

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR
CARRERA DE OCEANOGRAFÍA

Caracterización de las propiedades físicas y químicas de
fiordos hipóxicos en la Patagonia Chilena ($44^{\circ}15'S - 51^{\circ}08'S$)

Trabajo de titulación para optar al Título de Oceanógrafo

Valeria Alexandra Argomedo Pérez

Valparaíso, 2017

COMISIÓN DE TITULACIÓN

Profesor Guía: Dr. Eduardo Quiroga _____

Profesor: Dr. Laura Farías _____

Profesor: Dr. Verena Häussermann _____

AUTORIZACIÓN DE USO

Autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente del Trabajo de Titulación. Además, autorizo la reproducción parcial o total de este documento sólo con fines académicos.

Valeria Alexandra Argomedo Pérez

To everyone who gave their patience for me to finish this run, my partner and children, more specifically this was for my parents; without them this would have never happened, thank you.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a todas las personas que aportaron su grano de arena para hacer de mi experiencia universitaria lo más amena posible.

A los funcionarios de la Escuela Ciencias del Mar que con solo un saludo podían alegrar nuestros días de estrés durante esta carrera.

A los profesores quienes entregaron todo el conocimiento que nuestras mentes trataban de absorber como esponjas.

A mi profesor guía, el Dr. Eduardo Quiroga, quien me tuvo paciencia y ayudó en este arduo trabajo contra el tiempo.

A mi madre y padre, sin su ayuda nunca habría llegado tan lejos. A mi hermana y cuñado con quienes conversar de cosas ajenas a la Carrera me ayudaba con la carga. Gracias por soportarme en mis peores momentos, y por entregarme los cimientos en los cuales construir mi vida.

A mi pareja, a quien encontré gracias a esta Carrera y con quien mi familia crece cada vez que adoptamos a uno de nuestros hijos. Gracias por tu ayuda y paciencia, y por la paz que me entregas al estar juntos.

ÍNDICE

COMISIÓN DE TITULACIÓN	I
AUTORIZACIÓN DE USO	II
AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS.....	10
OBJETIVOS	11
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos	11
MATERIALES Y MÉTODOS	12
Área de estudio.....	12
Masas de agua	15
Nutrientes	15
RESULTADOS.....	17
Canal Puyuhuapi	17
Canal Jacaf.....	23
Canal Sligth – Newman	28
Seno Iceberg.....	31
	V

Fiordo Almirante Montt.....	34
DISCUSIÓN	40
Canales Jacaf, Puyuhuapi y Almirante Montt.....	40
Canales Newman, Sligth y Iceberg.....	46
CONCLUSIÓN	49
REFERENCIAS.....	50
ANEXO 1.....	55
ANEXO 2.....	56
ANEXO 3.....	57
ANEXO 4.....	59
ANEXO 5.....	61
ANEXO 6.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución mundial generalizada de fiordos. Fuente: Syvitski <i>et al.</i> , 1987.	1
Figura 2. Esquema morfológico y de algunos procesos que ocurren en un fiordo. Fuente: Syvitski <i>et al.</i> , 1987.	2
Figura 3. Modelo esquemático de la circulación vertical para: a) Boca del Guafo a Estuario Reloncaví; b) Boca del Guafo a Estero Elefantes; c) Golfo de Penas a Canal de Concepción; d) Estrecho de Magallanes. Fuente: Sievers & Silva, 2008.....	5
Figura 4. Perfiles de proporción estequiométrica $\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-}$, estimada para la Boca del Guafo y el Golfo Elefantes (a) invierno y (b) primavera y perfiles de N^* , estimado para la Boca del Guafo y Golfo Elefantes en (c) Invierno y (d) primavera. Fuente: Rojas, 2015. 8	8
Figura 5. Ubicación geográfica de las estaciones en los canales del estudio. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 6. Posición geográfica de las estaciones del crucero CIMAR 7 Fiordos utilizadas en este estudio. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 7. Posición geográfica de las estaciones del crucero CIMAR 15 Fiordos utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 8. Posición geográfica de las estaciones del estero Sligth y seno Newman del crucero HF27. Fuente: Elaboración propia.....	14
Figura 9. Posición geográfica de las estaciones del seno Iceberg del crucero HF27. Fuente: Elaboración propia.....	15
Figura 10. Sección vertical de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para el Canal Puyuhuapi.....	17
Figura 11. Sección vertical de la salinidad del Canal Puyuhuapi.	18
Figura 12. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EP42 del Canal Puyuhuapi.	19

Figura 13. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EP40 del Canal Puyuhuapi.	20
Figura 14. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EP36 del Canal Puyuhuapi.	21
Figura 15. Sección vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del Canal Jacaf.	23
Figura 16. Sección vertical de la salinidad del Canal Jacaf.	24
Figura 17. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EJ32 del Canal Jacaf.	25
Figura 18. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EJ34 del Canal Jacaf.	26
Figura 19. Sección vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) entre los canales Sligth y Newman.	28
Figura 20. Sección vertical de la salinidad entre los canales Sligth y Newman.	29
Figura 21. Sección vertical del oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$) entre los canales Sligth y Newman.	30
Figura 22. Diagramas TS para las estaciones del estero Sligth (derecha) y seno Newman (izquierda).	31
Figura 23. Sección vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del Seno Iceberg.	31
Figura 24. Sección vertical de la salinidad del Seno Iceberg.	32
Figura 25. Sección vertical del oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$) del Seno Iceberg.	33
Figura 26. Diagramas TS para las estaciones del Seno Iceberg.	33
Figura 27. Sección vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del Fiordo Almirante Montt.	34
Figura 28. Sección vertical de la salinidad del Fiordo Almirante Montt.	35

Figura 29. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EAMA del Fiordo Almirante Montt.....	36
Figura 30. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EAM54 del Fiordo Almirante Montt.....	37
Figura 31. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EAMP del Fiordo Almirante Montt.....	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla resumen de los valores de la relación Nitrato:Fosfato (N:P) encontrado en las estaciones.....	22
--	----

Tabla 2. Tabla resumen de los valores obtenidos en el análisis de covarianza de los datos de nitrato y fosfato.....	39
---	----

RESUMEN

Los ecosistemas de fiordos presentan altas concentraciones de oxígeno disuelto, que parecen estar relacionadas con las características hidrográficas propias de las masas de agua presentes en estos ambientes. Sin embargo, la ocurrencia de ambientes con particulares características geográficas, tales como la presencia de umbrales, disminuyen la ventilación y, por lo tanto, la mezcla de diferentes capas de agua podrían generar ambientes con baja concentración de oxígeno disuelto (hipoxia). En este trabajo se analizaron diferentes ambientes hipóxicos: canales Puyuhuapi y Jacaf en la Patagonia norte, y canales Newman, Sligth, Iceberg y Almirante Montt en la Patagonia central, para poder describir las condiciones hidrográficas y geoquímicas.

Los datos hidrográficos y nutrientes fueron obtenidos de las expediciones del programa “CIMAR 7 y 15”, y “Huinay Fiordos 27”, con los cuales se caracterizaron las condiciones oceanográficas y biogeoquímicas (Relación Redfield y N^*) de las diferentes zonas. En los canales Puyuhuapi, Jacaf y Almirante Montt, se procesaron datos de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes (nitrato, fosfato y silicato) fueron analizados. En contraste en los canales Newman, Sligth y Iceberg solo se utilizaron datos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, por restricciones logísticas.

En general, la mayoría de los canales mostraron una capa superficial superior, que fue comparativamente más variable que la capa subsuperficial, en términos de condiciones hidrográficas. De hecho, la capa superior es más cálida, menos salina, más oxigenada que la capa subsuperficial. En general, los registros de temperatura y salinidad de los fiordos exteriores fue mayor que la de los fiordos interiores.

Las masas de agua en los canales de Newman y Sligth fueron clasificadas como las Agua Estuarina Salobre, Agua Subantártica Modificada y Agua Subantártica.

Los canales Puyuhuapi y Jacaf exhibieron 5 estaciones con bajos niveles de oxígeno disuelto, los que oscilaron entre 1,33 a 1,99 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$. Además los canales Newman, Sligth, Iceberg y Almirante Montt exhibieron 4 estaciones con condiciones de hipoxia (0,52 a 1,99 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$).

Los canales Puyuhuapi y Jacaf presentaron un valor de N:P y N* de $12,5 \pm 2$ y -5,88, respectivamente. En contraste, Almirante Montt mostro un valor de razón N:P de 8,22 y un valor promedio de N* de -24,32. Valores negativos de N* no están relacionados con las concentraciones de oxígeno disuelto según los procesos de desnitrificación en estos ambientes. Por lo tanto, la importancia de la materia orgánica alóctona (i.e. materia orgánica terrestre) derivada de detrito de plantas vasculares será incorporado para poder evaluar los efectos de bajo oxígeno y nutrientes en fiordos chilenos semicerrados o cerrados.

ABSTRACT

The fjord ecosystems have high level of dissolved oxygen concentrations, which appear to be related to the hydrographic characteristics of the water masses in these environments. However, the occurrence of environments with particular geographic features, such as the presence of sills, low ventilation and, thus, no the mixing of different water layers could be generating environments with low dissolved oxygen concentrations (hypoxic). In this study various hypoxic environments were analyzed (channels Puyuhuapi and Jacaf in north Patagonia, and channels Newman, Sligth, Iceberg and Almirante Montt in central Patagonia) in order to describe the hydrography and geochemical conditions.

The hydrographic and nutrient data were obtained from oceanographic expeditions belonged to “CIMAR 7 and 15” program, and to “Huinay Fiordos 27” expedition. In the Puyuhuapi, Jacaf and Almirante Montt channels temperature, salinity, dissolved oxygen and nutrient (nitrate, phosphate and silicate) were analyzed. In contrast, in Newman, Sligth and Iceberg channels only temperature, salinity and dissolved oxygen data were analyzed by logistic restrictions.

In general, most of the channels displayed a surface-upper layer, which was comparatively more variable than the subsurface layer in terms of hydrographic conditions. In fact, the upper layer was warmer and less saline, and more oxygenated than subsurface water. In general, the temperature and salinity registered in the outer fjords was higher than in the inner fjords.

The water masses in the Newman and Sligth channels were classified as Estuarine Brackish Water, Modified Subantarctic Water and Subantarctic Water.

In the Puyuhuapi and Jacaf channels 5 stations exhibited low oxygen levels, which oscillated between 1.33 to 1.99 mL·L⁻¹. In addition, Newman, Sligth, Iceberg and Almirante Montt channels exhibited 4 stations with hypoxic conditions (0.52 to 1.99 mL·L⁻¹).

In the Puyuhuapi and Jacaf channels N:P and N* exhibited values of 12.5 ± 2 and 5.88, respectively. In contrast, Almirante Montt fjord showed a N:P ratio of 8.22 and a mean

N* of -24.32. Negative values of N* were not related to the concentrations of dissolved oxygen by denitrification processes in these environments. Therefore, the importance of the allochthonous organic matter (i.e. terrestrial organic matter) derived from vascular plant detritus will be incorporated in order to assess the effects of low oxygen and nutrients in semiclosed or closed fjords in Chilean fjords.

INTRODUCCIÓN

Los fiordos son estuarios resultantes de la erosión glacial, por el avance y retroceso de los hielos sobre el continente (Syvitski *et al.*, 1987). La topografía resultante de esta erosión fue ocupada por el mar al ir retrocediendo los hielos a fines de la última glaciación, formando una morfología compleja de canales, con un gran número de islas e islotes (Paskoff, 2010). Estos rasgos morfológicos pueden ser encontrados principalmente en las costas oeste de Norte y Sur América, y en el Norte de Europa, sobre latitudes de 45° (Fig. 1) (Farmer & Freeman, 1983; Syvitski *et al.*, 1987).

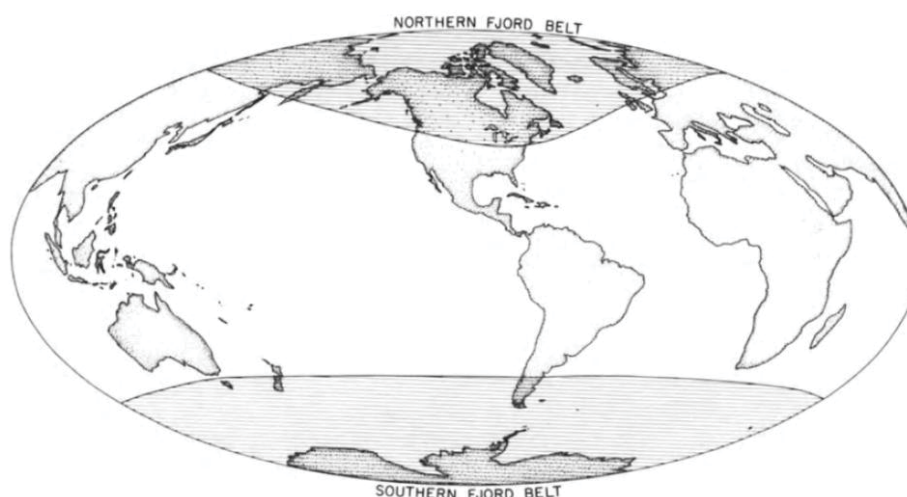


Figura 1. Distribución mundial generalizada de fiordos. Fuente: Syvitski *et al.*, 1987.

La mayoría de los fiordos se pueden identificar, dentro de los diferentes tipos de estuarios, por ser usualmente largos en relación a su anchura, profundos y con una alta pendiente en sus costas. Típicamente poseen uno o más umbrales submarinos (Sills), definiendo cuencas profundas del fiordo, las que pueden ser morrenas remanentes. Además, estos canales suelen tener un río descargando agua dulce en el extremo más hacia tierra, denominado “cabeza” y un ingreso de agua de mar en el extremo costero o “boca” producto de su apertura hacia el océano, términos que corresponden a una nomenclatura común cuando se refiere a fiordos (Fig. 2) (Farmer & Freeman, 1983; Syvitski *et al.*, 1987).

Los fiordos, en general, son estuarios, donde el mayor aporte de agua dulce se encuentra en la cabeza y, por lo tanto, el agua salobre fluye hacia la boca. Esto se debe a que los fiordos son regiones de transición con marcados gradientes químicos y físicos, donde aguas dulces y saladas se mezclan (Syvitski *et al.*, 1987). Las variaciones en los intercambios de agua dulce y materia orgánica entre los sistemas terrestres y oceánicos, conducidos por el cambio climático o por las actividades humanas, modifican los ciclos de nutrientes y del carbono, afectando la productividad biológica y en casos extremos pueden gatillar eventos de eutroficación orgánica.

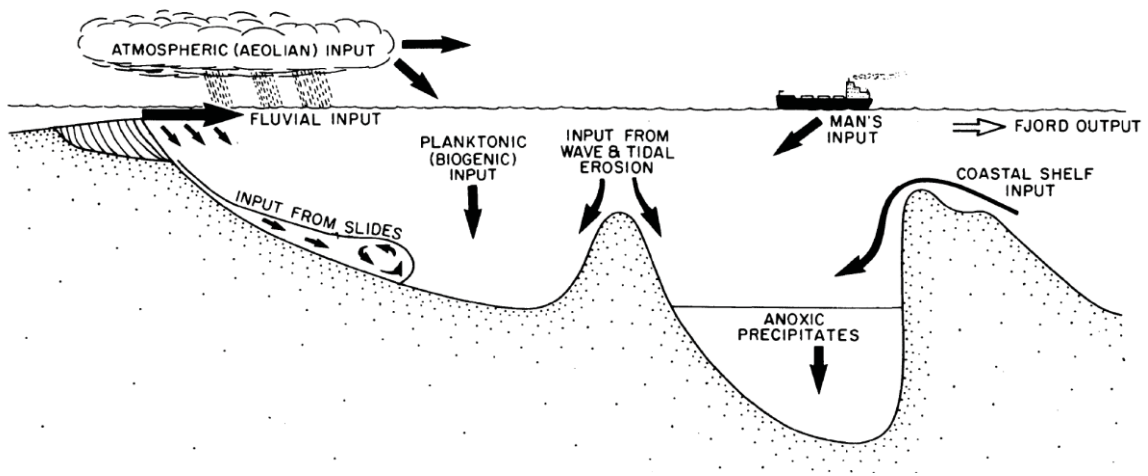


Figura 2. Esquema morfológico y de algunos procesos que ocurren en un fiordo. Fuente: Syvitski *et al.*, 1987.

Normalmente, la región de los fiordos es considerada una región de transición, influenciada por aguas oceánicas profundas (Iriarte *et al.*, 2010; González *et al.*, 2013). Sin embargo, existe un gran número de fiordos y canales donde la información es muy limitada y se dispone en algunos casos de información parcial, en áreas específicas, de geomorfología, oceanografía, meteorología y climáticas que contribuyen a la comprensión de estos ambientes.

En el escenario del cambio climático, se han realizado diversos estudios sobre la circulación en los ecosistemas de fiordos y canales (i.e. Pickard, 1963; Farmer & Freeland, 1983; Stanton, 1984; Syvitski *et al.*, 1987; Powell & Molnia, 1989; Stigebrandt & Aure,

1989; Syvitski, 1989; Jennings & Helgadottir, 1994; Díaz, 2001; Walsh *et al.*, 2008; Lefort *et al.*, 2012). Sin embargo, aunque se comparten ciertas características de manera general, como la existencia de un marcado gradiente de presión, llamado picnoclina, generada producto del aumento abrupto de salinidad al profundizar en la columna de agua, y la gran cantidad de materia orgánica presente en los sedimentos de algunos estuarios. Existen marcadas diferencias en algunos aspectos físicos y químicos que resultan de la variabilidad en las diferentes latitudes.

La región de la Patagonia chilena contiene una gran cantidad de fiordos y canales de difícil acceso, lo cual dificulta que se lleven a cabo estudios científicos a cabalidad (i.e. Silva & Palma, 2006; Pantoja *et al.*, 2011; Sepúlveda *et al.*, 2011; Bertrand *et al.*, 2012; González *et al.*, 2013; Castillo *et al.*, 2016; Jessen *et al.*, 2017). En este contexto, destaca la Expedición oceanográfica canadiense Hudson 70 en 1970 (Sievers *et al.*, 2002). En Chile, frente a esta complicación, se desarrolló el programa de investigación “Cruceros de Investigación Marina en Áreas Remotas: Fiordos” (CIMAR Fiordos) desde el año 1995 (www.shoa.cl/n_cendhoc). Hasta el año 2016, se han llevado a cabo un total de 14 campañas oceanográficas en canales australes, obteniendo información hidrográfica, sedimentológica y biológica en áreas específicas de esta región. A pesar de ello, el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de la columna de agua y sedimentos es escaso (Silva & Calvete, 2002).

La región de la Patagonia chilena, conformada por las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes, es una de las áreas de fiordos más extensas del planeta, extendiéndose desde 41,51°S (Fiordo Reloncaví) hasta 55,91°S (Cabo de Hornos) cubriendo 240.000 km², compuesto de archipiélagos, penínsulas, fiordos y canales que están actualmente expuestos a perturbaciones naturales y antropogénicas (Iriarte *et al.*, 2010; Pantoja *et al.*, 2011; Castillo *et al.*, 2016). Sin embargo, debido a que demográficamente estas regiones no cuentan con una población tan densa como otros sectores del país (1.091.114 de habitantes) (INE, 2017), de manera que los efectos de estas perturbaciones antropogénicas no son tan notorios (Silva & Vargas, 2014). La principal influencia antropogénica en estos ecosistemas, se produciría porque proveen servicios a los humanos, como de acuicultura, turismo o energía

hidroeléctrica, que no han sido evaluados adecuadamente (Iriarte *et al.*, 2010; González *et al.*, 2013).

En los fiordos y canales australes, la topografía del fondo marino es irregular, caracterizada por profundidades que varían desde ~100 a ~1.050 m (Pickard, 1971; Araya, 1997). La irregularidad de la topografía y la presencia de umbrales submarinos disminuye la circulación de aguas profundas, favoreciendo alta tasa de sedimentación y preservación de la materia orgánica (Sepúlveda *et al.*, 2011). En este sentido, las condiciones oceanográficas como la circulación y la distribución de las diferentes masas de agua constituyen un aspecto imprescindible para poder estudiar los sistemas estuarinos y comprender la dinámica de la productividad de la zona de fiordos (Silva *et al.*, 2008). En las últimas décadas, se ha proporcionado una visión general de las propiedades del agua y de los patrones de circulación de la región de la Patagonia chilena (i.e. Pickard, 1971; Guzmán, 2000; Sievers *et al.*, 2002; Silva & Calvete, 2002; Silva *et al.*, 2008; Rojas, 2015; Coloma, 2016), pero el conocimiento de la zona no llega a abarcar estos complejos sistemas en su totalidad (Aiken, 2012). La composición de masas de agua y corrientes en los canales del sur de Chile resulta de la presencia de la Corriente del Cabo de Hornos (CHH), la cual es resultante del choque de la Corriente de Deriva del Oeste (CDO), proveniente del Pacífico sur occidental, contra la costa occidental americana entre 42 y 48°S (Silva & Neshyba, 1977; 1980). La CHH, transporta Agua Subantártica (ASAA) hasta 150 m, cuya temperatura típica es aproximadamente 9 – 14 °C y salinidad de 33 – 34,2, con alta carga de nitratos y fosfatos (~0,6 a 1,2 µM fosfato; ~1 a 11 µM nitrato y ~ 0 a 12 µM silicato) (Silva *et al.*, 1998; Silva & Valdenegro, 2008). Esta masa de agua se va mezclando con aguas superficiales menos salinas que provienen de los fiordos y canales, incluso ingresando a los canales internos y juntándose con agua dulce proveniente de las lluvias, ríos, escurrimiento costero y derretimiento de glaciares, con altas concentraciones de ácido silícico, generando uno de los mayores sistemas estuarinos del planeta (Silva *et al.*, 1997; Palma & Silva, 2004; Sievers & Silva, 2008; González *et al.*, 2013). La mezcla entre el ASAA y Agua Dulce (AD), con salinidades menores a 2, genera diferentes cuerpos de agua dentro de los golfos, canales y fiordos como son el Agua Subantártica Modificada (ASAAM), con salinidad entre 31 – 33, Agua Estuarina Salada

(AE), con salinidad entre 21 – 31, Agua Estuarina Salobre (AES), con salinidad de 11 - 21, y Agua Estuarina Dulce (AED), con salinidades entre 2 – 11 (Silva & Valdenegro, 2008).

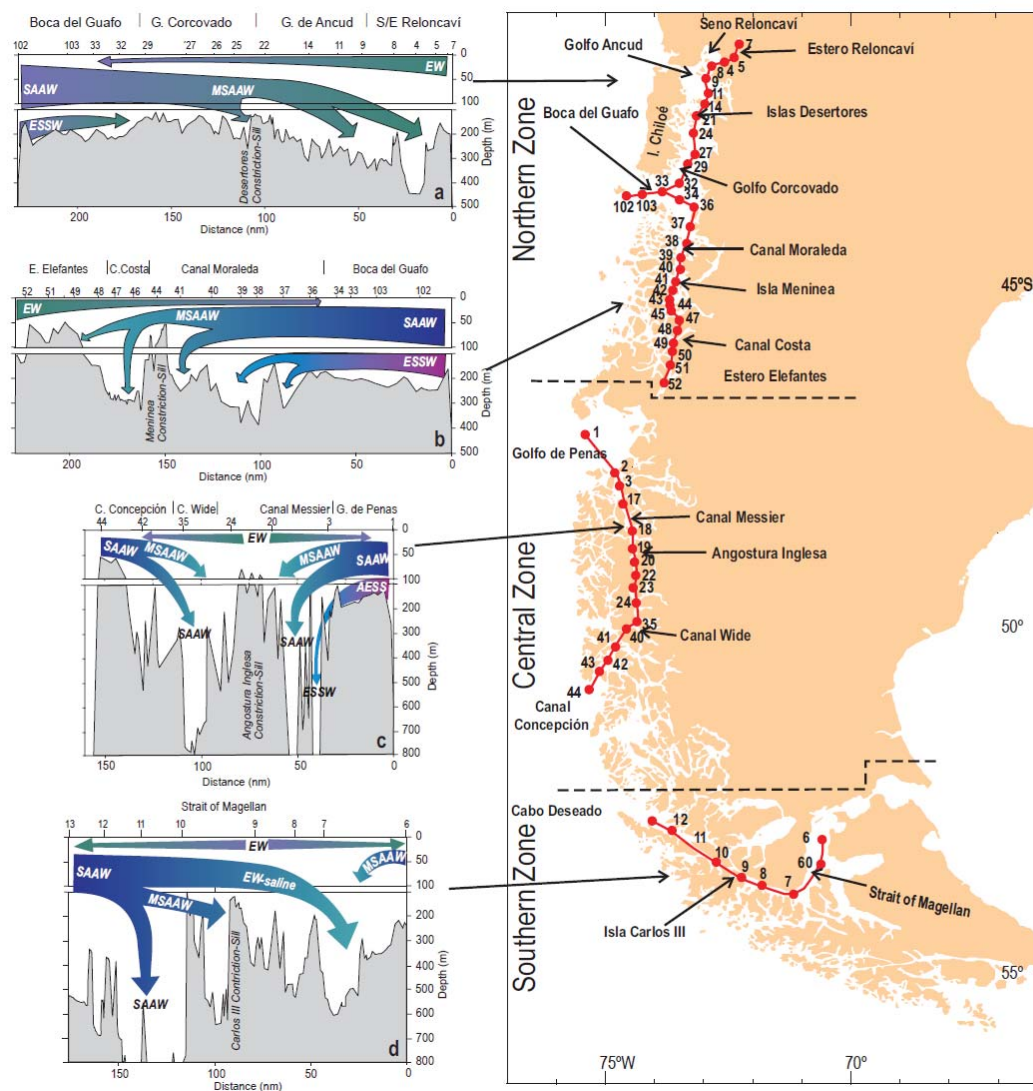


Figura 3. Modelo esquemático de la circulación vertical para: a) Boca del Guafo a Estuario Reloncaví; b) Boca del Guafo a Estero Elefantes; c) Golfo de Penas a Canal de Concepción; d) Estrecho de Magallanes. Fuente: Sievers & Silva, 2008.

Una de los rasgos más notables de las características oceanográficas en la región sur Austral de Chile es la presencia de cuencas “semicerradas”, las cuales se producen por estancamiento completo o parcial de cuerpos de agua, lo que favorece el consumo del

oxígeno disuelto debido a la degradación de la materia orgánica, pudiendo generar zonas que llegan a muy bajas concentraciones de oxígeno disuelto (Gray *et al.*, 2002; Lefort *et al.*, 2012). En este marco, las aguas con concentraciones de oxígeno disuelto de 0 mL·L⁻¹ son llamadas anóxicas, las que poseen una concentración de oxígeno disuelto entre 0 y 2 mL·L⁻¹ son llamadas hipóxicas y las aguas con concentraciones mayores a 2 mL·L⁻¹ son llamadas aguas óxicas (Díaz & Rosenberg, 1995; Silva & Vargas, 2014).

La hipoxia es una condición que se observa comúnmente en presencia de umbrales en fiordos profundos y canales donde la circulación del agua disminuye o es impedida (Pickard, 1963, 1971). Esta condición también se desarrolla cuando las fuerzas físicas estratifican el agua, impidiendo la mezcla, aislando así las aguas del fondo de la mezcla con aguas superficiales ricas en oxígeno disuelto (Díaz & Rosenberg, 1995). Estos ambientes hipóxicos o anóxicos no son fenómenos recientes. Existen registros paleoambientales describiendo estos ambientes (Savrda & Boltjer, 1991).

El principal agente oxidante de la materia orgánica es el oxígeno disuelto, pero cuando las concentraciones de oxígeno disuelto disminuyen, el agente oxidante más importante pasa a ser el nitrato a través de la desnitrificación (Libes, 1992). Esta condición de bajos niveles de oxígeno disuelto o hipoxia, requerida para que la desnitrificación (< 0,5 mL·L⁻¹) (Naqvi *et al.*, 2010), raramente se encuentra en la columna de agua de los océanos y mares interiores. Sin embargo, se han identificado algunas zonas donde la concentración de oxígeno disuelto está bajo este límite, registrándose la ocurrencia de este proceso (Rojas, 2015). Las principales zonas de hipoxia donde se ha registrado que ocurre la desnitrificación en la columna de agua son el Mar de Arabia y el Pacífico tropical oriental (Codispoti & Parckard, 1980; Anderson *et al.*, 1982). Sin embargo, también se han descrito ambientes de hipoxia en cuatro fiordos en la Patagonia chilena; Puyuhuapi, Jacaf, Aysén y Almirante Montt. De esos canales, los primeros tres presentaron concentraciones de oxígeno disuelto entre 1 – 2 mL·L⁻¹. Mientras que el último alcanzó concentraciones de oxígeno disuelto de ~0,3 mL·L⁻¹, hasta la fecha, la más baja registrada en el país (Silva & Vargas, 2014).

El consumo de nitrato para la degradación de la materia orgánica puede limitar la biomasa fitoplanctónica, afectando así a toda la cadena trófica. Bajo ese ámbito, la relación de Redfield es la proporción molecular del nitrógeno y fósforo en el fitoplancton, cuya relación estequiométrica es Nitrógeno:Fósforo = 16:1 (N:P) en la mayoría de estos organismos, cuando los nutrientes no son limitantes (Redfield, 1934). Esta proporción fue observada por Redfield tanto en la composición de la materia orgánica de los organismos autotróficos como en la concentración de nitrato (NO_3^-) y fosfato (PO_4^{3-}) en la columna de agua del océano (Rojas, 2015), y es una medida útil para interpretar condiciones de limitación de producción primaria producto de falta de algún nutriente.

Las bajas concentraciones de nitrato y fosfato en aguas superficiales y el enriquecimiento de estos nutrientes en aguas profundas son consecuencia de cómo las partículas biogénicas se producen en la capa superficial y se destruyen en el océano profundo. Lo que suele provocar la limitación de estos nutrientes para su consumo por el fitoplancton y una probable desviación en la relación de Redfield. Cuando la biomasa fitoplanctónica está limitada por nitrato, el agua presenta una relación $\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-}$ menor a la de Redfield y cuando es el fosfato el nutriente limitante, el agua presenta una relación $\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-}$ mayor a la de Redfield (Correll, 1998, 2015; Davidson *et al.*, 2012).

Otro factor que puede modificar las concentraciones de nitrato, es la fijación de N_2 , donde el N_2 inerte es transformado en amonio para ser utilizado en la síntesis de materia orgánica. Se ha examinado el efecto de la desnitrificación y fijación de N_2 , y se utiliza el trazador N^* ($\text{N}^* = [\text{NO}_3^-] - 16 * [\text{PO}_4^{3-}] + 2,9 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-3}$) para identificar la desviación de la relación Redfield y así se determina el proceso que está afectando esta relación (Gruber & Sarmiento, 1997; Rojas, 2015). Los valores de la relación entre $\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-}$ y N^* encontrados en la zona de la Patagonia chilena son de 12 y -8, respectivamente (Fig. 4), lo que es menor al planteado por la relación Redfield ($\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-} = 16$; $\text{N}^* = 2,9$), ya que la mezcla de agua dulce del continente con una relación $\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-}$ menor ($\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-} = 2,7:1$) que la de las ASAA y AEES ($\text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-} = 11:1$ y $12:1$; y $\text{N}^* \sim -4$ y -5) (Rojas, 2015).

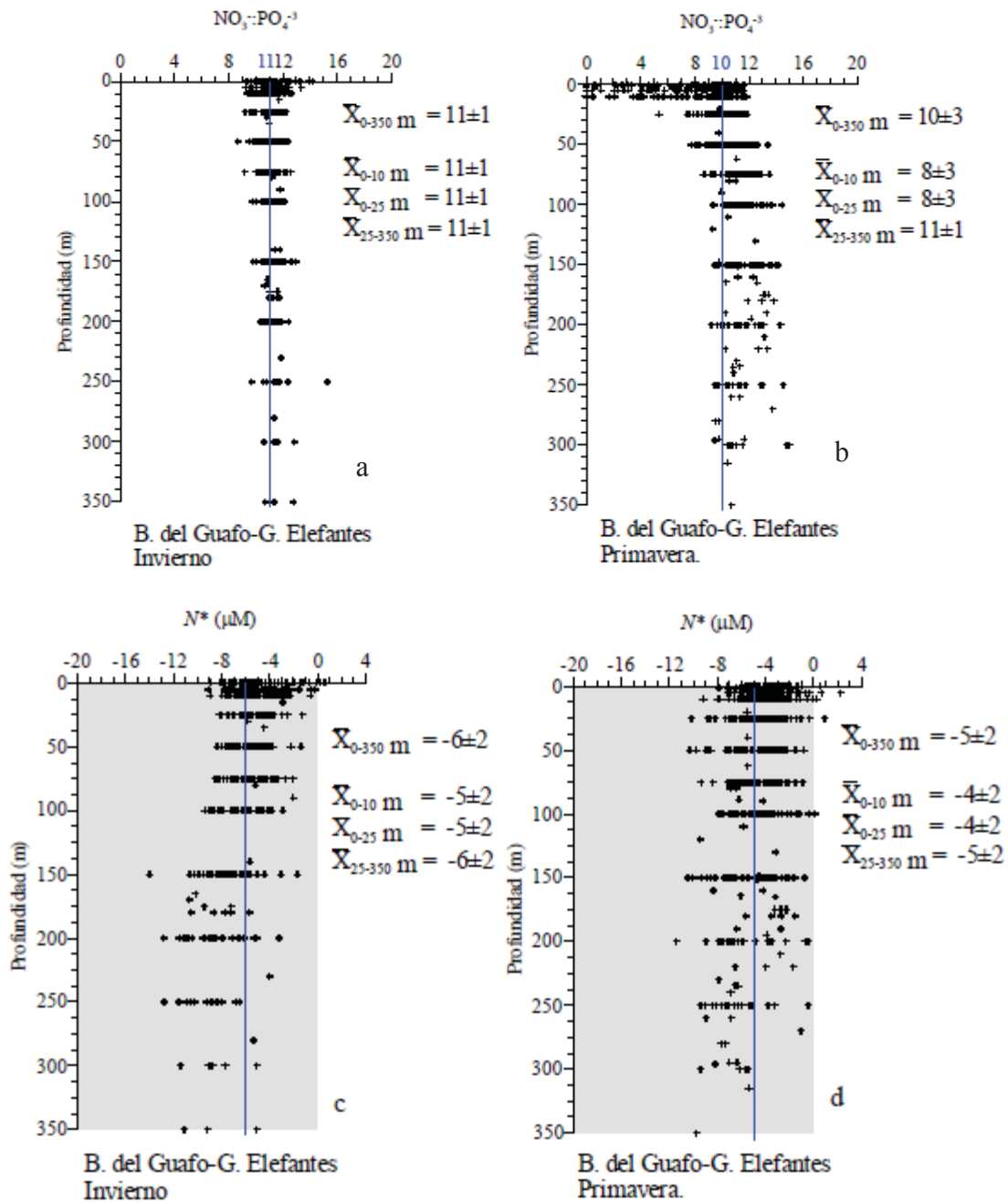


Figura 4. Perfiles de proporción estequiométrica $\text{NO}_3:\text{PO}_4^{-3}$, estimada para la Boca del Guafo y el Golfo Elefantes (a) invierno y (b) primavera y perfiles de N^* , estimado para la Boca del Guafo y Golfo Elefantes en (c) Invierno y (d) primavera. Fuente: Rojas, 2015.

La distribución del trazador N^* fue descrita por Silva *et al.* (2009), quienes encontraron en estaciones de muestreo localidades entre Chile y Perú, valores menores a -10

de N^* asociados a zonas de desnitrificación. Asimismo, frente a la Boca del Guafo, se encontraron valores de N^* iguales a -5 a 150 m de profundidad en un núcleo de AEES. Este valor se usa como referencia para indicar zonas de desnitrificación y zonas de hipoxia en aguas oceánicas o abiertas y puede ser utilizado como una primera aproximación a los valores que se pueden encontrar en los fiordos.

Como cualquier otra variable biogeoquímica, la variación de N^* ilustra el efecto combinado de la desnitrificación y la remineralización de materia orgánica rica en nitrógeno por parte de organismos fijadores de N_2 . En este sentido, considerando que estos procesos son normalmente bien espaciados, se puede interpretar el valor del N^* como causa de uno de los dos procesos. Sin embargo, otros procesos podrían ser responsables de N^* negativos en la zona de estudio, como fuentes con baja relación $NO_3^-: PO_4^{3-}$, tales como cambios biogeoquímicos asociados a las descargas de ríos, cambios en las comunidades fitoplanctónicas (Avaria *et al.*, 1997, 2004; Valenzuela & Avaria, 2009) y la influencia de la dinámica física por la circulación (Soto – Mardones *et al.*, 2009; Cáceres *et al.*, 2010, Letelier *et al.*, 2011).

En el marco del presente estudio en algunos fiordos y canales en la región austral de Chile, se realizaron expediciones específicas en los sectores del Canal Messier, Golfo de Penas y Golfo Tres Montes, donde se caracterizaron las condiciones hidrográficas como la temperatura, salinidad, concentración del oxígeno disuelto y la concentración de nutrientes. En estas áreas se han realizado pocos esfuerzos para su estudio debido a restricciones logísticas y operacionales. Recientemente, se estudiaron las características oceanográficas en el Seno Newman y Estero Sligh, lugares donde se han registrado concentraciones de oxígeno disuelto cercanos a concentraciones de hipoxia, incorporando dos localidades a lo previamente descrito por Silva & Vargas (2014). Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivos describir las condiciones de hipoxia en algunos fiordos de la Patagonia chilena con particulares condiciones geográficas que limitan la circulación, lo cual genera particulares condiciones biogeoquímicas.

HIPÓTESIS

Los ecosistemas de fiordos presentan concentraciones de oxígeno disuelto relativamente óxicas (normoxia), asociadas a las características hidrográficas propias de las masas de agua presentes en estos ambientes. Sin embargo, la ocurrencia de ambientes con particulares características geográficas, tales como la presencia de umbrales, disminuyen la ventilación y, por lo tanto, la mezcla de las aguas, generando ambientes de hipoxia.

En este contexto, se proponen las siguientes hipótesis:

H1: En los fiordos de Puyuhuapi y Jacaf se registraron bien definidos ambientes de hipoxia producto del aporte de materia orgánica terrestre asociado a los ríos, los cuales estarían produciendo cambios en las condiciones biogeoquímicas en la columna de agua, favoreciendo los procesos de desnitrificación, caracterizados con razones menores de NO_3^- : PO_4^{3-} (12) y N^* (-8).

H2: En el Fiordo Almirante Montt existen bien definidos ambientes de hipoxia producto de las características geográficas tales como una menor ventilación, los cuales estarían produciendo cambios en las condiciones biogeoquímicas en la columna de agua, favoreciendo los procesos de desnitrificación, caracterizados con razones menores de NO_3^- : PO_4^{3-} (12) y N^* (-8).

OBJETIVOS

Objetivo general

Caracterizar las condiciones oceanográficas y las condiciones biogeoquímicas (Relación Redfield y N^*) en algunos sistemas de fiordos en la región sur austral de Chile asociados con ambientes de hipoxia.

Objetivos específicos

- Caracterizar la distribución horizontal y vertical de los parámetros oceanográficos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto para todos los canales, y nutrientes (nitrato, fosfato y silicato) solo para los canales de Puyuhuapi, Jacaf y Almirante Montt.
- Establecer la distribución de las distintas masas de agua para los canales Newman, Sligth y Iceberg.
- Determinar la relación entre el nitrato y fosfato ($NO_3^-: PO_4^{-3}$), en la columna de agua, y compararla con la relación de Redfield en los canales Jacaf, Puyuhuapi y Almirante Montt.
- Determinar los procesos que afectan la relación Redfield de los canales, utilizando el trazador N^* en los canales Jacaf, Puyuhuapi y Almirante Montt.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la zona norte y central de la Patagonia chilena, entre los 46° – 53°S. Se seleccionaron 6 canales dentro de la zona de estudio, en la zona norte el Canal Puyuhuapi y Canal Jacaf, y en la zona central el Estero Sligth, Seno Newman, Seno Iceberg y Fiordo Almirante Montt (Fig. 5).

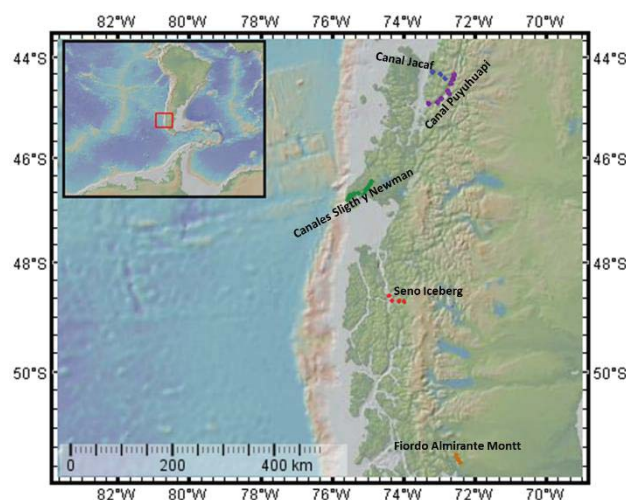


Figura 5. Ubicación geográfica de las estaciones en los canales del estudio. Fuente: Elaboración propia.

Para el cumplimiento de los objetivos se utilizará información oceanográfica y concentración de nutrientes provenientes de (a) Cruceros CIMAR Fiordos (CIMAR 7 y 15), y (b) Crucero realizado por la Fundación Huinay (HF27).

a) Cruceros CIMAR Fiordos

Entre 1995 y 2012 se han realizado alrededor de 16 cruceros CIMAR Fiordos, con estaciones distribuidas entre el fiordo de Reloncaví y el Cabo de Hornos. De estos datos se utilizaron solamente los cruceros CF7, primavera del 2001, y CF15, primavera del 2009, realizados en la zona norte y centro de la Patagonia chilena, respectivamente (Fig. 6 y Fig. 7).

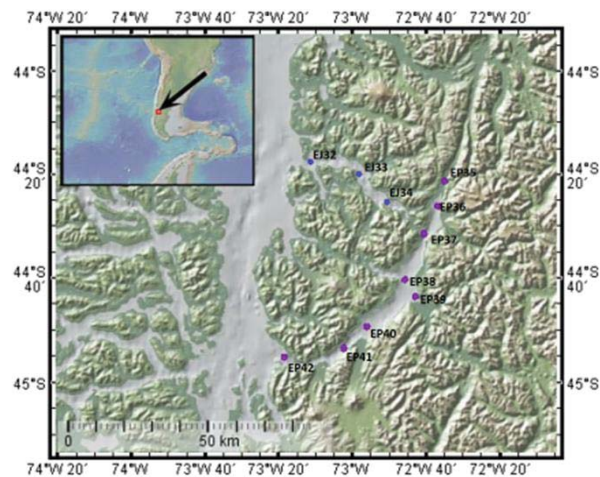


Figura 6. Posición geográfica de las estaciones del crucero CIMAR 7 Fiordos utilizadas en este estudio. Fuente: Elaboración propia.

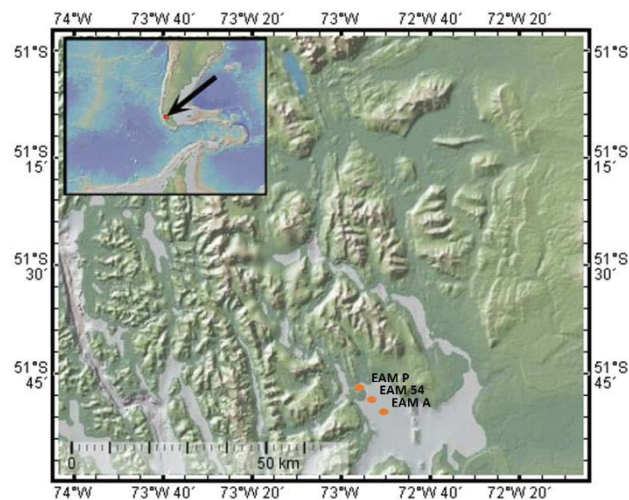


Figura 7. Posición geográfica de las estaciones del crucero CIMAR 15 Fiordos utilizadas en el estudio. Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones incluyeron registros verticales, continuos, de temperatura y salinidad, obtenidos con un CTD Seabird. Las muestras de agua para medición de nutrientes y oxígeno disuelto se tomaron con un sistema de Rosetta con botellas Niskin 25, a profundidades estándar.

Las muestras de oxígeno disuelto fueron tomadas y analizadas de acuerdo al método de Winkler modificado por Carpenter (1965). Mientras que las muestras de nutrientes

(fosfato, nitrato y silicato) se guardaron en botellas de plástico de alta densidad (60 mL) y el análisis fue realizado por el Laboratorio de Biogeoquímica de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso con un autoanalizador conforme la metodología de Atlas *et al.* (1971).

b) Expedición HF27

Se muestrearon 45 estaciones hidrográficas en el marco del crucero “Huinay Fiordo 27” (HF27), desde el 1 de febrero al 1 de marzo del 2016, a bordo de la embarcación privada “Saoirse”. De todas estas estaciones, se seleccionaron 21, concentradas entre los canales Sligth, Newman y Iceberg (Fig. 8 y Fig. 9).

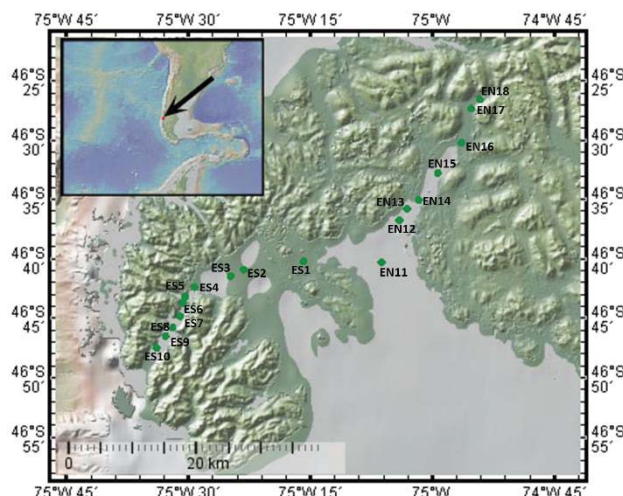


Figura 8. Posición geográfica de las estaciones del estero Sligth y seno Newman del crucero HF27.

Fuente: Elaboración propia.

Se construyeron perfiles verticales de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto con un CTD-O Seabird modelo 25. El procesamiento de los datos obtenidos del CTDO fue realizado de acuerdo al procedimiento estándar, indicado por el fabricante del equipo. Como resultado final, se obtuvieron las variables promediadas por cada metro de profundidad.

La ecuación para corrección de los datos de oxígeno disuelto del CTD-O se obtuvo con datos de expediciones anteriores y posteriores, a la expedición HF27, en donde se calibraron los datos de oxígeno disuelto obtenidos con el método de Winkler y del CTD – O (Ec. 1).

$$O_{2Winkler} = 1,0418 * O_{2CTDO} + 0,2229$$

Ecuación 1.

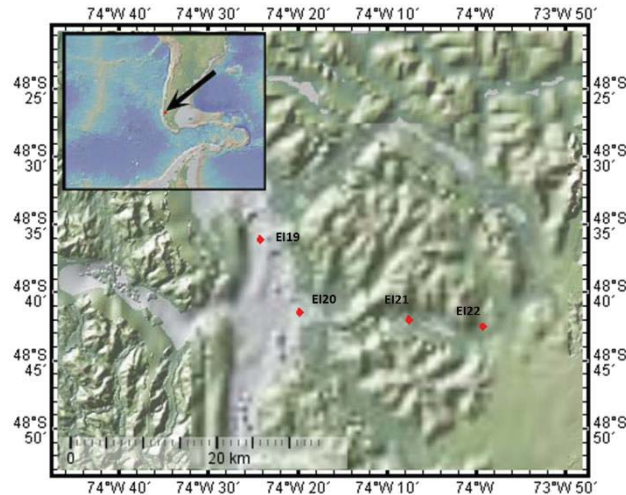


Figura 9. Posición geográfica de las estaciones del seno Iceberg del cruceo HF27. Fuente: Elaboración propia.

Masas de agua

Para la determinación de las masas y cuerpos de agua presentes en la zona (Fig. 8 y 9) y el análisis de mezcla entre ellas, se utilizaron diagramas T-S en función de las salinidades establecidas por Sievers & Silva (2006) (Anexo 2).

Nutrientes

Para evaluar la relación nitrato:fosfato ($NO_3^-: PO_4^{-3}$) en la columna de agua de cada estación, se determinará el valor de esta relación, utilizando un análisis de regresión lineal de nitrato versus fosfato, donde la pendiente del modelo de regresión representa la razón Redfield y el coeficiente de correlación, la bondad del ajuste (Rojas, 2015). Esta determinación se realizará para caracterizar la estequiometría de $NO_3^-: PO_4^{-3}$ en la columna de agua, según lo planteado para la relación Redfield.

Con el fin de explicar la desviación de los datos registrados en los cruceos respecto de la relación de Redfield, se determinará N^* como trazador de desnitrificación y fijación de N_2 (Gruber & Sarmiento, 1997; Sarmiento & Gruber, 2006) para la zona de estudio. Este

parámetro será determinado en cada estación para caracterizar distribución vertical y longitudinal de N*. Mediante esta metodología, se espera evaluar la presencia de sectores con N* característicos.

Con el objetivo de determinar estadísticamente que las diferencias de la relación nitrato:fosfato de la zona de estudio son significativas, se realizará un análisis de ANCOVA para comparar las pendientes de los modelos de regresión. Se utilizará el programa estadístico PAST3 (Hammer *et al.*, 2001).

RESULTADOS

Canal Puyuhuapi

Temperatura

La temperatura de la sección vertical del Canal Puyuhuapi fluctuó entre un valor máximo de 12,98 °C, encontrado a 4 m de la superficie en la estación EP39, estación central de la transecta, y el valor mínimo 8,83 °C, encontrado a 301 m de la estación de la boca del canal. A lo largo de la transecta la temperatura presentó una distribución en capas, disminuyendo en profundidad, presentando valores menores en la superficie de la estación en la boca de la transecta, EP 42.

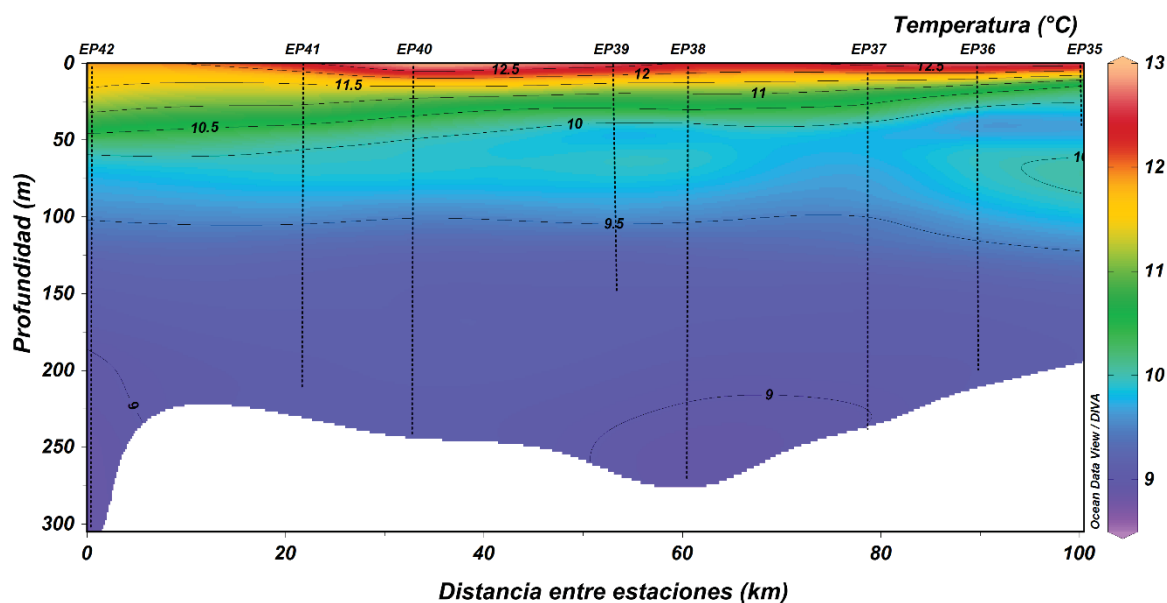


Figura 10. Sección vertical de temperatura (°C) para el Canal Puyuhuapi.

Salinidad

La salinidad fluctuó entre un valor mínimo de 12,1, encontrado a 4 m de la superficie en la estación EP39, estación central de la transecta, y el valor máximo 34,1, encontrado a en profundidad en la estación de la boca del canal. Se observó que la salinidad en profundidad, mayor a los 10 m, fue prácticamente homogénea con la profundidad con un valor promedio de $\sim 32,7$.

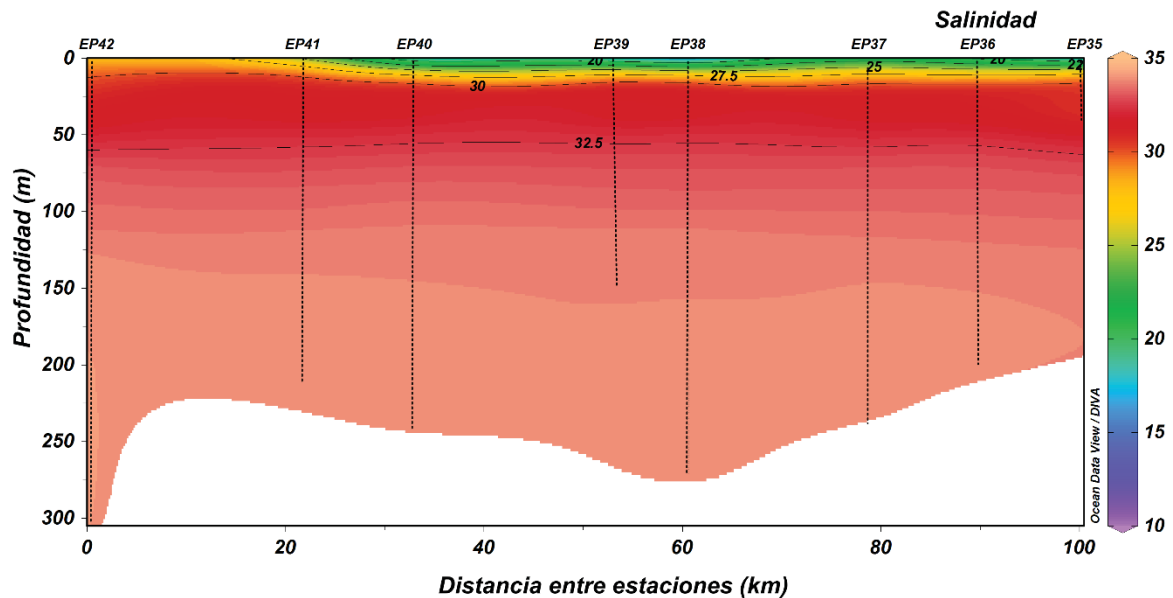


Figura 11. Sección vertical de la salinidad del Canal Puyuhuapi.

Oxígeno disuelto

La estación EP42 (Fig. 12), ubicada en la boca del fiordo, presentó valores de oxígeno disuelto que presentaron un máximo de $6,64 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ en superficie, para luego disminuir a $2,64 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ en los 150 m de profundidad.

En la estación EP40 (Fig. 13), ubicada en la mitad de la transecta, la concentración de oxígeno disuelto presentó un valor máximo de $7,70 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ a 5 m de profundidad, para luego disminuir hasta llegar a un mínimo de valor $2,22 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ a los 239 m. Mientras que en la estación EP36 (Fig. 14), ubicada en la cabeza del fiordo, la concentración de oxígeno disuelto presentó un valor máximo de $8,52 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ en superficie, 2 m de profundidad, y

posteriormente la concentración de oxígeno descendió hasta registrar los 1,33 mL·L⁻¹ a los 200 m de profundidad.

Valores de hipoxia, menores a 2,00 mL·L⁻¹, fueron registrados en profundidad en las estaciones EP41, EP38 y EP36 y EP37 con valores entre 1,33 y 1,99 mL·L⁻¹.

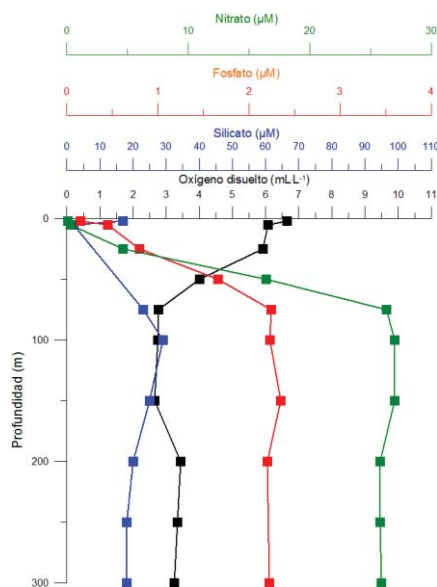


Figura 12. Perfiles verticales de oxígeno disuelto (mL·L⁻¹), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EP42 del Canal Puyuhuapi.

Silicato

La estación EP42 (Fig. 12), estación ubicada en la boca del fiordo, presentó valores de silicato que registró un mínimo de 2 μM a 5 m de profundidad, seguido de un incremento en la concentración en profundidad que alcanzó los 18 μM a los 300 m de profundidad. En la estación EP40 (Fig. 13), ubicada en la mitad de la transecta, la concentración de silicatos presentó el valor máximo de 38 μM en la superficie, seguido de un mínimo de 7 μM a 10 m de profundidad, para luego aumentar hasta llegar a un valor de 31 μM en la profundidad máxima de 239 m. Mientras que en la estación EP36 (Fig. 14), ubicada en la cabeza del fiordo, el silicato presentó el valor mínimo de 1 μM a los 5 m de profundidad, valor que aumentó en profundidad hasta 41 μM a los 200 m.

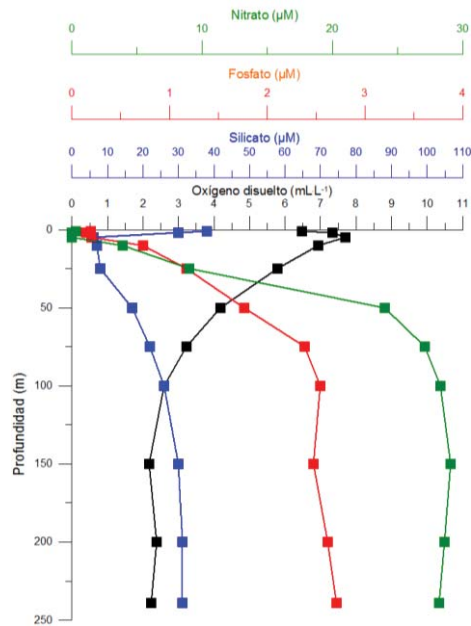


Figura 13. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EP40 del Canal Puyuhuapi.

Fosfato

La estación EP42 (Fig. 12), estación ubicada en la boca del fiordo, presentó valores de fosfato que registró un mínimo de $0,15 \mu\text{M}$ a 2 m de profundidad, seguido de un aumento en la concentración en profundidad que alcanzó los $2,20 \mu\text{M}$ a los 300 m de profundidad. En la estación EP40 (Fig. 13), ubicada en la mitad de la transecta, el fosfato presentó una concentración de $\sim 0,14 \mu\text{M}$ en superficie, seguido de incremento a 100 m con $2,54 \mu\text{M}$, para luego mantenerse constante hasta llegar a una concentración de $2,71 \mu\text{M}$ a los 239 m de profundidad.

Mientras que en la estación EP36 (Fig. 14), ubicada en la cabeza del fiordo, el fosfato presentó el valor mínimo de $0,14 \mu\text{M}$ a los 1m de profundidad, valor que aumentó en profundidad hasta $3,02 \mu\text{M}$ a los 200 m.

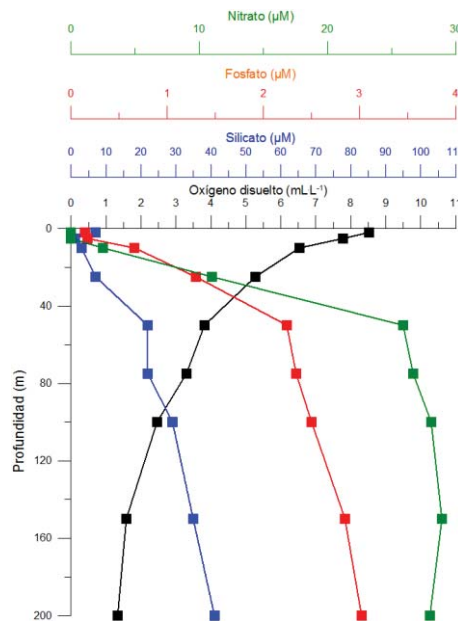


Figura 14. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EP36 del Canal Puyuhuapi.

Nitrato

La estación EP42 (Fig. 12), estación localizada en la boca del fiordo, presentó valores de nitrato registrando un mínimo de $0,10 \mu\text{M}$ a 2 m de profundidad, seguido de un aumento en la concentración en profundidad que alcanzó un máximo de $27,00 \mu\text{M}$ a los ~ 100 m, para luego disminuir a un valor de $25,90 \mu\text{M}$ a la máxima profundidad. En la estación EP40 (Fig. 13), ubicada en la mitad de la transecta, el nitrato presentó el valor mínimo de $9,00 \mu\text{M}$ a los 5 m de profundidad, seguido de incremento cuyo valor máximo fue de $28,20 \mu\text{M}$ a los 239 m de profundidad. Mientras que en la estación EP36 (Fig. 14), ubicada en la cabeza del fiordo, el nitrato presentó el valor mínimo de $0,00 \mu\text{M}$ a los 2 m de profundidad, valor que aumentó en profundidad hasta $28,00 \mu\text{M}$ a los 200 m.

Relación Nitrato:Fosfato

En la sección del Canal Puyuhuapi se presentaron valores de la relación N:P (Tabla 1) entre el máximo 13,614 en la estación EP42, con un R^2 de 0,956, y el mínimo 11,098 en la estación EP37, con un R^2 de 0,972.

Tabla 1. Tabla resumen de los valores de la relación Nitrato:Fosfato (N:P) encontrado en las estaciones.

Estación	Relación Redfield	R^2
EP35	11,709	0,979
EP36	11,332	0,985
EP37	11,098	0,972
EP38	11,227	0,981
EP39	12,945	0,986
EP40	12,224	0,968
EP41	12,539	0,956
EP42	13,614	0,956
EJ32	15,604	0,993
EJ34	12,655	0,999
EAM54	10,309	0,924
EAMP	6,1423	0,990

N*

En el canal se observaron variaciones de N* entre un mínimo de -17,42 a los 200 m de profundidad en la estación EP36 y un máximo de 28,70 a los 250 m de profundidad en la estación EP42.

Canal Jacaf

Temperatura

La temperatura de la sección vertical del Canal Jacaf, presentó una distribución en capas donde los mayores valores de temperatura se observaron en superficie registrando valores que fluctuaron entre un valor máximo de 12,18 °C, encontrado a 5m de la superficie en la estación EJ37, la cabeza del canal, y el valor mínimo 8,67 °C, encontrado alrededor de los ~315 m en la estación EJ32, la boca del canal.

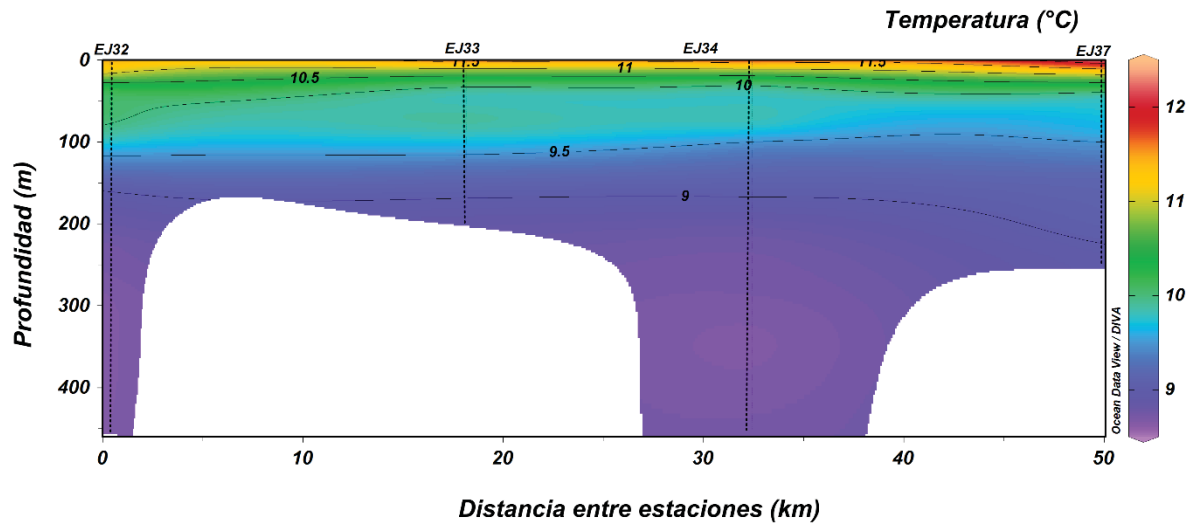


Figura 15. Sección vertical de la temperatura (°C) del Canal Jacaf.

Salinidad

La salinidad de la sección vertical del canal Jacaf presentó valores que fluctuaron entre un máximo de 34,2, encontrado a 401 m de profundidad en la estación EJ 32, en la boca del canal, y el valor mínimo 23,1, encontrado a 5 m de profundidad en la estación EJ 37, la boca del canal.

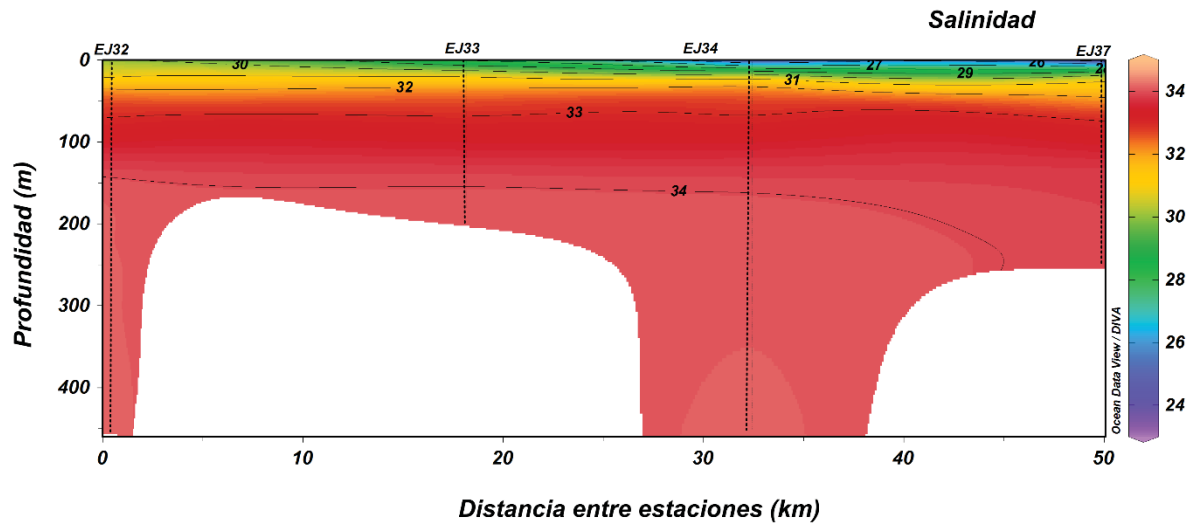


Figura 16. Sección vertical de la salinidad del Canal Jacaf.

Oxígeno disuelto

La estación EJ32 (Fig. 17), estación en la boca del fiordo, presentó valores de oxígeno disuelto con un valor máximo de $6,51 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ en superficie, para luego presentar una disminución hasta un valor mínimo de $4,16 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ centrado a 75 m de profundidad, donde siguió disminuyendo hasta un valor de $2,93 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ a 400 m de profundidad.

Mientras que en la estación EJ34 (Fig. 18), el oxígeno disuelto presentó el valor máximo de $7,09 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ a 5 m de profundidad, valor que descendió paulatinamente hasta un valor mínimo de $1,88 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ a la profundidad de 450 m de profundidad.

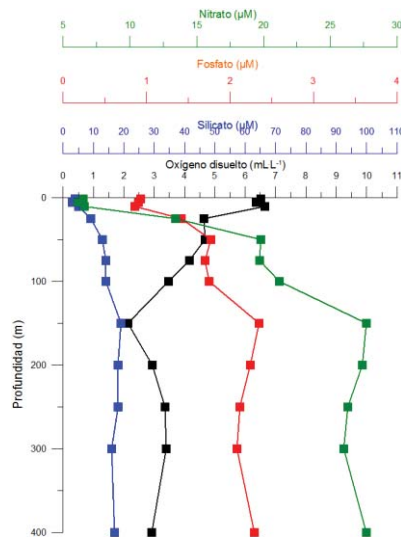


Figura 17. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EJ32 del Canal Jacaf.

Silicato

La estación EJ32 (Fig. 17), estación en la boca del fiordo, presentó valores de silicato que registraron un mínimo de valor $3 \mu\text{M}$ a 5 m de profundidad, seguido de una aumento en la concentración en profundidad que alcanzó un valor máximo de $19 \mu\text{M}$ a los 150 m de profundidad, para luego disminuir a un valor de $17 \mu\text{M}$ a 400 m de profundidad.

Mientras que en la estación EJ34 (Fig. 18), el silicato presentó el valor mínimo de $1 \mu\text{M}$ a los 5 m de profundidad, valor que aumento hasta un valor máximo de $27 \mu\text{M}$ a 450 m de profundidad.

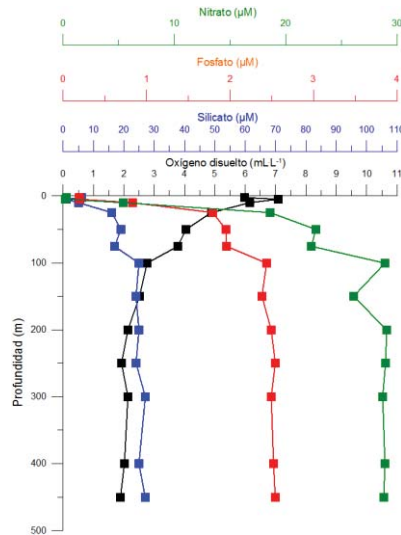


Figura 18. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EJ34 del Canal Jacaf.

Fosfato

La estación EJ32 (Fig. 17), estación en la boca del fiordo, presentó valores de fosfato que registraron un mínimo de $0,86 \mu\text{M}$ a 10 m de profundidad seguido de un aumento en la concentración en profundidad que alcanzó los $2,29 \mu\text{M}$ a los 400 m de profundidad.

Mientras que en la estación EJ34 (Fig. 18), el fosfato presentó el valor mínimo de $0,19 \mu\text{M}$ en la superficie, a los 2 m de profundidad, valor que aumentó en profundidad hasta $2,54 \mu\text{M}$ a los 450 m.

Nitrato

La estación EJ32 (Fig. 17), estación en la boca del fiordo, presentó valores de nitrato registrando un mínimo de $6,5 \mu\text{M}$ en superficie seguido de un aumento en la concentración en profundidad que alcanzó un máximo de $27,7 \mu\text{M}$ a los 400 m.

Mientras que en la estación EJ34 (Fig. 18), el nitrato presentó el valor mínimo de $0,2 \mu\text{M}$ a los 5m de profundidad, valor que aumentó en profundidad hasta $29 \mu\text{M}$ a los 250 m, para disminuir a $28,8 \mu\text{M}$ a 450 m de profundidad.

Relación Nitrato:Fosfato

Los valores de N:P presentados (Tabla 1) fueron 15,604 en la estación EJ32, con un R^2 de 0,993, y un valor de 12,655 en la estación EJ34, con un R^2 de 0,999.

N*

En el canal se observó que los valores de N* variaron entre el mínimo de -19,16, presente en la estación EJ37 a 230 m de profundidad, y el máximo de 0,16 a 2 m de profundidad en la estación EJ34.

Temperatura

28

Salinidad

La salinidad de la sección vertical del canal Sligth – Newman presentó valores que fluctuaron entre un máximo de 33,7, en la superficie en la estación ES10, en la cabeza del Estero Sligth, y el valor mínimo de 26,5, encontrado alrededor de los 152 m en la estación EN1 en la boca del Estero Sligth. En ambas cabezas de fiordos presentaron en superficie núcleos de baja salinidad, además de presentar un aumento de salinidad en profundidad.

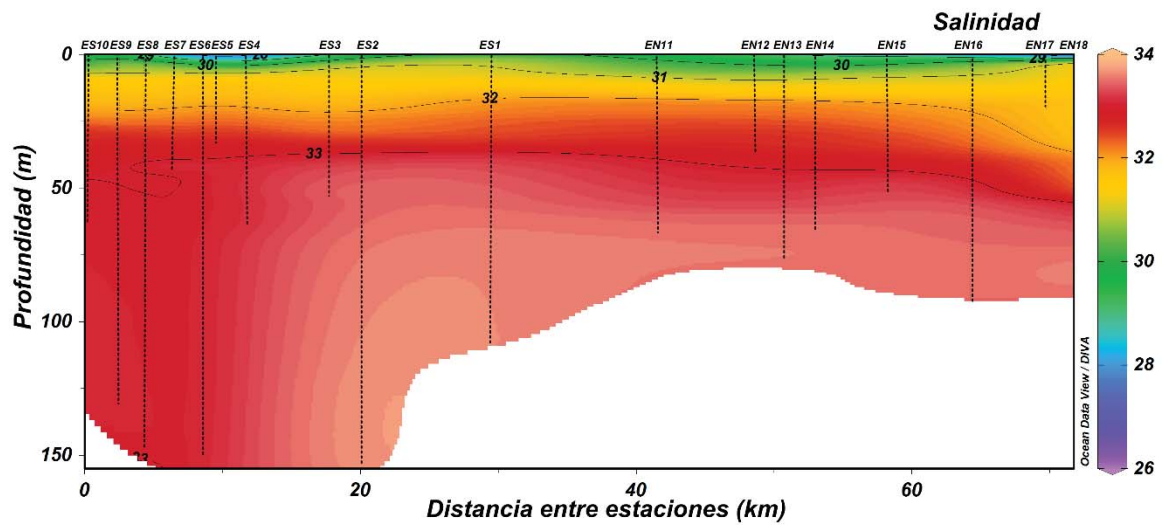


Figura 20. Sección vertical de la salinidad entre los canales Sligth y Newman.

Oxígeno disuelto

La oxígeno disuelto de la sección vertical del canal Sligth - Newman, los valores fluctuaron entre un valor máximo de $6,14 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, en la superficie en la estación ES5, y el valor mínimo de $0,51 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, encontrado alrededor de los 93 m en la estación EN16.

A lo largo del canal se presentó una disminución de los valores de la concentración del oxígeno disuelto presentando dos núcleos de valores menores a $2 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, uno en la cabeza de Estero Sligth con valores de $1,79 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ y otro en la cabeza de Seno Newman con valores de $0,76 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$.

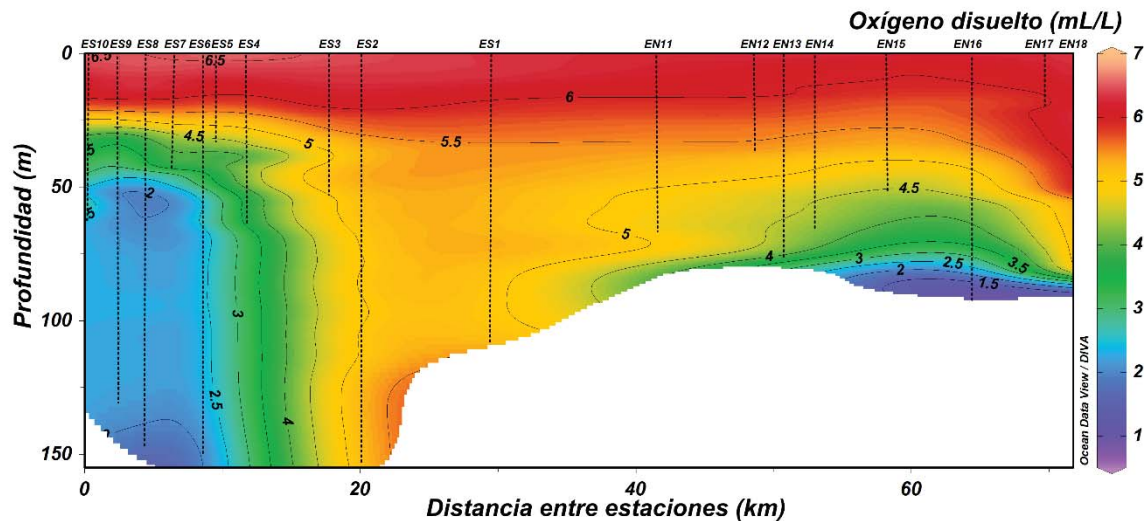


Figura 21. Sección vertical del oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$) entre los canales Sligth y Newman.

Masas de agua

A lo largo del canal entre Estero Sligth y Seno Newman se presentaron las masas de agua con valores de salinidad relacionados con ASAA, ASAAM y AE.

Se registraron valores de temperatura mayores en Estero Sligth que en Seno Newman, mientras que en términos de salinidad se observaron menores valores en las estaciones de Seno Newman.

La estación ES10, presente en la cabeza del fiordo, presento valores dentro de la distribución de masa de agua ASAAM.

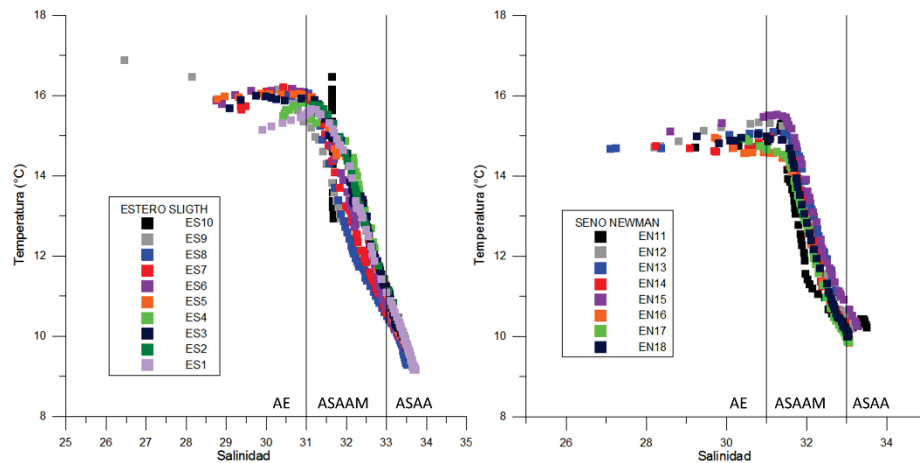


Figura 22. Diagramas TS para las estaciones del estero Sligth (derecha) y seno Newman (izquierda).

Seno Iceberg

Temperatura

La temperatura de la sección vertical del Seno Iceberg presentó una distribución donde los mayores valores de temperatura se registraron en los primeros 50 m y en la estación de la boca del fiordo, la temperatura disminuyó en profundidad y con la cercanía de las estaciones más a la cabeza del fiordo. Se registraron valores que fluctuaron entre un valor máximo de 13,35 °C, a los 20 m en la estación EI18, en la boca del Seno Iceberg, y el valor mínimo de 8,21 °C, encontrado en la superficie de la estación EI20.

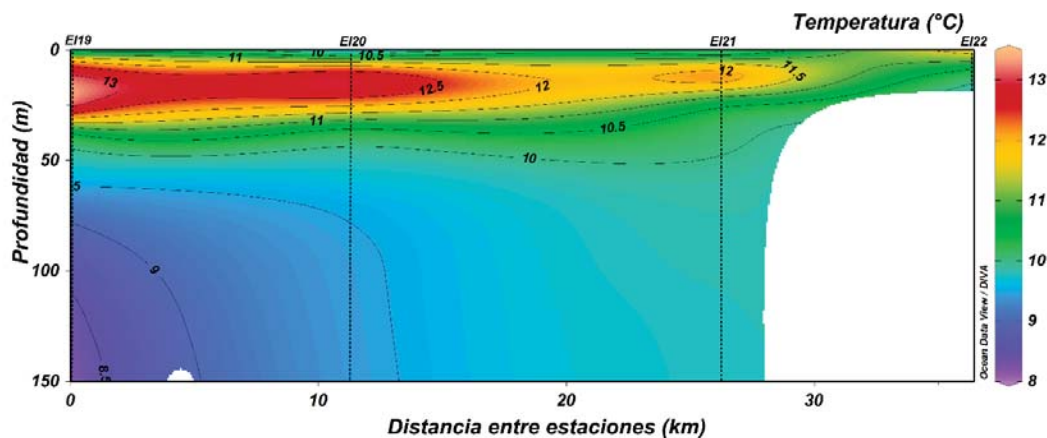


Figura 23. Sección vertical de la temperatura (°C) del Seno Iceberg.

Salinidad

La salinidad de la sección vertical del Seno Iceberg, presentó una distribución en capas con valores de salinidad que aumentaron en profundidad, donde los valores fluctuaron entre un valor máximo de 33,9, a 143 m de profundidad en la estación EI18, en la boca del Seno Iceberg, y el valor mínimo de 6,1, encontrado en la superficie de la estación EI21.

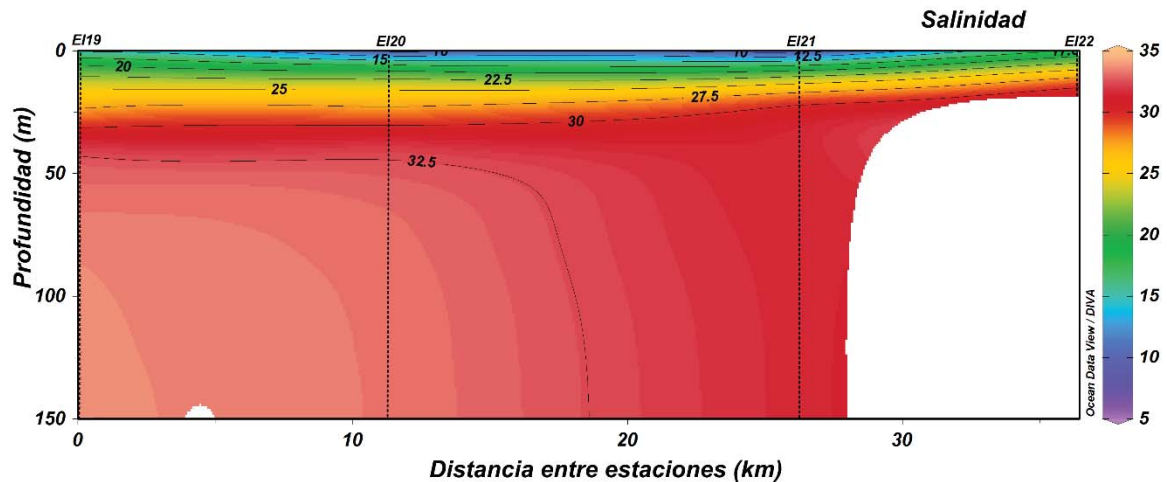


Figura 24. Sección vertical de la salinidad del Seno Iceberg.

Oxígeno disuelto

La oxígeno disuelto de la sección vertical del Seno Iceberg, donde los valores fluctuaron entre un valor máximo de 10,32 mL·L⁻¹, en la superficie de la estación EI22, en la cabeza del Seno Iceberg, y valor mínimo de 0,52 mL·L⁻¹, a 149 m de profundidad de la estación EI21.

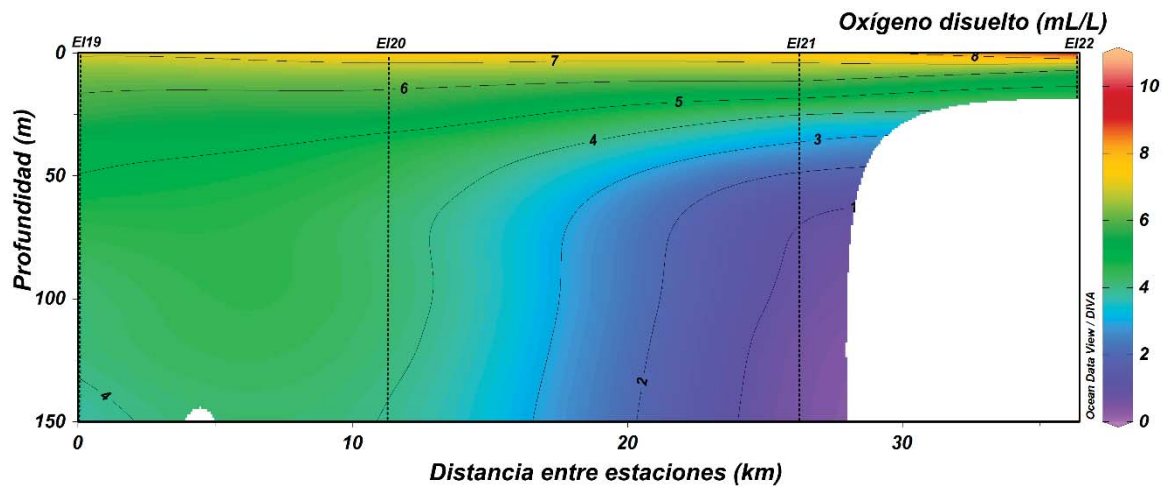


Figura 25. Sección vertical del oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$) del Seno Iceberg.

Masas de agua

Las masas de agua observadas dentro de este canal fueron ASAA, ASAAM, AES, AED y AE. Las estaciones EI 19, EI 20 y EI21 presentaron distribuciones similares en el diagrama TS, donde se observa mayor presencia de la masa de agua dentro de la distribución AE; la estación EI 22 presentó valores en su mayoría relacionados con la masa de agua AE.

En respecto a las masas de agua ASAA y ASAAM se observaron valores entre las estaciones EI19, EI20 y E21. En la estación de la boca se observó mayor presencia del ASAA mientras que con las otras dos estaciones se comparte la presencia de ASAAM.

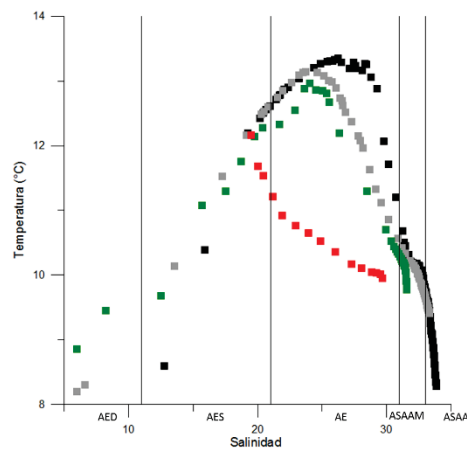


Figura 26. Diagramas TS para las estaciones del Seno Iceberg.

Fiordo Almirante Montt

Temperatura

La temperatura de la sección vertical del Fiordo Almirante Montt presento un aumento en profundidad en la estación en la cabeza de la transecta, además de registrar valores que fluctuaron entre un valor máximo de 7,41 °C, encontrado a 151 m de profundidad en la estación EAMA, en la boca del canal, y el valor mínimo de 6,35 °C, encontrado a los 7 m de profundidad en la estación de EAMA.

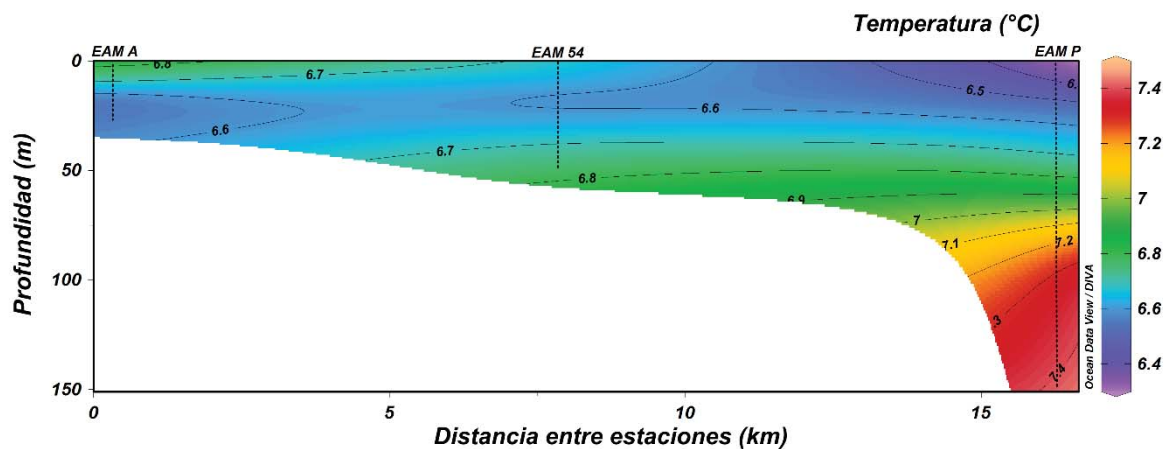


Figura 27. Sección vertical de la temperatura (°C) del Fiordo Almirante Montt.

Salinidad

La salinidad de la sección vertical del Fiordo Almirante Montt presentó valores bajos de salinidad en la estación de EAMA para ir aumentando en profundidad y hasta la estación EAMP. Se registraron valores que oscilaron entre un valor máximo de 24,5, encontrado a 151 m de profundidad en la estación EAMA, en la boca del canal, y el valor mínimo de 16,2, encontrado a 3 m de profundidad en la estación EAMP, en la cabeza del canal.

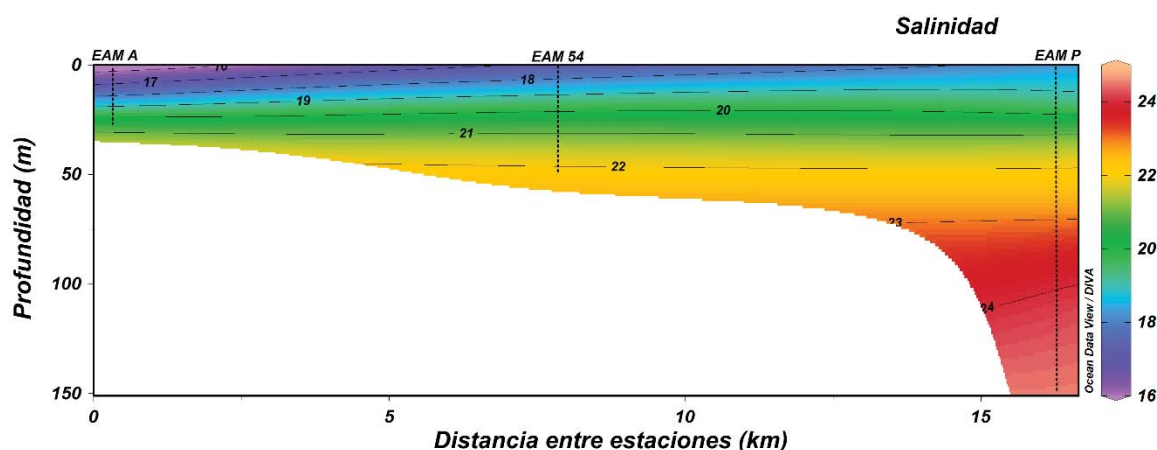


Figura 28. Sección vertical de la salinidad del Fiordo Almirante Montt.

Oxígeno disuelto

La estación EAMA (Fig. 29), ubicada en la boca del fiordo, presentó valores de oxígeno disuelto con un máximo de $7,69 \text{ mL}^{-1}$ en superficie, valor que disminuyó levemente hasta los $7,50 \text{ mL}^{-1}$ a 10 m de profundidad, para luego seguir disminuyendo, pero de manera más acentuada hasta llegar a $6,23 \text{ mL}^{-1}$ en la máxima profundidad de la estación (25 m).

En la estación EAM54 (Fig. 30), ubicada en la mitad de la transecta, la concentración de oxígeno disuelto presentó un valor máximo de $7,62 \text{ mL}^{-1}$ en superficie, valor que se mantuvo prácticamente constante hasta 10 m de profundidad, para luego disminuir de manera más marcada hasta llegar a un mínimo de valor $5,63 \text{ mL}^{-1}$ a la máxima profundidad de la estación de 50 m.

Por otra parte, en la estación EAMP (Fig. 31), ubicada en la cabeza del fiordo, la concentración de oxígeno disuelto presentó un valor máximo de $7,71 \text{ mL}^{-1}$ en superficie, valor que disminuye paulatinamente hasta aproximadamente 50 m de profundidad, llegando a un valor 6 mL^{-1} . Bajo esta profundidad comenzó una marcada disminución en las concentraciones de oxígeno disuelto, llegando al mínimo de $0,68 \text{ mL}^{-1}$ a la máxima profundidad de 150 m.

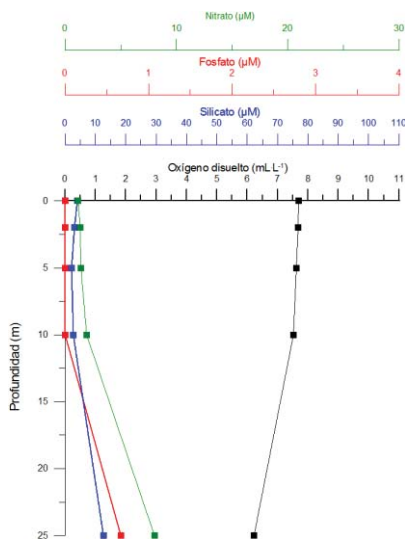


Figura 29. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EAMA del Fiordo Almirante Montt.

Silicato

La estación EAMA (Fig. 29), ubicada en la boca del fiordo, presentó valores de silicato de $4 \mu\text{M}$ en superficie, el cual disminuyó levemente hasta $2 \mu\text{M}$ a 5 m de profundidad, seguido de un aumento en la concentración en profundidad que alcanzó un valor máximo de $13 \mu\text{M}$ a los 25 m de profundidad.

En la estación EAM54 (Fig. 30), el silicato presentó el valor mínimo de $4 \mu\text{M}$ en superficie, valor que se mantuvo hasta 10 m de profundidad. Bajo esta profundidad comenzó un aumento paulatino en la concentración de silicato, llegando al máximo de $19 \mu\text{M}$ a 50 m de profundidad.

En la estación EAMP (Fig. 31), ubicada en la cabeza del fiordo el silicato tuvo su concentración mínima en superficie, con $4 \mu\text{M}$ que se mantuvieron hasta 10 m. Bajo esta profundidad comenzó un aumento paulatino hasta 50 m, alcanzando $15 \mu\text{M}$, punto a partir desde el cual se generó un aumento mucho más acentuado, llegando a valores de $77 \mu\text{M}$ a 100 m de profundidad, marcando el máximo valor del perfil. Finalmente, desde los 100 a 150 m se produjo una disminución en la concentración de silicato, llegando a $73 \mu\text{M}$.

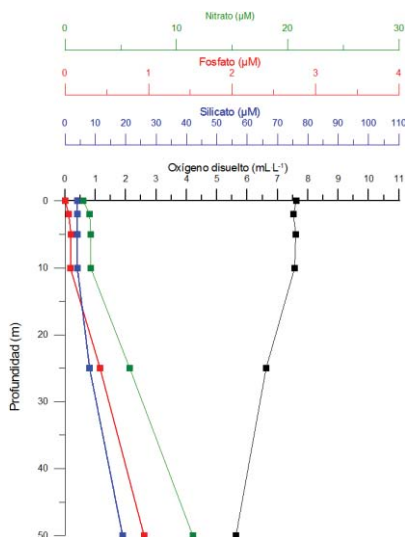


Figura 30. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EAM54 del Fiordo Almirante Montt.

Fosfato

La estación EAMA (Fig. 29), ubicada en la boca del fiordo, la concentración de fosfato en superficie y hasta 10 m de profundidad fue igual a 0 μM . Bajo ese punto, la concentración aumentó hasta alcanzar los 0,67 μM a 25 m de profundidad.

Por otra parte, en la estación EAM54 (Fig. 30), el fosfato presentó una concentración igual a 0 μM en la superficie, concentración que aumentó hasta 0,08 μM a 10 m de profundidad, punto desde el cual se produjo un marcado aumento, llegando a 0,95 μM a 50 m.

La estación EAMP (Fig. 31), ubicada en la cabeza del fiordo presentó concentraciones de 0,07 μM en superficie, seguido de un aumento paulatino hasta 50 m, alcanzando una concentración de 0,81 μM . A partir de esa profundidad se produjo un aumento más acentuado, el cual culminó con concentraciones de 3,14 μM a 150 m.

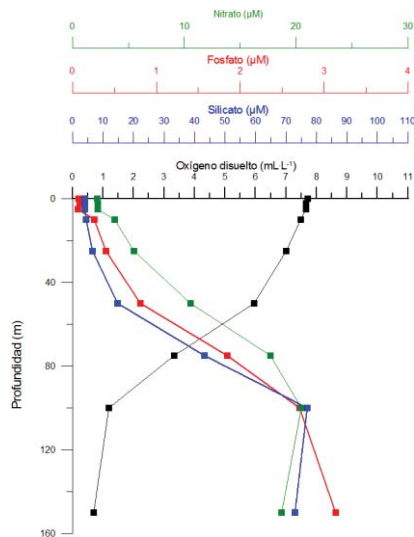


Figura 31. Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de la estación EAMP del Fiordo Almirante Montt.

Nitrato

La estación EAMA (Fig. 29) en la boca del fiordo, presentó valores de nitrato registrando un mínimo de $1,1 \mu\text{M}$ en superficie seguido de un aumento paulatino en la concentración en profundidad que alcanzó un máximo de $8,1 \mu\text{M}$ a los 25 m.

Mientras que en la estación EAM54 (Fig. 30), el nitrato presentó el valor mínimo de $1,6 \mu\text{M}$, el cual aumenta paulatinamente hasta los 50 m, con $11,5 \mu\text{M}$.

Finalmente, la estación EAM (Fig. 31) tuvo su concentración mínima en superficie, con $2,2 \mu\text{M}$, valor que aumenta paulatinamente hasta $25,0 \mu\text{M}$ a 100 m. Bajo esta profundidad ocurrió una disminución hasta $18,5 \mu\text{M}$.

Relación Nitrato:Fosfato

Se registraron los valores de relación N:P (Tabla 1) de 10,309 en la estación EAM54, con un R^2 de 0,924, y 6,142 en la estación de EAMP, con un R^2 de 0,990.

N*

Los valores de N* registrados en el canal variaron entre el mínimo de -28,66 a 150 m de profundidad en la estación EAMP y el máximo de 4,83 a 10 m de profundidad en la estación EAMA.

Análisis de covarianza relación entre el nitrato y fosfato

Los valores del análisis de covarianza se obtuvieron entre estaciones sin presencia de hipoxia y estaciones con presencia de hipoxia del mismo canal.

Tabla 2. Tabla resumen de los valores obtenidos en el análisis de covarianza de los datos de nitrato y fosfato.

Homogeneidad de las pendientes		
Estaciones	F	p
EAMP - EAM54	3,42	0,09135
EJ32 - EJ34	23,38	0,00008843
EP36 - EP42	4,65	0,04901
EP37 - EP42	4,86	0,04482
EP38 - EP42	7,16	0,01808
EP41 - EP42	1,40	0,2563

En las estaciones de Canal Puyuhuapi, obtuvieron covarianzas entre las estaciones EP36, EP37, EP 8 y EP 41 con la estación EP42, los valores de F que se obtuvieron variaron entre 1,40 y 7,16, valores obtenidos de la covarianza de las estaciones EP38 y EP41 respectivamente, además el valor p varió entre 0,018 y 0,256 para las mismas estaciones.

En el Canal Jacaf solamente se obtuvo la covarianza entre las estaciones de EJ32 y EJ34 obteniendo un valor de F de 23,38 y p de 0,000088. Asimismo en el fiordo Almirante Montt también se obtuvo la covarianza solamente entre dos estaciones, EAMP y EAM54, obteniendo un valor de F de 3,42 y un valor de p de 0,091.

DISCUSIÓN

Canales Jacaf, Puyuhuapi y Almirante Montt

La temperatura en los canales Puyuhuapi y Jacaf registraron máximos valores en superficie, lo cual se debe a la radiación solar la que presenta fluctuaciones según las estaciones del año (Schneider *et al.*, 2014). La disminución en profundidad de esta variable responde a la disminución de la influencia de la radiación solar (Libes, 1992). La salinidad, en cambio, es mínima en superficie producto del aporte directo de agua dulce característico de la zona de fiordos, lo que constituye el principal aporte de materia orgánica (Silva & Vargas, 2014). En general, a partir de aproximadamente los 15 m de profundidad, la salinidad aumenta de manera monótona, debido al ingreso de aguas más oceánicas. Esto es concordante con la mayoría de los mares interiores de Chile, en los cuales se ha registrado una estructura de dos capas. Esta capa (superficie a 20 – 30 m) es más cálida, menos salina, más oxigenada y con menor contenido de nutrientes respecto de la capa profunda (Silva & Vargas, 2014). Además, esta primera capa es comparativamente más variable y suelen estar separadas por fuertes gradientes verticales de la capa profunda que se ubica desde los 50 m hasta las profundidades máximas, tendiendo a ser más uniforme (Rojas, 2015). Probablemente, en nuestro estudio, las similitudes de la estructura termal y halina de la columna de agua, a lo largo de toda la transecta en estos dos canales, se debe a la proximidad geográfica y conexión que ambos sitios presentan.

La concentración de nutrientes (nitrato y fosfato) en la cabeza del Canal Puyuhuapi presentaron una estructura vertical definida como P-N2 (Silva & Calvete, 2002), la cual se caracteriza por una baja concentración de nutrientes en superficie, debido al consumo de estos por parte de los microorganismos fotosintetizadores, seguido por un aumento en profundidad de los nutrientes por efecto de la remineralización de la materia orgánica, sumado a la advección desde la zona exterior del canal de aguas profundas con comparativamente mayor contenido de nutrientes (Silva *et al.*, 1997).

Hacia la mitad y boca del fiordo, se encontró una estructura P-N1 la cual, al igual que la mayoría de los perfiles de nutrientes tiene una baja concentración superficial producto del

consumo por parte del fitoplacton (Rojas, 2015). La mezcla de agua fluvial y de los deshielos de los glaciares pueden limitar la disponibilidad de nutrientes, debido a que estas aguas cuentan con concentraciones de nitrato y fosfato menores que los del agua de mar superficial (Silva & Calvete, 2002). En la capa profunda de esta estructura, la remineralización de la materia orgánica que decanta desde la superficie provoca un aumento de los nutrientes de la columna de agua y genera una nutriclina superior que separa esta capa de la superficial. Esta estructura suele ser la más frecuentemente encontrada en los canales de la zona (Silva & Calvete, 2002).

Por otra parte, las concentraciones de silicatos en la cabeza del Canal Puyuhuapi presentaron un máximo superficial, seguido de un mínimo subsuperficial y un posterior aumento paulatino de su concentración hacia las capas más profundas, correspondiendo a una estructura Si₆, en la que el máximo superficial se debe a el aporte de silicatos provenientes de las aguas fluviales y el escurrimiento costero (Aston, 1980). En general, este nutriente es consumido por organismos en la capa subsuperficial, generándose un mínimo, seguido de un leve y constante incremento, la concentración de silicatos, producto de la remineralización de la materia orgánica. En cambio hacia la boca se encontró una estructura Si₄, en la cual el máximo superficial, el siguiente mínimo subsuperficial y el posterior aumento está asociado a la remineralización, siguiendo el mismo patrón que el registrado en la cabeza, pero al estar ubicados hacia la boca del fiordo ocurre una mayor mezcla con aguas marinas que contienen una mayor densidad y presentan bajas concentraciones de silicatos, lo que da origen a un nuevo mínimo subsuperficial (Silva & Calvete, 2002).

Por su parte, en la cabeza del Canal Jacaf se registró una estructura para el fosfato y nitrato de P-N₁ y hacia la boca se observó la estructura P-N₃, donde el aumento subsuperficial de la concentración de estos nutrientes, producto de la remineralización, se incrementa con la profundidad debido a la advección de aguas más ricas en nutrientes de origen ecuatorial subsuperficial (Rojas, 2015). Estas concentraciones nuevamente disminuyen con la profundidad debido al ingreso del Agua Intermedia Antártica las cuales son comparativamente más pobres en nutrientes (Silva & Calvete, 2002).

Respecto al silicato, se registró una estructura Si1, la cual se caracterizó por un mínimo superficial y un máximo en profundidad. Esto se debe principalmente a la presencia de aguas marinas con comparativamente bajos contenidos de silicato (Silva & Vargas, 2014), sumado al consumo de nutrientes por parte del fitoplancton. En la boca del fiordo, se observó una estructura Si8, caracterizada por registrar menores concentraciones superficiales, asociado a la presencia de aguas marinas y el consumo por parte de organismos. Sin embargo, el aumento subsuperficial se genera por remineralización de materia orgánica y la subsiguiente fluctuación se produce por advección de aguas con mayor y menor concentración de silicato, respectivamente (Silva & Calvete, 2002).

Los canales Jacaf y Puyuhuapi presentaron una distribución vertical de oxígeno disuelto conocida como O-pH1, la cual, cuenta con un máximo superficial generado por el intercambio océano – atmósfera, y su consumo en profundidad está asociado a los procesos de degradación de materia orgánica (Schneider *et al.*, 2014). En ambos canales, se registró una estructura O-pH3 hacia su boca, caracterizada por tener una intrusión de agua más oxigenada, pero que no alcanzan áreas más profundas (Silva & Calvete, 2002).

La distribución de la concentración de oxígeno disuelto en los canales de Puyuhuapi y Jacaf, se registraron 5 estaciones con concentraciones que oscilaron entre 1,99 a 1,33 mL·L⁻¹, correspondientes a una condición de hipoxia. Estas estaciones registraron niveles de baja saturación como resultado de la respiración de la materia orgánica particulada, autóctona y alóctona (Silva & Vargas, 2014). Además, se ha observado que las aguas poco oxigenadas de la AESS y las aguas costeras bajo el nivel de los 150 m fluyen hacia los fiordos Jacaf y Puyuhuapi reduciendo la capacidad de ventilación y favoreciendo la generación de hipoxia (Silva & Vargas, 2014).

En toda esta área, se ha encontrado de manera consistente la condición de hipoxia, manteniéndose los niveles de oxígeno disuelto sobre 1 mL·L⁻¹. Sin embargo, a pesar de estas bajas concentraciones de oxígeno disuelto, nunca se ha registrado anoxia, lo que implicaría que existe algún tipo de mecanismo de ventilación que mantendría el oxígeno disuelto sobre 1 mL·L⁻¹. En este aspecto, Pérez–Santos (2017) registró un evento de ventilación en la zona

hipóxica de Puyuhuapi que duro un poco más de un mes, pero los mecanismos oceanográficos asociados aún son poco conocidos.

En el Fiordo Almirante Montt, se registraron bajas temperaturas en la superficie y en la cabeza. Un patrón similar fue observado con la salinidad, la cual fue significativamente menor en superficie en comparación con el fondo. Esto se debe a que estas aguas están influenciadas por el agua dulce proveniente de la persistente precipitación, escorrentía y el derretimiento de nieve, y hielo (Schneider *et al.*, 2014). Sin embargo, en las estaciones EAMA y EAM54 la profundidad máxima varió entre 35 a 50 m. En esta columna de agua, la temperatura se mantuvo prácticamente constante, pero no así la salinidad, la cual presentó una mayor estratificación, con una variación de halina de hasta 6. En cambio, en la estación EAMP, la cual tiene una profundidad máxima de 150 m, la salinidad y la temperatura incrementaron significativamente sus valores. Este aumento ocurre debido a que la baja profundidad de las estaciones anteriores, llamada Constricción Kirke, actúa de manera similar a la Constricción de Meninea, descrita por Silva *et al.* (1998). En este punto el agua estuarina salada de la capa de entre 25 y 50 m pasa sobre el umbral hacia el Fiordo Almirante Montt hundiéndose bajo las capas menos densas, llenando la cuenca con agua proveniente del Canal Smyth y el Seno Unión (Sievers *et al.*, 2002).

Los de nutrientes en Almirante Montt presentaron una estructura de P-N6 en la cabeza, resultado de la advección profunda de aguas con menor contenido de fosfato y nitrato (Silva & Calvete, 2002). En cambio, las estaciones, EAM 54 y EAM A, presentaron una estructura P-N2. Estos dos tipos de distribución vertical de nutrientes encontrados en Fiordo Almirante Montt concuerdan con el ingreso de agua proveniente de otros fiordos.

Las concentraciones de oxígeno disuelto presentaron la misma distribución vertical a lo largo de todo el fiordo, con las mayores concentraciones en superficie y una disminución paulatina hacia la máxima profundidad. Sin embargo, en la estación EAM P el valor encontrado a la máxima profundidad fue de $0,68 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, correspondiente a hipoxia. Esta condición se puede explicar en términos de renovación de agua profunda debido a la

depresión de aproximadamente 200 m ubicada en la cabeza del fiordo y que actúa como un estanque aislado (Silva & Vargas, 2014).

En todos los fiordos estudiados en los que se contó con información de nutrientes (i.e. Canal Jacaf, Canal Puyuhuapi y Fiordo Almirante Montt) la relación N:P fue menor a Redfield lo que representa que el nitrato es limitante en el ambiente (Rojas, 2015). Estos bajos valores de la relación N:P, al menos en la capa superficial responderían no tan solo a la actividad fotosintética, sino que también al gran aporte de agua dulce (Rojas, 2015). Esta condición no es anómala en la Patagonia chilena puesto que estos fiordos se caracterizan por tener una relación N:P menor a Redfield (Rojas, 2015). La relación N:P promedio de la zona norte de la Patagonia fue de 12 ± 1 y habría sido generada por la mezcla de agua dulce proveniente del continente con relaciones N:P bajas (2,7:1) y con aguas aportadas por el océano adyacente que poseen relaciones N:P comparativamente mayores (11:1 ASAA y 12:1 AEES) (Rojas, 2015).

Para interpretar las relaciones de Redfield Gruber & Sarmiento (1997) definieron el parámetro de N^* para evaluar si estas desviaciones se generan producto de la desnitrificación o de la fijación de N_2 . Así, los valores menores a 2,9 indican un déficit de nitrato y los valores mayores a 2,9 indican exceso de nitrato (Silva *et al.*, 2009). Un ejemplo de esto sería que en el Océano Pacífico el N^* varía entre -4 y 3, donde los valores menores son predominantes en el Pacífico Tropical Oriental y el valor -4 se presenta en las principales zonas de mínimo oxígeno donde la desnitrificación de la columna de agua ocurre activamente (Anderson & Sarmiento, 2006).

Para el caso de los canales interiores Silva *et al.* (2009) determinó el ingreso del núcleo de AEES a 150 m de profundidad utilizando N^* como un trazador conservativo de esta masa de agua. En aquel trabajo se afirmó que un N^* menor a -5 son representativos de esta masa de agua, afirmando que este valor de N^* se puede tomar como referencia de la señal oceánica que ingresa a los canales interiores.

En el caso del Canal Puyuhuapi los valores de N^* fueron positivos, pero cercanos a 0 en superficie y disminuyeron con el aumento de la profundidad lo que concuerda con el

ingreso de AESS. Esta distribución vertical ya fue sido observada en la zona de canales y fiordos durante invierno y primavera (Rojas 2015). En cambio, en el Canal Jacaf, si bien, desde la cabeza hasta la mitad del fiordo se observó la misma distribución vertical de N^* que en Puyuhuapi, en la boca presentó valores negativos en toda la columna de agua.

En el Fiordo Almirante Montt la relación N:P también fue menor a Redfield, indicando que el nitrógeno es un nutriente limitante en la columna de agua, pero no estaría relacionado con los valores de N^* obtenidos en nuestro estudio. Con excepción de la estación ubicada en la cabeza del fiordo, el Fiordo Almirante Montt registró hasta los 10 m de profundidad existe un exceso de nitrato e incluso los valores de N^* fueron positivos en prácticamente toda la columna de agua en las estaciones EAMA y EAM54. En cambio, en la estación EAMP los valores de N^* pasaron a ser negativos después de los 50 m, registrándose a los 75 m un N^* de -8,9. Este valor no está asociado al ingreso de AESS puesto que esta no llega hasta estas latitudes (Sievers & Silva, 2008). A los 100 m el N^* fue cercano a -20 y a los 150 m fue de -28,66; este último valor podría estar asociado con núcleos de máximo secundario de nitrito y un mínimo de nitrato, el que se ve en la figura 31, aunque este patrón fue registrado por Silva *et al.* (2009) solo para aguas oceánicas y podría no cumplir de la misma forma en los fiordos.

Pocos sitios presentaron un valor de N^* positivo, mayores a 2,9, condición necesaria para la ocurrencia de la fijación de nitrógeno. Por lo tanto, se estima que este proceso no sería importante para la zona (Rojas, 2015). En cambio, la mayoría de los fiordos del estudio presentaron valores de N^* negativos, por lo que se esperaría la desnitrificación como proceso dominante. Sin embargo, las condiciones óxicas no son favorables para la ocurrencia del proceso, puesto que solo se ha registrado desnitrificación a partir de concentraciones menores a $0,5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ (Naqvi *et al.*, 2010; Silva & Vargas, 2014; Rojas, 2015). De manera que otros procesos podrían ser responsables de los N^* negativos como fuentes de bajas relaciones de N:P, como es el caso de los ríos de la zona, cambio de comunidades y dinámica de la circulación (Soto – Mardones *et al.*, 2009; Cáceres *et al.*, 2010; Letelier *et al.*, 2011; Rojas, 2015).

En este aspecto es posible que las concentraciones de oxígeno disuelto se encuentren por sobre $0,5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, pero los valores de N^* sean negativos indican que la relación Redfield de 16:1 no es directamente aplicable para ciertos sectores de los fiordos chilenos. Esto podría deberse a la presencia de diferentes tipos de fitoplancton (marinas, estuarinas y continentales), los cuales podrían tener una relación estequiométrica de N:P diferente a la planteada por Redfield (1934) para el fitoplancton marino o por la influencia de materia orgánica de origen terrestre. Así, es necesario contar con mayor información sobre las características hidrográficas, químicas, el origen de la materia orgánica autóctona y alóctona y composición química del fitoplancton.

Canales Newman, Sligth y Iceberg

En los canales Newman, Sligth y Iceberg la temperatura, salinidad y concentración de oxígeno disuelto tuvieron una distribución similar, pero con valores distintos. En general, se observó una estructura de dos capas, típica de los fiordos de la Patagonia chilena, caracterizada por presentar bajas temperaturas superficiales, asociadas a la cabeza de los fiordos, y un aumento rápido en profundidad, lo que produce unas termoclina y haloclina bien definidas (Rojas, 2015).

El Seno Iceberg fue el que presentó la menor temperatura superficial, asociado a la cercanía inmediata del glaciar Tempanos, perteneciente a los Campos de Hielo Sur. Esta distribución vertical de la temperatura concuerda con lo registrado por Silva & Calvete (2002), presentando una estructura del tipo T3 con un mínimo superficial y un máximo térmico subsuperficial seguido de una disminución monótona hacia el fondo. La salinidad presentó una estructura tipo S1, generada por el efecto de agua dulce, el cual está provocando que la capa superior presente salinidades significativamente más bajas en las cabezas de los canales, sumado al forzante adicional del viento lo que genera una capa de mezcla superficial que caracteriza este fiordo (Silva & Calvete, 2002).

Respecto a las masas de agua en los fiordos, es posible identificarlos utilizando tan solo la salinidad (Schneider *et al.*, 2014), lo cual se ve reflejado en las figuras 22 y 26. En este aspecto en el Estero Sligth y Seno Newman, en superficie y hasta 15 m, existe una

predominancia del Agua Estuarina (AE). Entre los 15 m y aproximadamente 45 m se registró el Agua Subantártica Modificada (ASAAM), mientras que a partir de 50 m hasta la máxima profundidad se registró la masa de Agua Subantártica (ASAA). Cabe destacar que estos fiordos se encuentran en la zona norte del Golfo de Penas, región en la que se ha detectado el ASAA de 0 a 150 m, AESS de 200 a 300 m y AIAA con un núcleo en los 600 m (Sievers, 2008). Sin embargo, sólo el ASAA fue registrada en los fiordos de esta zona, lo que puede deberse a que las características topográficas del Golfo de Penas, y los distintos canales, que no permiten el ingreso de estas masas de agua a la zona. Esta hipótesis se ve sustentada en que la máxima profundidad medida entre estos dos canales es tan solo de 150 m, lo que coincide con el ingreso de ASAA, pero no de AESS ni AIAA. En cambio, las masas de agua del Seno Iceberg en la capa superficial fueron AED, hasta los 7 m, AES hasta aproximadamente los 10 m, una capa un poco más significativa de AE hasta cerca de 30 m, de ese punto y hasta los 50 m se encontró ASAAM y luego ASAA hasta el lecho marino. Esta amplia variabilidad se debe al fuerte gradiente de salinidad descrito con anterioridad (Sievers *et al.*, 2002).

La concentración de oxígeno disuelto por su parte registró valores de hipoxia en los tres fiordos siendo el mínimo encontrado en Seno Iceberg con $0,52 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, seguido de Seno Newman con una concentración de $0,76 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ y finalmente Estero Sligth con $1,79 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$. En el caso de Seno Iceberg las concentraciones de oxígeno disuelto fueron significativamente menores a las encontradas por Silva & Vargas (2014). Además, los otros dos fiordos no habían sido investigados previamente y, por lo tanto, tampoco habían sido indicados como zonas de posible hipoxia, puesto que las zonas registras que presentaban condiciones de hipoxia hasta el año 2014 en la Patagonia eran Puyuhuapi, Jacaf, Aysén y el Golfo Almirante Montt (Silva & Vargas, 2014).

Las zonas de fiordos de la Patagonia incluyen una serie de canales que presentan unas condiciones de muy baja navegabilidad lo que impide que muchos cruceros científicos puedan hacer un estudio acabado de todos los lugares. Bajo este aspecto, no existen registros de mediciones de oxígeno disuelto con los cuales contrastar los obtenidos en este trabajo, por lo menos, en el caso de Sligth y Newman, pero debido a la compleja dinámica de esta región

y de los sistemas de hipoxia en particular no es acertado descartar que estos fiordos pudiesen sumarse a los sitios ya conocidos por presentar hipoxia permanente o temporal. De hecho, hasta comienzos del año 2014 el único canal de la Patagonia chilena que presentaba condiciones de hipoxia era el Canal Puyuhuapi (Schneider *et al.*, 2014), y como se mencionó anteriormente durante ese mismo año tres lugares más se añadieron a la lista. Esto implica que es necesario realizar una nueva campaña a estos canales para observar y registrar las concentraciones de oxígeno disuelto y nutrientes con la intención de poder identificar si es que efectivamente se trata de zonas de hipoxia.

Este trabajo aporta al conocimiento en la zona de fiordos de la Patagonia chilena con la incorporación de mayores antecedentes sobre la relación N:P y N* para el Fiordo Almirante Montt, y la incorporación del Seno Iceberg, Seno Newman y Estero Sligth a la lista de lugares con hipoxia en canales australes.

CONCLUSIÓN

- En los canales de Jacaf y Puyuhuapi existe una zona de hipoxia bien definida la cual presenta valores de nitrato:fosfato de $12,5 \pm 2$ y un N^* medio de -5,88.
- En el Fiordo Almirante Montt se detectó un ambiente de hipoxia generado por la poca ventilación de las aguas profundas debido a las características geográficas cercanas a la cabeza del fiordo. En esta zona de hipoxia los valores de nitrato:fosfato y N^* fueron de 8,22 y -24,32, respectivamente.
- Las masas de agua que componen la columna de agua del Estero Sligth y Seno Newman son Agua Estuarina Salobre, Agua Subantartica Modificada y Agua Subantartica, desde la superficie hasta la zona más profunda.
- Las concentraciones de oxígeno disuelto registrados en nuestro estudio se registraron con valores por sobre $0,5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, pero los valores de N^* fueron negativos, lo cual puede implicar que la relación Redfield de 16:1 no es directamente aplicable para ciertos sectores de los fiordos chilenos. Esto podría deberse a la presencia de diferentes tipos de fitoplancton (marinas, estuarinas y continentales), los cuales podrían tener una relación estequiométrica de N:P diferente a la planteada por Redfield para el fitoplancton marino o la influencia de la materia orgánica de origen terrestre.
- Es necesario contar con mayor información sobre las características hidrográficas, químicas de la columna de agua y evaluar la importancia de la materia orgánica terrestre en los fiordos y canales australes.

REFERENCIAS

- Aiken, C. 2012. Seasonal thermal structure and exchange in Baker Channel, Chile. *Dynam. Atmos. Oceans*, 58: 1 -19.
- Anderson, J., A. Okubo, A. Robbins & F. Richards. 1982. A model for nitrite and nitrate distributions in oceanic oxygen minimum zones. *Deep-Sea Res.*, 29, 1.113 – 1.140.
- Aston, S. 1980. Nutrients, dissolved gases and general biogeochemistry in estuaries. In *Chemistry and biogeochemistry of estuaries*. E. Olausson and I. Cato Eds. John Wiley, 450 pp.
- Araya, J. 1997. Perfiles geomorfológicos de los fiordos y depresión longitudinal de norpatagonia. *Cienc. Tecnol. Mar.*, 20: 3 – 20.
- Atlas, E., S. Hager, L. Gordon & P. Park. 1971. A practical manual for use of the Technicon Autoanalyser in sea water nutrient analyses. En: *Technical Report*, Oregon State University, Department of Oceanography, 1 – 215 pp.
- Avaria, S., D. Cassis, P. Muñoz & P. Vera. 1997. Distribución de microfitoplancton marino en aguas interiores del sur de Chile en octubre de 1995 (crucero CIMAR 1Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 20: 107 – 123.
- Avaria, S., C. Cáceres & P. Muñoz. 2004. Distribución del microfitoplancton marino entre el golfo Corcovado y el estero Elefantes en la primavera de 1998 y en el verano de 1999 (crucero CIMAR 4 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 27 (1): 17 – 47.
- Bendschneider, K. & R. Robinson. 1952. A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, 11: 87 – 96.
- Bertrand, S., K. Huguen, J. Sepúlveda & S. Pantoja. 2012. Geochemistry of surface sediments from the fjords of Northern Chilean Patagonia (44 – 47°S): Spatial variability and implications for paleoclimate reconstructions. *Geochim. Cosmochim. Ac.*, 76: 125 – 146.
- Cáceres M., A. Valle-Levinson, J. Belmar, M. Bello & M. Castillo. 2010. Variabilidad transversal del flujo y salinidad en Paso Nao. *Cienc. Tecnol. Mar.*, 33 (2): 45 – 58.
- Carpenter, J. 1965. The Chesapeake bay institute technique for the Winkler dissolved oxygen method. *Limnol. Oceanogr.*, 10: 141 – 143.
- Castillo, M., U. Cifuentes, O. Pizarro, L. Djurfeldt & M. Cáceres. 2016. Seasonal hydrography and surface outflow in a fjord with a deep sill: the Reloncaví fjord, Chile. *Ocean Sci.*, 12: 533 – 544.
- Codispoti, L. & T. Packard. 1980. Denitrification rates in the eastern tropical South Pacific. *J. Mar. Res.*, 38 (3): 453 – 477.
- Coloma, K. 2016. Variabilidad intramareal de la temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes inorgánicos en el fiordo Reloncaví y golfo Corcovado (CIMAR 12 y 17 Fiordos). Trabajo de Titulación de Oceanografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 96 pp.
- Correll, D. 1998. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Qual.*, 27(2): 261 – 266.

- Davidson, K., R. Gowen, P. Tett, E. Bresnan, P. Harrison, A. McKinney, S. Milligan, D. Mills, J. Silke & A. Crooks. 2012. Harmful algal blooms: How strong is the evidence that nutrient ratios and forms influence their occurrence?. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 115: 399 – 413.
- Díaz, R. & R. Rosenberg. 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural response of benthic macrofauna. *Oceanogr. Mar. Biol.*, 33: 245 – 303.
- Díaz, R. 2001. Overviews of hypoxia around the world. *J. Environ. Qual.*, 30 (2): 275 – 281.
- Farmer, D. & H. Freeland. 1983. The physical oceanography of fjords. *Prog. Oceanog.*, 12 (2): 147 – 194.
- González, H., L. Castro, G. Daneri, J. Iriarte, N. Silva, F. Tapia, E. Teca & C. Vargas. 2013. Land–ocean gradient in haline stratification and its effects on plankton dynamics and trophic carbon fluxes in Chilean Patagonian fjords (47–50°S). *Prog. Oceanog.*, 119: 32 – 47.
- Grasshoff, K., M. Ehrhardt & K. Kremling. 1983. Methods of seawater analysis. Verlag Chemie, New York, 419 pp.
- Gray, J., R. Wu & Y. Or. 2002. Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 238: 249 – 279.
- Gruber, N. & J. Sarmiento. 1997. Global patterns of marine nitrogen fixation and denitrification. *Global Biogeochem. Cy.*, 2: 235 – 266.
- Guzmán, D. 2000. Caracterización física y química de los canales australes y estimación del tiempo de residencia y balance de sal, agua y nutrientes en el seno Aysén. Trabajo de Titulación de Oceanografía, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 80 pp.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). 2017. Según cifras preliminares del Censo 2017, población censada en Chile llega a 17.373.831 personas. Página [<http://www.ine.cl/prensa/detalle-prensa/2017/08/31/segun-cifras-preliminares-del-censo-2017-poblacion-censada-en-chile-llega-a-17373831-personas>]. Revisado: 27 de noviembre de 2017.
- Iriarte, J., H. González & L. Nahuelhual. 2010. Patagonian fjord ecosystems in southern Chile as a highly vulnerable region: Problems and needs. *AMBIO*, 39 (7): 463 – 466.
- Jennings, A. & G. Helgadottir. 1994. Foraminiferal assemblages from the fjords and shelf of eastern Greenland. *J. Foraminiferal Res.*, 24 (2): 123 – 144.
- Jessen, G., A. Lichtschlag, A. Ramette, S. Pantoja, P. Rossel, C. Schhubert, U. Struck & A. Boetius. 2017. Hypoxia causes preservation of labile organic matter and changes seafloor microbial community composition (Black Sea). *Sci. Adv.*, 3 (2): 1 – 14.
- Lefort, S., Y. Gratton, A. Mucci, I. Dadou & D. Gilbert. 2012. Hypoxia in the lower St. Lawrence estuary: How physics controls spatial patterns. *J. Geophys. Res.*, 117: 1 – 14.
- Letelier, J., L. Soto, S. Salinas, P. Osuna, D. López, H. Sepúlveda, E. Pinila & C. Rodrigo. 2011. Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región norte de los fiordos patagónicos de Chile. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 46 (3): 363 – 377.
- Libes, S. 1992. An introduction to marine biogeochemistry. Ed. J. Wiley and Sons Inc. New York, 734 pp.
- Naqvi, S., H. Bange, L. Farías, P. Monteiro, M. Scranton & J. Zhang. 2010. Marine hypoxia/anoxia as a source of CH₄ and N₂O. *Biogeosciences*, 7, 2.159–2.190.

- Open University. 1999. Waves, Tides and Shallow – Water Processes. Butterworth-Heinemann, Oxford, Reino Unido, 227 pp.
- Palma, S. & N. Silva. 2004. Distribution of siphonophores, chetognaths, euphausiids and oceanographic conditions in the fjords and channels of southern Chile. *Deep-Sea Res.*, II (51): 513 -535.
- Pantoja, S., J. Iriarte & G. Daneri. 2011. Oceanography of the Chilean Patagonia. *Cont. Shelf Res.*, 31: 149 – 153.
- Paskoff, R. 2010. Geomorfología costera. Díaz Naveas, J. & J. Frutos (eds) 2010. *Geología Marina de Chile*. Comité Oceanográfico Nacional de Chile - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile, 115 pp.
- Perez – Santos, I. 2017. Deep ventilation event during fall and winter 2015 in the Puyuhuapi Fjord (44.6°S). *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 45(1), 223 – 227.
- Pickard, G. 1963. Oceanographic characteristics of inlets of Vancouver island, British Columbia. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 20 (5): 1.109 – 1.143.
- Pickard, G. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *J. Fish. Bd. Canada*, 28: 1.077 – 1.106.
- Powell, R. & B. Molnia. 1989. Glacimarine sedimentary processes, facies and morphology of the south-southeast Alaska shelf and fjords. *Mar. Geol.*, 85: 359 – 390.
- Redfield, A. 1934. On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton. En: *James Johnstone Memorial Volume*. (ed. R.J. Daniel). University Press of Liverpool, 177 – 192 pp.
- Rojas, N. 2015. Evaluación de relación de Redfield, en la zona de los fiordos norpatagónicos chilenos. Tesis de Magister en Oceanografía, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 101 pp.
- Sarmiento, J. & N. Gruber. 2006. *Ocean Biogeochemical Dynamics*. Princeton University Press. New Jersey, 503 pp.
- Savrda, C. & D. Bonjer. 1991. Oxygen-related biofacies in marine strata: an overview and update. En *Modern and ancient continental shelf anoxia*. R. Tyson & T. Pearson (eds), *Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia* Geological Society, London: Geological Society, 201 – 219 pp.
- Schneider, W., I. Pérez-Santos, L. Ross, L. Bravo, R. Seguel & F. Hernández. 2014. On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia. *Prog. Oceanog.*, 129, 8 – 18.
- Sepúlveda, J., S. Pantoja & K. Huguen. 2011. Sources and distribution of organic matter in northern Patagonia fjords, Chile (~44 – 47°S): A multi-tracer approach for carbon cycling assessment. *Cont. Shelf Res.*, 31: 315 – 329.
- Sievers H. & N. Silva, 2006. Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. En: N. Silva & S. Palma (eds.). *Avances en el Conocimiento Oceanográfico de las Aguas Interiores Chilenas, Puerto Montt a Cabo de Hornos*. Comité Oceanográfico Nacional, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 53–58.
- Sievers, H. & N. Silva. 2008. Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. En: N. Silva & S. Palma (eds.). *Avances en el conocimiento océano-gráfico de las aguas interiores*

- chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 53 – 58.
- Sievers, H., C. Calvete & N. Silva. 2002. Distribución de características físicas, masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR - Fiordo 2), Chile. *Cienc. Tecnol. Mar.*, 25 (2): 17 – 43.
- Silva, N. & A. Valdenegro. 2008. Caracterización oceanográfica de canales australes chilenos entre la boca del Guafo y los canales Pulluche – Chacabuco (CIMAR 8 fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 31 (1): 05 – 44.
- Silva, N. & C. Calvete. 2002. Características físicas y químicas de canales australes chilenos entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR – Fiordo 2). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 25 (1): 23 – 88.
- Silva, N., C. Calvete & H. Sievers. 1997. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 20: 23 – 106.
- Silva, N., C. Calvete & H. Sievers. 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR-Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 21: 17 – 48.
- Silva, N. & C. Vargas. 2014. Hypoxia in Chilean Patagonian fjords. *Prog. Oceanog.*, 129: 62 – 74.
- Silva, N., N. Rojas & A. Fedele. 2009. Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep-Sea Res. II* (56): 1.004 – 1.020.
- Silva, N., P. Reinoso & G. Arancibia. 2008. Distribución vertical de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes, en la sección estero Reloncaví a Boca del Guafo. En: Comité Oceanográfico Nacional (ed.), *Resultados del Crucero CIMAR- Fiordo 17, Resúmenes ampliados*. CONA, Valparaíso: 25 – 34.
- Silva, N. & S. Neshyba. 1977. Corrientes superficiales frente a la costa austral de Chile. *Cienc. Tecnol. Mar.*, 3: 37 – 42.
- Silva, N. & S. Neshyba. 1980. Masas de agua y circulación geostrofica frente a la costa de Chile Austral. *Serie Científica. Instituto Antártico Chileno*, 25/26: 5 – 32.
- Silva, N. & S. Palma (eds.). 2006. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 167 pp.
- Soto – Mardones, L., J. Letelier, S. Salinas, E. Pinillas & J. Belmar. 2009. Análisis de parámetros oceanográficos y atmosféricos del seno Reloncaví. *Ganaya*, 73 (1), 141 - 155.
- Stanton, B. 1984. Some oceanographic observations in the New Zeland's fjords. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 19: 89 – 104.
- Stingebrandt, A. & J. Aure. 1989. Vertical mixing in basin eaters of fjords. *J. Phys. Oceanogr.*, 19: 917 – 926.
- Strickland, J. & T. Parsons. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada. Bulletin 167 (Second Edition), 310 pp.

- Syvitski, J. 1989. On the deposition of sediment within glacier-influenced fjords: oceanographic controls. *Mar. Geol.*, 85: 301 – 329.
- Syvitski, J., D. Burrell & J. Skei. 1987. *Fjords: Processes and products*. Springer – Verlag. New York Inc., USA, 380 pp.
- UNESCO. 1983. Chemical methods for use in marine environmental monitoring. Intergovernmental Oceanographic Commission. Manual and Guides #12, 56 pp.
- Valenzuela, M. & S. Avaria. 2009. Distribución del microfitoplancton marino entre el seno Reloncaví y boca del Guafo en invierno y primavera de 2005 (crucero CIMAR 11 Fiordos). *Cienc. Tecnol. Mar.*, 32 (2): 43 – 77.
- Walsh, E., A. Ingalls & R. Keil. 2008. Sources and transport of terrestrial organic matter in Vancouver Island fjords and the Vancouver–Washington Margin: A multiproxy approach using $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$, lignin phenols, and the ether lipid BIT index. *Limnol. Oceanogr.*, 53 (3), 1.054 – 1.063.

ANEXO 1

Tabla resumen con las posiciones geográficas de todas las estaciones del estudio.

	Estación	Latitud	Longitud
Fiordo Almirante Montt	EAMP	-51,46	-72,52
	EAMA	-51,59	-72,42
	EAM54	-51,53	-72,47
Canal Puyuhuapi	EP35	-44,36	-72,58
	EP36	-44,44	-72,61
	EP37	-44,53	-72,67
	EP38	-44,67	-72,76
	EP39	-44,73	-72,71
	EP40	-44,82	-72,93
	EP41	-44,89	-73,04
	EP42	-44,92	-73,31
Canal Jacaf	EJ32	-44,29	-73,19
	EJ33	-44,33	-72,97
	EJ34	-44,42	-72,84
	EJ37	-44,53	-72,67
Seno Iceberg	EI19	-48,60	-74,40
	EI20	-48,69	-74,33
	EI21	-48,70	-74,13
	EI22	-48,71	-73,99
Estero Sligth	ES1	-46,67	-75,26
	ES2	-46,68	-75,39
	ES3	-46,69	-75,41
	ES4	-46,71	-75,49
	ES5	-46,72	-75,51
	ES6	-46,73	-75,51
	ES7	-46,75	-75,52
	ES8	-46,76	-75,53
	ES9	-46,77	-75,55
	ES10	-46,79	-75,57
Seno Newman	EN11	-46,67	-75,10
	EN12	-46,61	-75,07
	EN13	-46,60	-75,05
	EN14	-46,58	-75,03
	EN15	-46,55	-74,99
	EN16	-46,50	-74,94
	EN17	-46,45	-74,92
	EN18	-46,44	-74,90

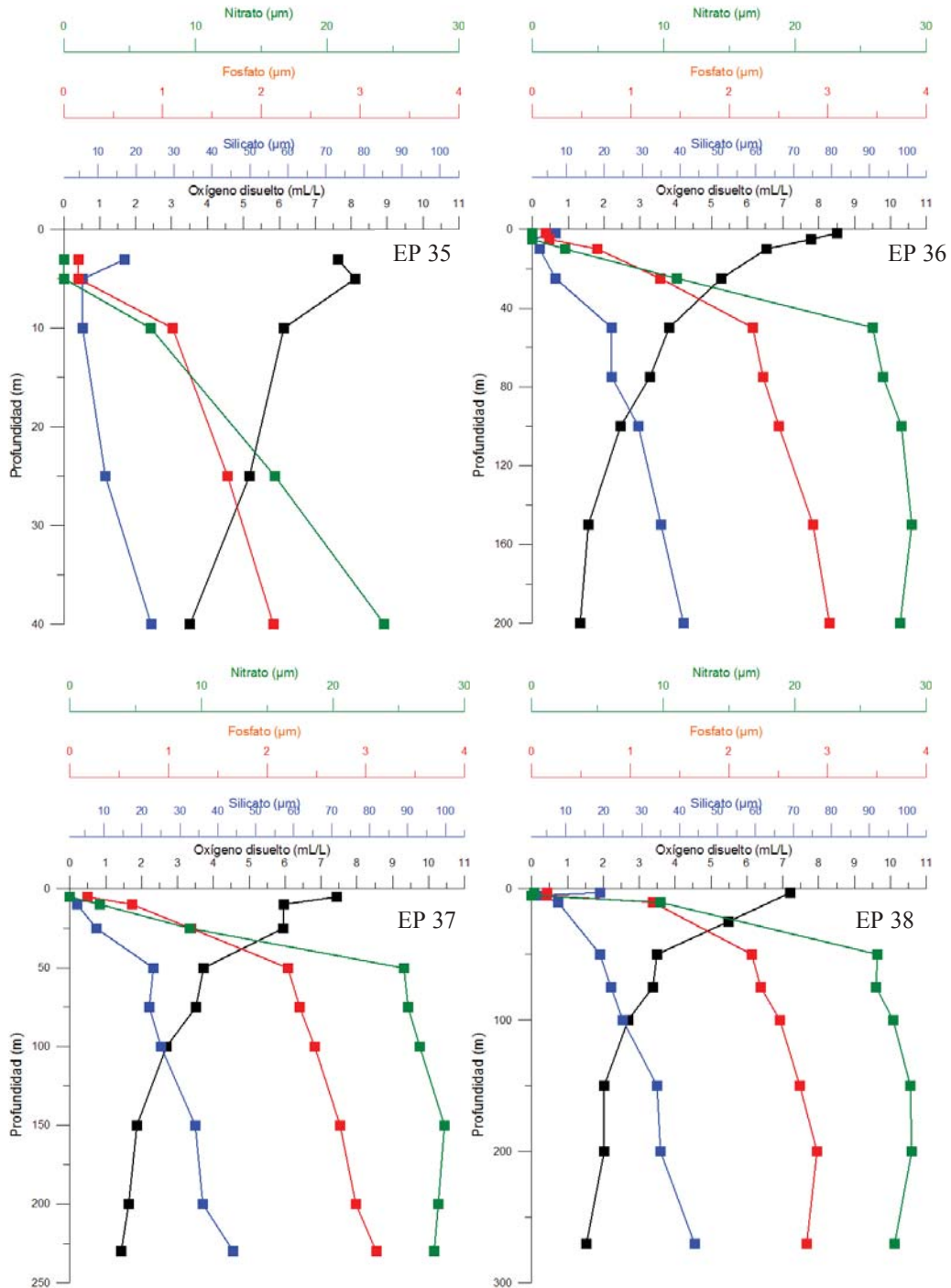
ANEXO 2

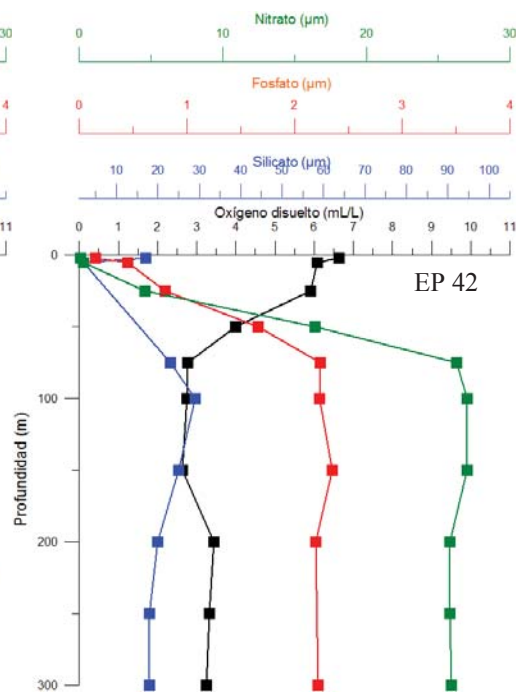
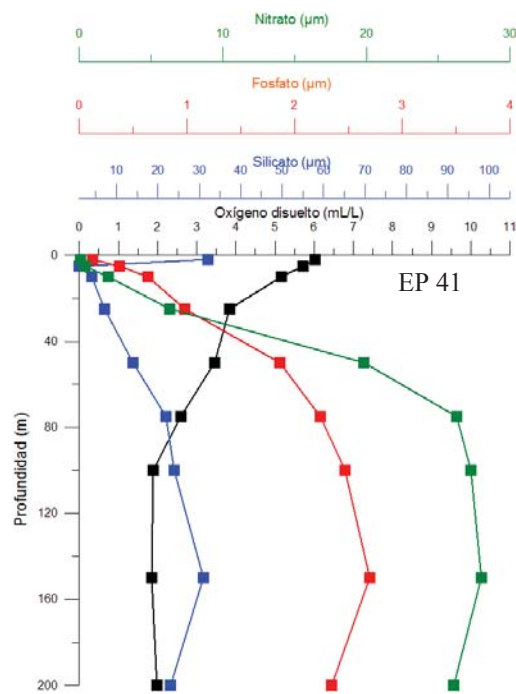
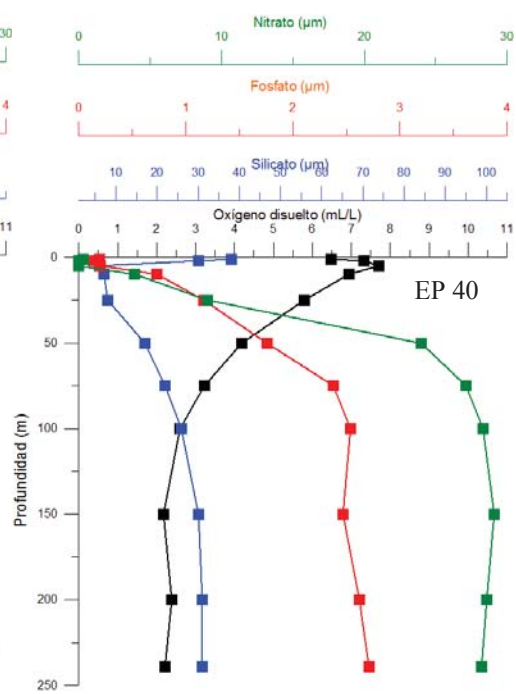
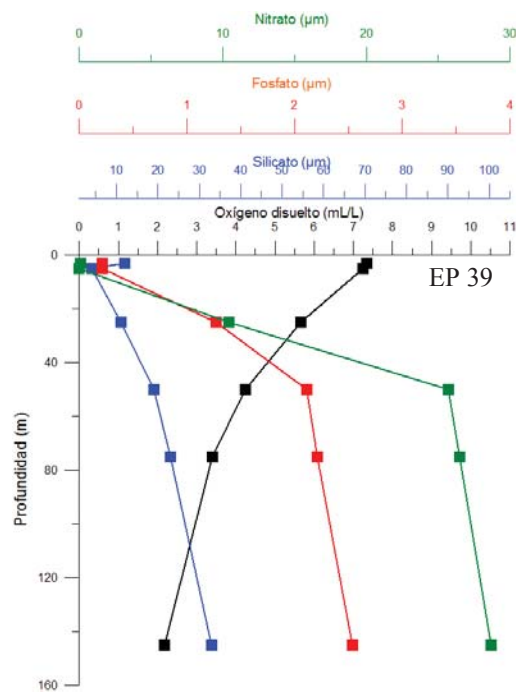
Valores de salinidad indicadores de las masas de agua de la Patagonia chilena. Fuente: Silva & Sievers, 2006; Coloma, 2016.

Masa de Agua	Nomenclatura	Rangos de salinidad
Agua Estuarina Dulce	AED	2 a 11
Agua Estuarina Salobre	AES	11 a 21
Agua Estuarina Salada	AE	21 a 31
Agua Subantártica Modificada	ASAAM	31 a 33
Agua Subantártica	ASAA	mayor a 33

ANEXO 3

Perfiles verticales de oxígeno disuelto ($\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$), silicato (μM), fosfato (μM) y nitrato (μM) de las estaciones de Canal Puyuhuapi.





ANEXO 4

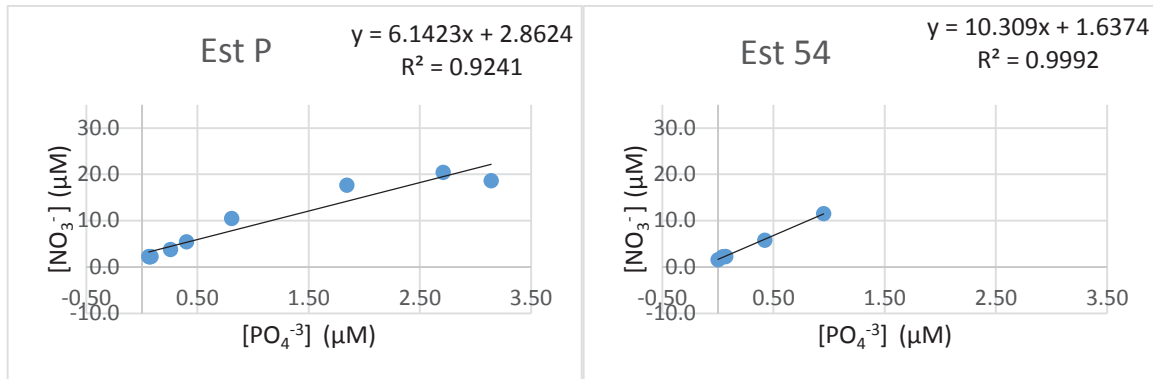


Figura 3.1. Gráficos indicando la relacion entre Nitrato:Fosfato de las estaciones del fiordo Almirante Montt.

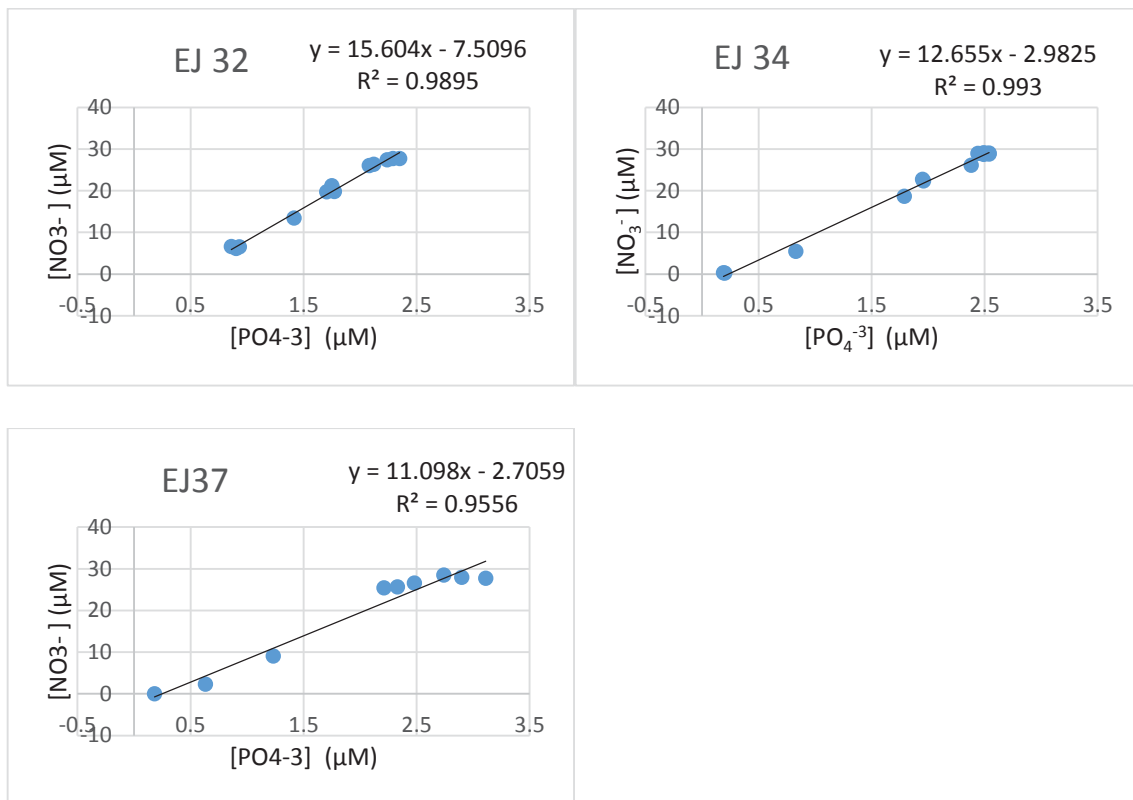


Figura 3.2. Gráficos indicando la relacion entre Nitrato:Fosfato de las estaciones del Canal Jacaf.

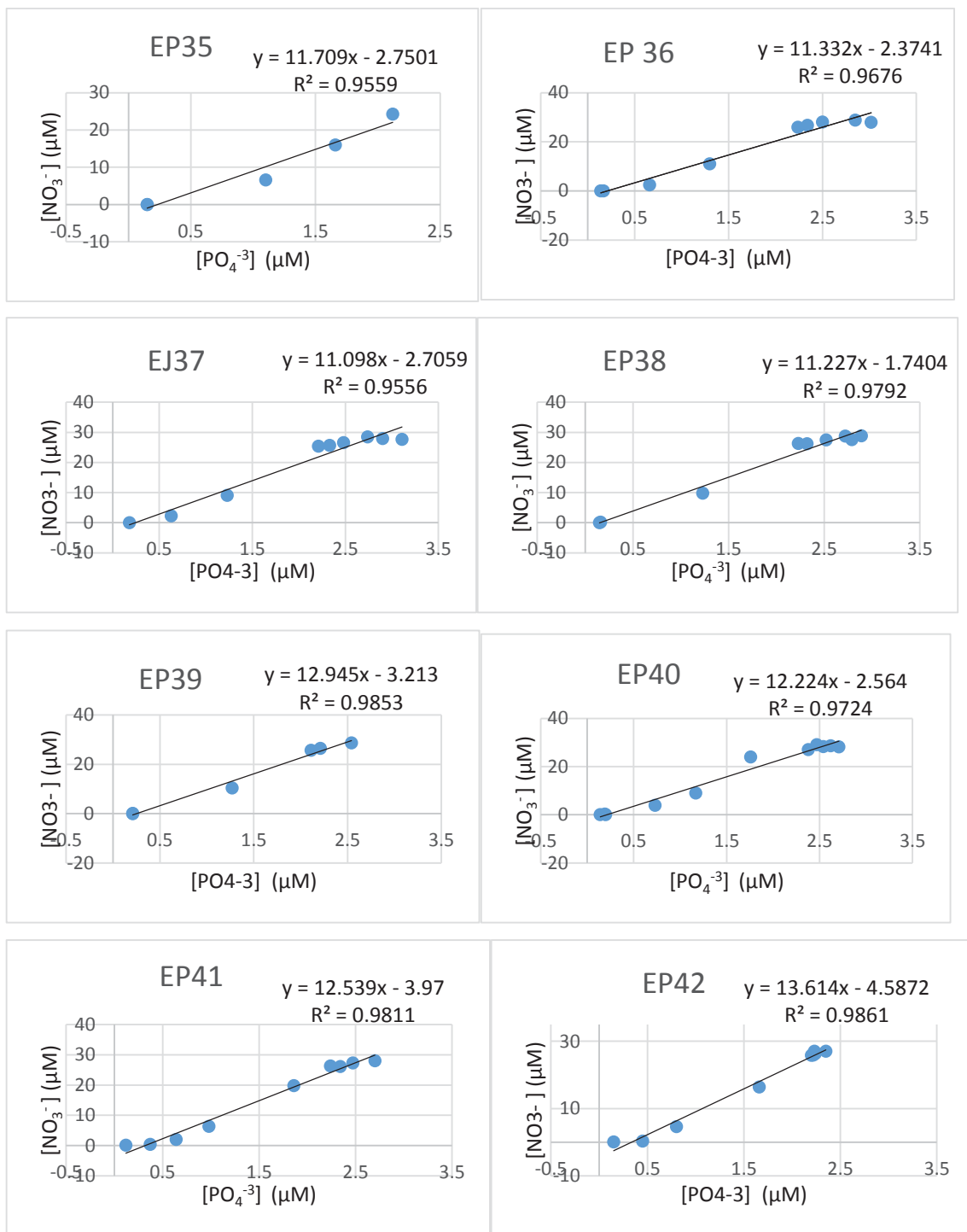


Figura 3.3. Gráficos indicando la relacion entre Nitrato:Fosfato de las estaciones del Canal Puyuhuapi.

ANEXO 5

Tabla 5.1. Tabla resumen de los valores de N* del Fiordo Almirante Montt.

Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*
Est P	0	3,98	Est 54	0	4,50	Est A	0	4,04
Est P	2	3,82	Est 54	2	4,46	Est A	2	4,25
Est P	5	4,18	Est 54	5	4,08	Est A	5	4,31
Est P	10	2,58	Est 54	10	4,24	Est A	10	4,83
Est P	25	1,97	Est 54	25	1,98	Est A	25	0,26
Est P	50	0,50	Est 54	50	-0,80			
Est P	75	-8,91						
Est P	100	-19,98						
Est P	150	-28,66						

Tabla 5.2. Tabla resumen de los valores de N* del Canal Jacaf.

Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*
EJ 32	1	-5,48	EJ 34	2	0,16	EJ37	5	0,02
EJ 32	5	-5,45	EJ 34	5	-0,10	EJ37	10	-4,88
EJ 32	10	-4,26	EJ 34	10	-4,98	EJ37	25	-7.68
EJ 32	25	-6,34	EJ 34	25	-7,14	EJ37	50	-7.06
EJ 32	50	-5,64	EJ 34	50	-5,60	EJ37	75	-8.68
EJ 32	75	-4,66	EJ 34	75	-6,16	EJ37	100	-10.18
EJ 32	100	-3,90	EJ 34	100	-7,24	EJ37	150	-12.44
EJ 32	150	-7,00	EJ 34	150	-9,08	EJ37	200	-15.50
EJ 32	200	-5,54	EJ 34	200	-7,84	EJ37	230	-19.16
EJ 32	250	-4,72	EJ 34	250	-8,74			
EJ 32	300	-4,38	EJ 34	300	-8,24			
EJ 32	400	-6,04	EJ 34	400	-8,52			
			EJ 34	450	-8,94			

Tabla 4.2. Tabla resumen de los valores de N* del Canal Puyuhuapi.

Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*
EP35	3	0.5	EP 36	2	0.66	EP38	3	0.54
EP35	5	0.5	EP 36	5	0.18	EP38	5	0.50
EP35	10	-8.1	EP 36	10	-5.16	EP38	10	-6.98
EP35	25	-7.66	EP 36	25	-6.90	EP38	25	2.90
EP35	40	-6.72	EP 36	50	-7.04	EP38	50	-6.48
			EP 36	75	-7.84	EP38	75	-8.02
			EP 36	100	-9.00	EP38	100	-9.92
			EP 36	150	-13.80	EP38	150	-11.82
			EP 36	200	-17.42	EP38	200	-14.44
							EP38	270
Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*	Estación	Profundidad (m)	N*
EP39	3	-0.36	EP40	1	0.16	EP41	2	1.08
EP39	5	-0.46	EP40	2	0.66	EP41	5	-2.62
EP39	25	-7.02	EP40	5	-0.30	EP41	10	-5.34
EP39	50	-5.16	EP40	10	-4.88	EP41	25	-6.48
EP39	75	-5.96	EP40	25	-6.82	EP41	50	-7.06
EP39	145	-9.04	EP40	50	-1.26	EP41	75	-6.64
			EP40	75	-8.08	EP41	100	-9.32
			EP40	100	-9.44	EP41	150	-12.30
			EP40	150	-7.52	EP41	200	-8.44
			EP40	200	-10.42			
			EP40	239	-12.26			
Estación	Profundidad (m)	N*						
EP42	2	0.60						
EP42	5	-4.00						
EP42	25	-5.30						
EP42	50	-7.26						
EP42	75	-6.64						
EP42	100	-5.78						
EP42	150	-7.70						
EP42	200	-6.50						
EP42	250	28.70						
EP42	300	-6.72						

ANEXO 6

Representaciones esquemáticas de los diferentes tipos de estructuras verticales de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto – pH, fosfato – nitrato y silicatos, encontradas en fiordos. Fuente: Silva & Calvete, 2002.

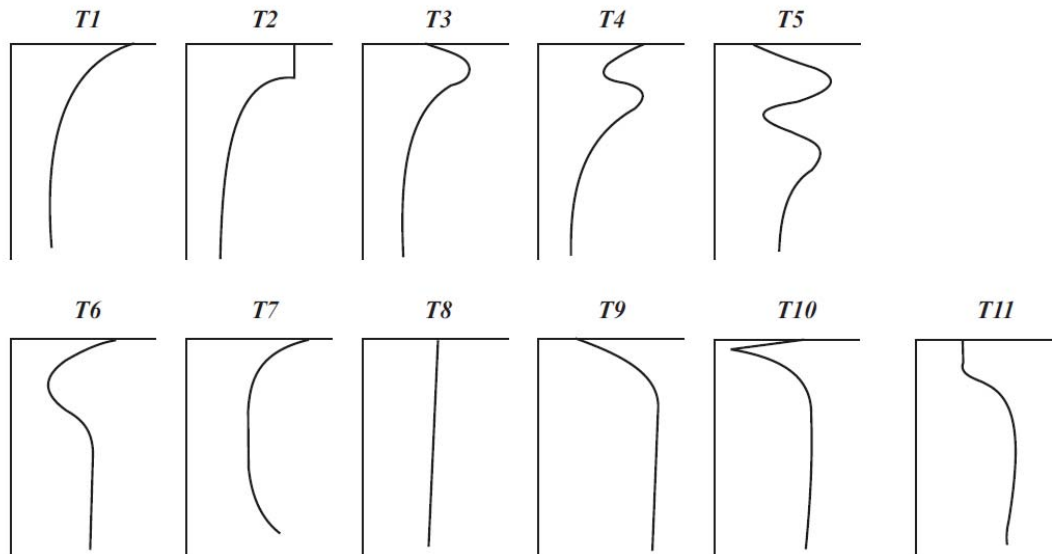


Figura 6.1. Representación esquemática de las estructuras verticales de la temperatura.

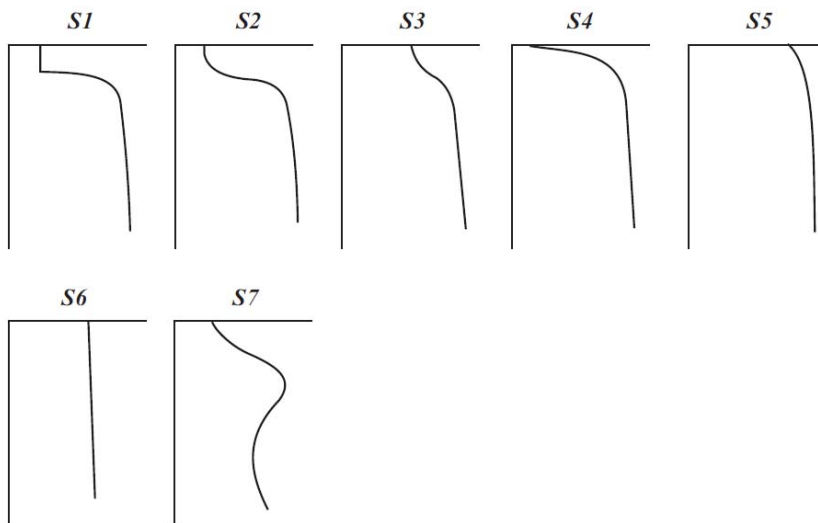


Figura 6.2. Representación esquemática de las estructuras verticales de la salinidad.

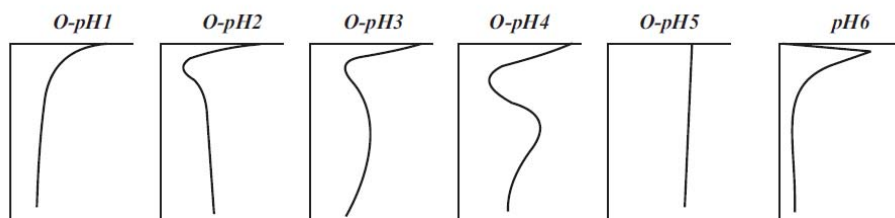


Figura 6.3. Representación esquemática de las estructuras verticales del oxígeno disuelto y pH.

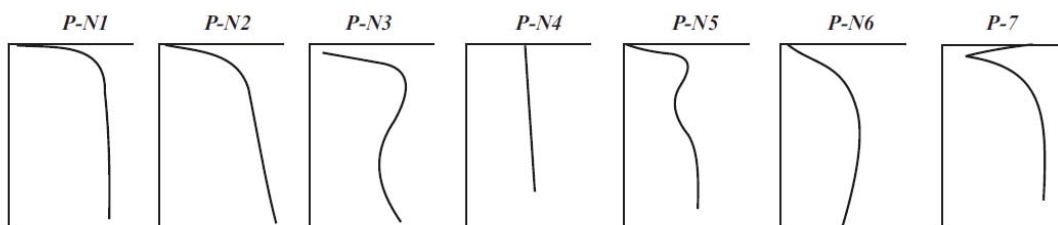


Figura 6.4. Representación esquemática de las estructuras verticales del fosfato y nitrato.

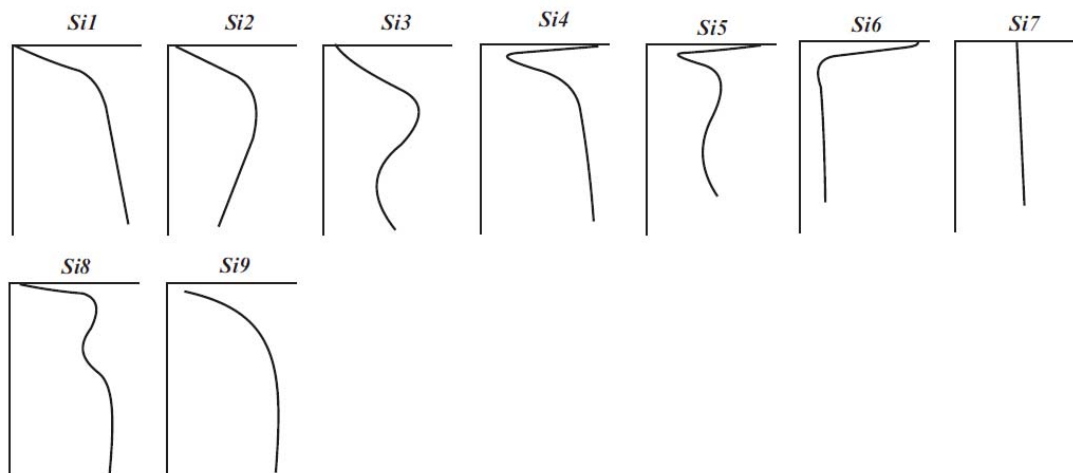


Figura 6.5. Representación esquemática de las estructuras verticales del silicato.