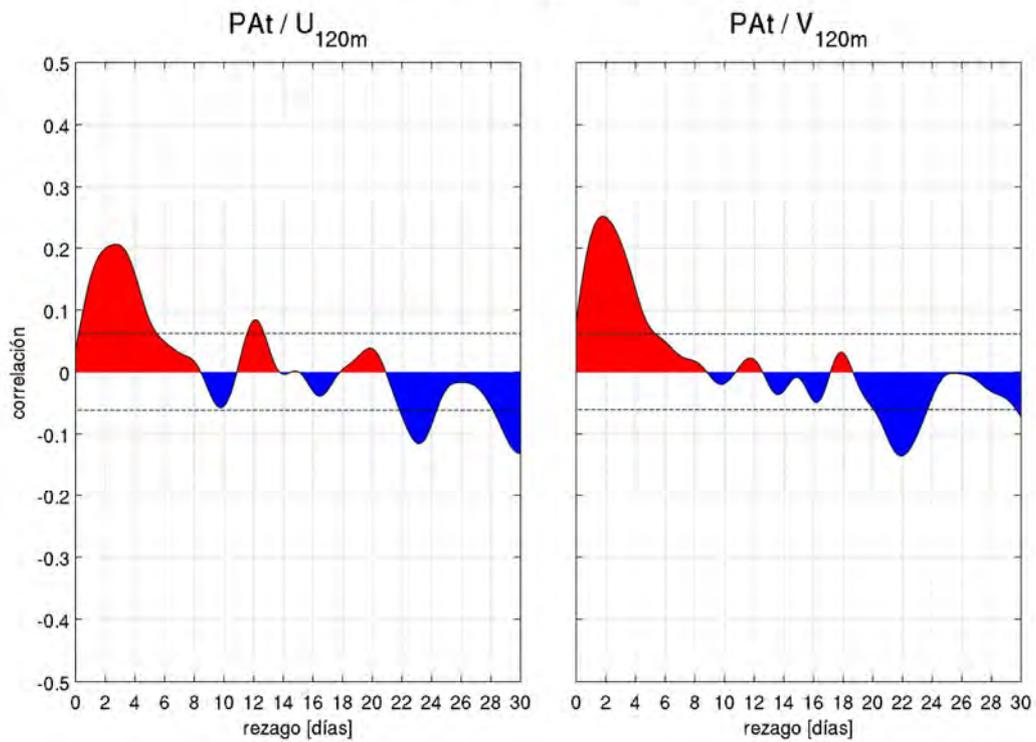


Anexo 15. Correlación cruzada realizada en los datos filtrados de la presión atmosférica en Melinka y la corriente U y V de las series de corrientes del ADCP a 80 m y 120 m.



Anexo 16. Correlación cruzada realizada en los datos filtrados de la presión atmosférica en Puyuhuapi y la corriente U y V de las series de corrientes del ADCP a 80 m y 120 m en el sector de Puyuhuapi sur.

Puyuhuapi norte



Anexo 17. Correlación cruzada realizada en los datos filtrados de la presión atmosférica en Puyuhuapi y la corriente U y V de las serie de corriente del ADCP a 120 m en el sector de Puyuhuapi norte.