



## FACULTAD DE CIENCIAS

# CAMBIOS TEMPORALES DE LA COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA DEL SISTEMA ESTUARINO RELONCAVÍ ASOCIADO A CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS, HIDROCLIMÁTICAS Y BIOGEOQUÍMICAS.

Por

SARA ARENAS URIBE

TESIS PARA OPTAR AL

GRADO DE MAGÍSTER EN ECOLOGÍA MARINA

Director de Tesis: SERGIO CONTRERAS QUINTANA

Co-Director de Tesis: FACUNDO MATIAS BARRERA

Co-Director de Tesis: OSCAR ESPINOZA GONZÁLEZ

Concepción, Chile

2024



## FACULTAD DE CIENCIAS

# CAMBIOS TEMPORALES DE LA COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA DEL SISTEMA ESTUARINO RELONCAVÍ ASOCIADO A CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS, HIDROCLIMÁTICAS Y BIOGEOQUÍMICAS.

Por

SARA ARENAS URIBE

Tesis para optar al grado de Magíster en Ecología Marina

La autora y el Director de Tesis certifican que la investigación presentada es original y cumple con las normas establecidas para todo aspecto relativo a su ejecución.

Concepción, Chile

2024

# ACTA DE EXAMEN



Universidad Católica de la Santísima Concepción

## ACTA DE EXAMEN DE GRADO

En Concepción de Chile, a 08 de ABRIL de 2022, vista y revisados los requisitos de Título/Grado presentados por:

Doña **SARA . ARENAS URIBE**

RUT 26733906-6

Alumna de la Carrera de **MAGISTER EN ECOLOGIA MARINA**

Sede **CONCEPCIÓN** Jornada **DIURNO**

De la Universidad Católica de la Santísima Concepción, la Comisión Examinadora ha otorgado las siguientes calificaciones:

**"CAMBIOS TEMPORALES DE LA COMUNIDAD FITOPLANCTÓNICA DEL SISTEMA ESTUARINO RELONCAVÍ ASOCIADO A CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS, HIDROCLIMÁTICAS Y BIOGEOQUÍMICAS"**

Nombre	Calificación
JORGE LEON MUÑOZ MIEMBRO INTERNO COMISIÓN DE TESIS	7,00 (SIETE)
IVAN PEREZ SANTOS MIEMBRO EXTERNO COMISIÓN DE TESIS	7,00 (SIETE)
SERGIO CONTRERAS QUINTANA DIRECTOR DE TESIS	7,00 (SIETE)
OSCAR ESPINOZA GONZÁLEZ CO-DIRECTOR DE TESIS	7,00 (SIETE)
RENÉ CABEZAS CORNEJO MINISTRO DE FE	
<b>CALIFICACION FINAL DE EXAMEN</b>	<b>7,00 (SIETE)</b>

SECRETARIO ACADÉMICO



DECANO

## AGRADECIMIENTOS

A mis asesores Sergio Contreras, Facundo Barrera y Oscar Espinoza por el conocimiento compartido, el tiempo dedicado y la constante motivación.

A los Proyectos Fondecyt 3180307 [IR: Dr. Facundo Barrera], Fondecyt 1190398 [IR: Sergio Contreras], FONDEQUIP EQM160167 [IR: Iván Pérez-Santos] y al Observatorio Marino Reloncaví (OMARE) del Centro i-mar de la Universidad de Los Lagos, por la participación en las salidas de campo, actividades de formación indispensables que facilitaron mi proceso de aprendizaje de la biogeoquímica costera.

Al apoyo económico recibido por el Magíster en Ecología Marina, y el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2.

Al Centro de Estudios de Algas Nocivas (CREAN-IFOP) y a los Laboratorios de Biogeoquímica e Isotopos Estables Aplicados (LABASI) y laboratorio de Biogeoquímica, a cargo de la Dr. Laura Farías por la colaboración en el análisis de muestras de fitoplancton, isótopos y nutrientes respectivamente.

A cada uno de los miembros de OMARE, especialmente a los Drs. Iván Pérez Santos y Patricio Diaz, por sus sugerencias y comentarios, al igual que a los participantes del Laboratorio de Ciencias Ambientales (LABENSCI).

A Elias Pinilla (IFOP) y Pamela Linford (Centro i-mar) por su colaboración en el modelo de circulación del Sistema Estuarico Reloncaví y el análisis de vientos en el periodo evaluado.

A Florence Tellier por su dedicación y asesoría en los cursos Unidad de investigación, Proyecto de tesis, Tesis I y II. Su pasión y dominio en la escritura científica, la comunicación oral y la utilización de gestores bibliográficos fortalecieron hasta el último momento este trabajo.

A mis compañeros de magister Fernanda Vargas, Lucas Giménez, Linette Tralma y Diego Márquez, que con el paso del tiempo se convirtieron en una pequeña familia.

A mis padres Alba y Jaime y mi hermana Manuela, que desde la distancia me brindan su apoyo incondicional para lograr cada meta propuesta en mi camino académico y profesional.

Como dice Yoko Ono: "Cada gota en el mar cuenta". Así es esta tesis, el resultado del apoyo, esfuerzo y dedicación de todos ustedes. **¡INFINITAS GRACIAS!**

## TABLA DE CONTENIDOS

Introducción .....	13
Estuarios.....	13
Región de los fiordos y canales Patagónicos .....	13
Comunidad fitoplanctónica.....	16
Hipótesis.....	20
Hipótesis General.....	20
Hipótesis Específicas .....	20
Objetivos .....	21
Objetivo General.....	21
Objetivos Específicos .....	21
Métodos .....	22
Variables hidroclimáticas.....	23
Variables oceanográficas .....	24
<i>Determinación de Clorofila-a</i> .....	26
<i>Fuentes de materia orgánica en SER</i> .....	28
Análisis de la comunidad fitoplanctónica .....	28
<i>Análisis cualitativo</i> .....	28
<i>Análisis cuantitativo</i> .....	29
Análisis de datos .....	29
Resultados.....	31
Condiciones hidroclimáticas .....	31
Variables oceanográficas .....	35
<i>Modelo de Circulación SER</i> .....	43
Variabilidad espacio-temporal de nutrientes inorgánicos .....	47
<i>Relaciones estequiométricas entre nutrientes</i> .....	49
Dinámica espacio-temporal de la materia orgánica en SER.....	51
Comunidad fitoplanctónica.....	61
<i>Análisis cualitativo</i> .....	61

<i>Análisis cuantitativo</i> .....	62
Discusión .....	78
Distribución espacio-temporal de la comunidad de fitoplancton .....	78
Explicando diferencias espaciales en las abundancias de fitoplancton en el SER.....	80
Relación de los parámetros biogeoquímicos con la comunidad de fitoplancton y su contribución a la formación de la materia orgánica. ....	82
Dinámica de materia orgánica autóctona y alóctona en el SER .....	85
Conclusiones .....	87
Referencias bibliográficas .....	88
Anexo 1: [correlación con los valores de Cl- $\alpha$ in-situ y la fluorescencia].....	96
Anexo 2: [listado cualitativo de especies en el ser] .....	97

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características técnicas del CTD-AML .....	24
Tabla 2. Ecuaciones para variables oceanográficas propuesta en TEOS-10 .....	29
Tabla 3 . Porcentaje (%), promedio $\pm$ desviación estandar, mínimos y máximos de frecuencia de vientos para las cuatro estaciones del año comprendidas entre el periodo 2016 a 2020. ....	33
Tabla 4 . Variables oceanográficas en el Sistema Estuarino Reloncaví SER (media $\pm$ desviación estándar [ mínimo; máximo]). ....	36
Tabla 5 . Distribución de nutrientes en el Sistema Estuarino Reloncaví SER (media $\pm$ desviación estándar [mínimo; máximo]). ....	49
Tabla 6 . Resultados generales de la correlación (Pearson, $n=6$ , $p < 0,01$ ) entre la concentración de nitrato, fosfato y silicato en aguas del SER. Relación de regresión entre nitratos, fosfatos y silicatos para todos los datos ( $n=101$ ). ....	50
Tabla 7. Distribución de las variables químicas: a) $C_{org}$ , b) NPT, c) Material particulado en suspensión, d) relación de proporción de $C_{org}$ en función del NPT, e) $\delta^{13}C$ y d) $\delta^{15}N$ en el Sistema Estuarino Reloncaví SER (media $\pm$ desviación estándar [ mínimo; máximo]). ....	58
Tabla 8 . Ecuación de regresiones para la relación entre indicadores de materia orgánica .....	59
Tabla 9. Número de especies fitoplanctónicas, según la división de los grandes grupos taxonómicos en FRb y SR.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Distribución global de fiordos (Bianchi et al. 2020). b) Zonación de los fiordos chilenos (Freeland et al. 1980). .....	14
Figura 2. Sitios de muestreo en el Sistema Estuarino Reloncaví: Seno de Reloncaví (SR) y boca del Fiordo de Reloncaví (FRb). .....	22
Figura 3. Serie de tiempo de precipitación en la estación Meteorológica localizada en el aeropuerto el Tepual, Puerto Montt (Datos de la Dirección Meteorológica de Chile). a) Serie de tiempo diaria en el periodo 2003-2020. b) Serie de tiempo diaria durante 2018 y 2019. Las barras grises muestrean el periodo de las campañas de verano e invierno. c) Datos de precipitación media mensual y la anomalía de precipitación para el 2018 y 2019. ....	31
Figura 4. Serie de tiempo del caudal del Río Puelo. a) Serie de tiempo diaria en el periodo 2003-2020. b) Serie de tiempo diaria durante 2018 y 2019. Las barras grises muestrean el periodo de las campañas de verano e invierno. c) Datos de caudal medio mensual y la anomalía de caudal para el 2018 y 2019.....	32
Figura 5. Producto de reanálisis de vientos promedios estacionales para el período de 2016 a 2020 en una cuadrícula de $0,25^\circ \times 0,25$ . Magnitud del viento en m/s (barra de color), flechas magnitud y dirección del vector velocidad (U10, V10). Rosa de vientos promedio por estación. ....	34
Figura 6 .Diagramas T-S para el FRb y el SR. La barra de colores indica la profundidad. ....	36
Figura 7. Parámetros oceanográficos de la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb) a lo largo de la serie de tiempo (época estival e invernal). (a) Salinidad absoluta SA (g/kg) (b) Temperatura conservativa $\Theta$ ( $^\circ\text{C}$ ) (c) densidad potencial anómala $\sigma$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (d) frecuencia de Brunt-Väisälä ( $\text{N}^2$ ) (ciclo/h).....	38
Figura 8. Parámetros oceanográficos de la estación del Seno de Reloncaví (SR) a lo largo de la serie de tiempo (época estival e invernal). (a) Salinidad absoluta SA (g/kg) (b) Temperatura conservativa $\Theta$ ( $^\circ\text{C}$ ) (c) densidad potencial anómala $\sigma$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) (d) frecuencia de Brunt-Väisälä ( $\text{N}^2$ ) (ciclo/h). .....	39
Figura 9. Distribución vertical de la frecuencia de Brunt-Väisälä ( $\text{N}^2$ ) (línea negra) y el parámetro de estratificación (ns) (línea azul) en FRb (a) y SR (b). ....	40
Figura 10. Distribución vertical del (a) oxígeno disuelto, (b) saturación de oxígeno, (c) pH y (d) clorofila <i>a</i> para la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb). .....	42

Figura 11. Distribución vertical del (a) oxígeno disuelto, (b) saturación de oxígeno, (c) pH y (d) clorofila <i>a</i> para la estación del Seno de Reloncaví (SR). .....	43
Figura 12. Promedio estacional de la velocidad de la corriente para el agua superficial (0-10m) (a) y el agua profunda (10-25 m) (b) del Sistema Estuarino Reloncaví.....	45
Figura 13. Promedio estacional de la edad del agua horizontal para el agua superficial (0-10m) (a) y el agua profunda (10-25 m) (b) del Sistema Estuarino Reloncaví.....	46
Figura 14 . Distribución vertical de los nutrientes inorgánicos para la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb). .....	47
Figura 15 .Distribución vertical de los nutrientes inorgánicos para la estación del Seno de Reloncaví (SR) .....	48
Figura 16 .Resultados de la relación entre nitrato y fosfato (a), silicatos vs fosfatos (b) y silicatos vs nitratos (c) para ambos sitios muestreados (FRb en cuadros y SR en círculos, donde el color naranja representa la época estival y azul la invernal). La relación entre los tres nutrientes se observa en el panel d). La Línea roja, morado y verde muestran la relación teórica planteada por Redfield (1934) para cada nutriente 106C:16N:1P:15Si. ....	51
Figura 17 .Distribución vertical de la materia orgánica para la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb).....	53
Figura 18. Distribución vertical de la razón de isótopos estables a) $\delta^{13}\text{C}$ , b) $\delta^{15}\text{N}$ y c) la relación de proporción de $C_{\text{org}}$ en función del NPT (C/N) de material particulado en suspensión en la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb). .....	54
Figura 19 . Distribución vertical de la materia orgánica para la estación del Seno de Reloncaví (SR). .....	56
Figura 20 . Distribución vertical de la razón de isótopos estables a) $\delta^{13}\text{C}$ , b) $\delta^{15}\text{N}$ y c) la relación de proporción de $C_{\text{org}}$ en función del NPT (C/N) de material particulado en suspensión en la estación del Seno de Reloncaví (SR). .....	57
Figura 21. Relación entre COP y NPT (a), silicatos vs fosfatos (b), silicatos vs nitratos (c) y la relación entre los tres nutrientes (d) para ambos sitios muestreados (Seno Reloncaví, SR y boca del Fiordo de Reloncaví, FRb). Las líneas roja, azul y negra muestran la relación teórica planteada por Redfield: 106C:16N: 1P:15Si. ....	60
Figura 22. Distribución en la columna de agua de las densidades celulares ( $1 \times 10^3 \text{ cel. L}^{-1}$ ) de los principales grupos detectadas en FRb. Los silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas fueron agrupadas en la categoría de Otros debido a su baja densidad celular.....	63

Figura 23 Distribución en la columna de agua de las densidades celulares ( $1 \times 10^3$ cel. $L^{-1}$ ) de los principales grupos detectadas en SR. Los silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas fueron agrupadas en la categoría de Otros debido a su baja densidad celular.....	64
Figura 24. Gráfico sombreado de la distribución de especies de la comunidad fitoplanctónica a lo largo de las ocho campañas de muestreo en FRb. ....	66
Figura 25. Gráfico sombreado de la distribución de especies de la comunidad fitoplanctónica a lo largo de las ocho campañas de muestreo en SR. ....	67
Figura 26. Distribución vertical de la densidad celular (cel. $L^{-1}$ ) de las principales especies fitoplanctónicas detectadas entre superficie y 30 m en FRb. ....	69
Figura 27. Distribución vertical de la densidad celular (cel. $L^{-1}$ ) de las principales especies fitoplanctónicas detectadas entre superficie y 30 m en SR. ....	71
Figura 28. Diagrama de cajas de los resultados de ANOSIM entre épocas climáticas. ....	72
Figura 29. Representación bidimensional del escalamiento multidimensional no métrico (nMDS) entre épocas climáticas. ....	73
Figura 30. Análisis SIMPER entre épocas climáticas. a) Especies de fitoplancton con las mayores contribuciones a la disimilitud promedio de los ensamblajes de cada época. Abundancia media ( $1 \times 10^3$ cel. $L^{-1}$ ) por especie según la época estival (b) e invernal (c) **Tóxicas y potencialmente * Nocivas.....	74
Figura 31. Biplot del análisis de correspondencia canónica (CCA) del conjunto de muestras del FRb. Las muestras colectadas en cada época climática están representadas por círculos (Estival: naranja; invernal: azul). Las flechas indican las variables ambientales.....	76
Figura 32. Biplot del análisis de correspondencia canónica (CCA) del conjunto de muestras del SR. Las muestras colectadas en cada época climática están representadas por círculos (Estival: naranja; invernal: azul). Las flechas indican las variables ambientales.....	77

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Eq I. Magnitud del viento.....	23
Eq II. Variabilidad en la estratificación.....	24
Eq III. Parámetro de estratificación.....	25
Eq IV. Correlación de Cl- $\alpha$ in-situ y la fluorescencia.....	26
Eq V. Corrección de la sílice por la salinidad.....	26
Eq VI. Razón isotópica .....	27
Eq VII. Comparación con un estándar internacional.....	27
Eq VIII. Producción de materia orgánica alóctona.....	28

## RESUMEN

Los sistemas estuarinos conformados por fiordos y canales de la Patagonia proveen de servicios ecosistémicos a las comunidades locales, donde se desarrollan numerosas actividades socioeconómicas como la acuicultura, la pesca y el turismo. El Sistema Estuarino Reloncaví (SER), es un ecosistema con complejas interacciones tierra-océano y fluctuaciones estacionales que sostienen una alta producción biológica, que sustenta actividades como la pesquería bentónica y la mitilicultura. Se realizaron muestreos espaciotemporales en el SER durante 2018-2019 en dos estaciones de muestreo (FRb: Boca de descarga del Fiordo de Reloncaví y SR: Centro del Seno de Reloncaví), donde se midieron variables fisicoquímicas y biológicas, con énfasis en la comunidad de fitoplancton. Para el periodo muestreado se observó un déficit hídrico en las precipitaciones, sin embargo, el río Puelo mantuvo su memoria hidrológica. Vientos intensos y dominantes desde el norte se registraron en invierno, mientras que en primavera-verano fueron opuestos. Se observó la presencia de Agua estuarina-salada en la superficie y Agua Subantártica Modificada en la capa más profunda. Ambos sitios de muestreo presentaron aguas muy oxigenadas y ricas en nutrientes acoplados a procesos conjuntos. La concentración de materia orgánica fue mayor en invierno con una señal isotópica empobrecida, a pesar de su origen mayormente autóctono debido a la retención producto de giros antihorarios. Se identificaron 115 especies de fitoplancton, pertenecientes a 5 grupos taxonómicos: diatomeas, dinoflagelados, zoomastigóforos, ciliados y euglenofíceas. Se detectó la presencia de 8 especies de microalgas potencialmente nocivas y 4 especies productoras de biotoxinas marinas. Análisis multivariados (nMDS, ANOSIM y SIMPER) no mostraron diferencias significativas entre sitios, pero sí entre estaciones del año. El análisis de correspondencia canónica arrojó que la comunidad fitoplanctónica varió con las propiedades fisicoquímicas de la columna de agua y entre épocas hidroclimáticas. Los resultados de este estudio sugieren que cambios en la diversidad fitoplanctónica, remineralización y uso de nutrientes en un contexto de (condiciones climáticas favorables (presión atmosférica alta, baja nubosidad, mayor radiación, baja pp) que generan una columna de agua estable, podría tener consecuencias sociales y económicas perjudiciales para las comunidades costeras producto de la mayor ocurrencia de especies nocivas.

**Palabras claves:** Sistema Estuarino Reloncaví (SER); Cambio climático; Biogeoquímica; Fitoplancton

## ABSTRACT

The estuarine systems made up of fjords and channels in Patagonia provide ecosystem services to local communities, where numerous socioeconomic activities such as aquaculture, fishing and tourism are developed. The Reloncaví Estuarine System (SER) is an ecosystem with complex land-ocean interactions and seasonal fluctuations that sustain high biological production, which supports activities such as benthic fisheries and mussel farming. Spatio-temporal sampling was carried out in the SER during 2018-2019 at two sampling stations (FRb: Reloncaví Fjord discharge mouth and SR: Reloncaví Sound Center), where physicochemical and biological variables were measured, with emphasis on the community of phytoplankton. For the sampled period, a water deficit was observed in rainfall. However, the Puelo River maintained its hydrological memory. Intense and dominant winds from the north were recorded in winter, while in spring-summer they were opposite. The presence of Estuarine-Salty Water on the surface and Modified Subantarctic Water in the deepest layer was observed. Both sampling sites presented highly oxygenated and nutrient-rich waters coupled to joint processes. The concentration of organic matter was higher in winter with a poor isotopic signal, despite its mostly autochthonous origin due to retention due to counterclockwise rotation. A total of 115 species of phytoplankton were identified, belonging to 5 taxonomic groups: diatoms, dinoflagellates, zoomastigophores, ciliates, and euglenophyceae. The presence of 8 species of potentially harmful algae and 4 species that produce marine biotoxins were detected. Multivariate analyzes (nMDS, ANOSIM and SIMPER) did not show significant differences between sites, but between seasons of the year. El análisis de correspondencia canónica arrojó que la comunidad fitoplanctónica varió con las propiedades fisicoquímicas de la columna de agua y entre épocas hidroclimáticas. Los resultados de este estudio sugieren que cambios en la diversidad fitoplanctónica, remineralización y uso de nutrientes en un contexto de (condiciones climáticas favorables (presión atmosférica alta, baja nubosidad, mayor radiación, baja pp) que generan una columna de agua estable, podría tener consecuencias sociales y económicas perjudiciales para las comunidades costeras producto de la mayor ocurrencia de especies nocivas.

**Keywords:** Reloncaví Sound; Reloncaví Fjord; Climate change; Biogeochemistry; Phytoplankton

# INTRODUCCIÓN

## Estuarios

El término “estuario” proviene del latín *aestuarium*, que se remonta al siglo XVI y significa pantano o canal (McLusky & Elliott 2004). Una de las definiciones más completas es la de Perillo (1995): “Cuerpo de agua costero semicerrado, que se extiende hasta el límite efectivo de la influencia de la marea, donde el agua de mar que ingresa desde una o más conexiones libres con el mar abierto o cualquier otro cuerpo de agua costero salino se diluye significativamente con agua dulce, derivada del drenaje de la tierra, y puede albergar especies biológicas eurihalinas en parte o en la totalidad de su ciclo de vida”.

Los estuarios se clasifican según diversos parámetros (sedimentológico, geomorfológico, fisiográfico, etc.). La primera clasificación fisiográfica (visión del relieve, a partir del análisis integral de la topografía, geología, hidrológica y edafología) la realizó Pritchard (1952), dividiendo los estuarios en valles fluviales inundados, estuarios construidos por barras (bar-built), estuarios formados por procesos tectónicos y fiordos (Citado en: Perillo 1995). Estos últimos, cuyo origen es glaciar, son de gran interés científico por su alta fragilidad ambiental, debido a que generalmente la circulación está restringida en la zona cercana a la boca producto de la presencia de un umbral (sill en inglés), que marca la zona hasta la cual avanzó el glaciar. Esta restricción en su circulación genera en muchos casos elevados tiempos de residencia al interior de estos cuerpos de agua (Pinilla et al. 2020).

## Región de los fiordos y canales Patagónicos

La región de fiordos y canales de la patagonia Chilena, cuya área es cercana a 240.000 km<sup>2</sup>, se encuentra localizada en el este del Océano Pacífico Sur (41-55°S) (Syvitski et al. 1987; Iriarte et al. 2007) (Figura 1 a). Es una de las regiones estuarinas más grandes del planeta, con una extensión superior a los 1600 km (Silva & Palma 2008; González et al. 2010). Incluye una gran diversidad de ecosistemas como embalses, canales, senos, estrechos y más de 200 fiordos (Iriarte et al. 2007), de los cuales 70 se ubican en la costa continental (Syvitski et al. 1987).

El área de fiordos chilenos se divide principalmente en tres zonas (Figura 1 b): zona norte: entre Puerto Montt y la Laguna San Rafael, zona central: entre el Golfo de Penas y el Estrecho de Magallanes y zona sur: desde el Estrecho de Magallanes hasta Cabo de Hornos (Freeland et al. 1980; Silva & Palma 2008).

El sistema estuarino Reloncaví (SER) es el inicio de los fiordos chilenos, localizado en la región de Los Lagos (41° S), en el extremo norte del mar interior de la Patagonia Noroccidental, junto con el Golfo de Ancud y parte del Golfo Corcovado (Pickard 1971).

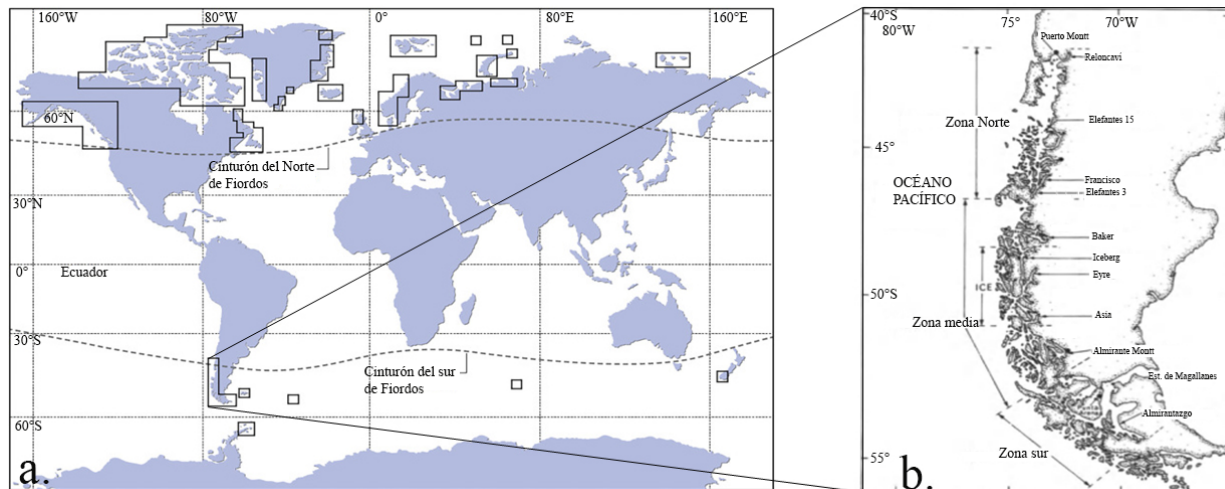


Figura 1. a) Distribución global de fiordos (Bianchi et al. 2020). b) Zonación de los fiordos chilenos (Freeland et al. 1980).

El SER lo conforman el Fiordo de Reloncaví (FR), que es el fiordo más próximo al ecuador geográfico (Valle-Levinson et al. 2007) y el Seno Reloncaví (SR). El FR tiene una extensión aproximada de 55 km desde la cabeza a la boca (Valle-Levinson et al. 2007) y el SR está conectado al este con la boca del FR (FRb), donde alcanza profundidades de hasta 470 m (Silva et al. 1995). La FRb tiene un aporte significativo de agua dulce proveniente de los ríos Cochamó (100 m<sup>3</sup>/s), Petrohué (350 m<sup>3</sup>/s) y Puelo (600 m<sup>3</sup>/s), que transportan la descarga de agua dulce desde la Cordillera de los Andes (Valle-Levinson et al. 2007; León-Muñoz et al. 2013; Iriarte et al. 2017; Lara et al. 2019). En el sur, el SR se conecta con el Golfo de Ancud a través de los pasos Queullín (fuente principal de intercambio de agua, con profundidades máximas de 350 m), Nao (segunda fuente de intercambio de agua, con profundidades menores de 50 m y ancho de 3 km) y Tautil (menor intercambio con profundidad media de 10 m y 1 km de ancho) (Cáceres & Valle-Levinson 2010).

Clapperton (1994) afirma que la zona del SER estuvo constituida geomorfológicamente por el recubrimiento de un manto de hielo durante la última glaciación, hace aproximadamente unos 10000 años. Tras su retiro, el mar ocupó canales, senos y fiordos. La marea en el sector es de tipo semidiurno mixto (Soto-Mardones et al. 2009) y los vientos son el forzante físico más importante para explicar la

variabilidad de la circulación superficial y oleaje, caracterizada por una alta variabilidad y predominio del viento norte en invierno y del sur-suroeste en verano (Soto-Mardones et al. 2009; Letelier et al. 2011). La temperatura superficial en el sector del SR alcanza valores de 18°C en verano y disminuye significativamente en invierno hasta los 9°C (Pérez-Santos et al. 2021). La salinidad de la columna de agua varía entre los 26 y 33 (Iriarte et al. 2007; Iturria 2020). La precipitación media anual en la región es de 1615 mm año<sup>-1</sup> (Dirección Meteorológica de Chile: [www.meteochile.gob.cl](http://www.meteochile.gob.cl)), donde durante la transición otoño-invierno las precipitaciones son más frecuentes (2000 mm año<sup>-1</sup>) (Valle-Levinson et al. 2007; Sauter 2020, 2020). En consecuencia, el SER presenta una estratificación en la columna de agua que es modulada por el ingreso de agua dulce proveniente del FRb (Pérez-Santos et al. 2021) y escorrentía superficial que no ha sido completamente cuantificada. La capa superficial adquiere características estuarinas (Sievers & Silva 2006) definidas por la baja salinidad (<31), temperaturas cálidas (> 13°C) y altos valores de oxígeno (7 mL l<sup>-1</sup>) (Iriarte et al. 2007; Valle-Levinson et al. 2007; Castillo 2012; Iturria 2020). Bajo la capa superficial de 5 a 10 m de profundidad, la salinidad es mayor a 31 y la temperatura disminuye a valores cercanos a los 11°C, valores característicos del Agua Subantártica Modificada (ASAAM) (Sievers & Silva 2006). En primavera-verano la capa superficial, de aproximadamente 5 m de espesor, se mantiene estratificada y fluyendo hacia mar abierto, aunque el viento y el aporte de los ríos pueden profundizarla (Soto-Mardones et al. 2009; Iturria 2020). En el periodo de invierno, la estratificación se debilita y la mezcla es la característica dominante en la columna de agua (Iriarte et al. 2007).

El SER es un ecosistema único, caracterizado por complejas interacciones marino-terrestre-atmosféricas, con fluctuaciones estacionales bien marcadas a causa de diversos factores, como por ejemplo variaciones en precipitaciones y la radiación solar que estimulan la productividad marina debido a la alta producción biológica (Acha et al. 2004; Iriarte et al. 2007). Sumado a esto, esta zona presenta una elevada presión antrópica producto de actividades industriales, turísticas, urbanas y rurales, con un intenso desarrollo de la acuicultura (Cursach & Rau 2008). De hecho, el 60% del área del SER (aproximadamente 10.280 Ha) es apta para la acuicultura, concentrando parte importante de industria salmoniculora y mitilicultora (Daneri 2007; Valle-Levinson et al. 2007). El chorito o mejillón chileno (*Mytilus chilensis*), la cholga (*Aulacomya ater*) y el choro (*Choromytilus chorus*) son los mitílidos de mayor importancia comercial la Región de Los Lagos, con capturas aproximadas de 38.000 toneladas (SERNAPESCA 2019).

En 2018, Chile se convirtió en el quinto mayor exportador de pescado y productos pesqueros, aunque en 2019 su valor disminuyó un 3% (FAO 2020). Sólo en las regiones X, XI y XII de la Patagonia chilena se produce en promedio el 95 % del salmón que se exporta en el país. En la región de Los Lagos se

produce aproximadamente el 85% del pescado, marisco y algas para consumo nacional y exportación (Cabello & Godfrey 2016). La pesca y la acuicultura han tenido un crecimiento expansivo, lo que ha permitido el desarrollo de proyectos y la creación de capacidades de adaptación y resiliencia sobre los efectos del cambio climático en ambas actividades (Daneri 2007; FAO 2018). Sin embargo, estas actividades, además de estar expuestas a conflicto de interés por uso del borde costero, se enfrentan a fenómenos ambientales como Floraciones de Algas Nocivas (FAN), presencia de especies de microalgas (Daneri 2007) con efectos adversos en la explotación acuícola, salud humana, turismo y en poblaciones de organismos marinos (Sar et al. 2002).

Investigar la composición de la comunidad fitoplanctónica y los factores que la controlan, ayudará a una mejor comprensión de los ciclos biogeoquímicos (Cuevas et al. 2019). Además, de la eficiencia de la bomba biológica (donde el CO<sub>2</sub> atmosférico es capturado por organismos y depositado en el océano profundo) (Sarmiento & Sundquist 1992) y la influencia de las actividades acuícolas características e intensivas en la zona.

### Comunidad fitoplanctónica

El plancton se caracteriza por derivar en la columna de agua y depender del movimiento de las corrientes para su transporte, y poseer tamaños que van de micrones hasta un poco más de un metro. Categóricamente se agrupan en virioplancton (virus), bacterioplancton (bacterias y arqueas), fitoplancton (algas) y zooplancton (animales) (Escribano & Castro 2004). El fitoplancton está conformado por organismos microscópicos, autótrofos fotosintéticos, heterótrofos o mixótrofos, y taxonómicamente muy diversos. Los principales grupos del fitoplancton son diatomeas, dinoflagelados, cianófitas o algas verde azules, algas pardas y cocolitofóridos (Mitra & Zaman 2016). Pueden ser unicelulares o formar cadenas y colonias, alcanzando tamaños entre 1 µm y 100 µm. Las comunidades de fitoplancton se caracterizan por crecer de manera rápida y con una capacidad de renovarse en cortos periodos de tiempos, 1 a 3 días (Escribano & Castro 2004).

El fitoplancton capta, retiene y transfiere elementos esenciales para la vida, aportando a la regulación de los ciclos biogeoquímicos marinos (i.e. Carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S)) (Escribano & Castro 2004). Estos productores primarios (generan MO por la conversión de C inorgánico) se encargan de la etapa inicial del proceso de producción de materia orgánica (MO) en el océano, siendo la base de las tramas tróficas (Fuhrman 1992; McLusky & Elliott 2004). Por lo tanto, su crecimiento y

acumulación en zonas específicas del océano potencia la abundancia de otras especies marinas, lo que beneficia la pesca y acuicultura (Sigman & Hain 2012).

A pesar de las altas concentraciones de nutrientes en los estuarios, múltiples interacciones de factores influyen en la distribución, abundancia y tasa fotosintética del fitoplancton (luz, estrés osmótico, turbidez, turbulencia, entre otros). De hecho otros factores como el pastoreo, resuspensión o la deposición pueden influir también en su biomasa (McLusky & Elliott 2004). Las comunidades fitoplanctónicas en ecosistemas estuarinos experimentan cambios rápidos en limitaciones (nutrientes, luz) y características del ambiente que influyen su composición (McLusky & Elliott 2004). De hecho, la composición fitoplanctónica y sus ciclos estacionales (crecimiento y declive) se ven modificados en distintas regiones del mundo, por condiciones fisicoquímicas e hidrológicas (temperatura, irradiancia solar, estratificación de la columna de agua, etc.) (Sapiano et al. 2012), las cuales son en gran medida influenciadas por las interacciones tierra-océano como el aporte de agua dulce proveniente del continente (McLusky & Elliott 2004). Este aporte puede generar dos efectos diametralmente opuestos; i) estimular la producción primaria durante periodos de limitación de nutrientes en el ecosistema, y, ii) generar una disminución de la abundancia fitoplanctónica cuando se reduce el paso de la luz por la turbidez (McLusky & Elliott 2004).

En los fiordos y canales de la Patagonia Chilena el fitoplancton presenta cambios estacionales, en gran medida modulados por precipitaciones, escorrentía superficial, viento y radiación solar (Acha et al. 2004). En esta región, la estructura de comunidades de fitoplancton y la dominancia de ciertas especies experimentan cambios rápidos según su forma química, concentración y las razones atómicas de nutrientes (ej., N:P:Si:Fe) en el ambiente (Labbe Ibanez et al. 2015), la variabilidad climática estacional, disponibilidad de luz, estabilidad de la columna de agua y los regímenes de condiciones físicas (Cuevas et al. 2019).

En las aguas del norte de la Patagonia chilena se han identificado dos periodos de productividad (elevadas densidades y biomasa fitoplanctónica)(Pérez-Santos et al. 2021). El periodo menos productivo es durante el invierno, con valores de densidad total de fitoplancton menores a las 500 células mL<sup>-1</sup>, biomasa de carbono menor a 200 µg L<sup>-1</sup>, y concentración de clorofila *a* (Cl-*a*) entre 0,001-7 µg L<sup>-1</sup> (Iriarte & Gonzalez 2008). Las menores densidades celulares en esta época se registran durante agosto (4-9 mg m<sup>-2</sup>) (Montero et al. 2011). Al finalizar el invierno, el incremento del régimen de luz en combinación con el cambio estacional en la dirección de los vientos del sur (Iriarte et al. 2017), produce un aumento en la densidad fitoplanctónica. Esto genera el periodo más productivo que se extiende desde la transición de invierno-primavera hasta el otoño. Se observan ensamblajes dominados por diatomeas formadoras de

cadena (Iriarte et al. 2017), con valores de densidad total de fitoplancton cercanos a las 5.000 células mL<sup>-1</sup>, biomasa de carbono menor a 600 µg L<sup>-1</sup>, y concentración de Cl-*a* entre 1-40 µg L<sup>-1</sup> (Iriarte & Gonzalez 2008). Los mayores valores de concentración celular en la época son en febrero (20–45 mg m<sup>-2</sup>) (Montero et al. 2011). Aunque ambas temporadas suelen tener periodos más o menos constantes en el tiempo, la concentración de clorofila puede variar drásticamente debido a la relación de la radiación solar con otros factores (e.g. viento, descargas fluviales, eutrofización antropogénica, etc.) y modificar las formas y tamaños de las comunidades. Esto puede modificar procesos ecológicos importantes y el destino de la materia orgánica (Montero et al. 2011; Cuevas et al. 2019). Para la zona, se ha reportado durante el periodo primavera-invierno que predominan comunidades fitoplanctónicas de pequeños tamaños (picofitoplancton <2µm), con dominancia de flagelados. Por su parte, en la época de mayor productividad, la comunidad está representada en mayor medida por organismos microfitoplanctónicos (> 20 µm) en su mayoría diatomeas (e.g. *Skeletonema*, *Navicula*, *Chaetoceros*, *Thalassiosira* y *Rhizosolenia*) (Iriarte & Gonzalez 2008; Montero et al. 2011; Iriarte et al. 2017).

Por otra parte, algunos autores han evaluado la influencia que tiene la descarga de aguas dulces sobre comunidades fitoplanctónicas. Cuevas y colaboradores (2019) encontraron una correlación negativa entre la descarga de agua dulce con la salinidad y densidad; y una correlación positiva entre la estratificación de la columna de agua y la concentración de ácido silícico. Concluyen además que la descarga de ríos y los nutrientes (nitrato y fosfato) son importantes en la regulación de valores de Cl-*a* dado que limitan el tamaño de células grandes y favorecer a las pequeñas. Por su parte, el silice favorece a las especies grandes, especialmente diatomeas (especialmente de *Skeletonema* spp.)

Iriarte y colaboradores (2017), mediante la utilización de series de tiempo de datos atmosféricos, hidrológicos y oceanográficos, concluyen que el aumento de temperatura del agua y la reducción de aportes de agua dulce modifican la columna de agua. Como consecuencia, existe un debilitamiento de la estratificación vertical y crea condiciones favorables para el desarrollo de floraciones algales (principalmente de diatomeas formadoras de cadenas). El fitoplancton (incluyendo los responsables de FAN), por sus tiempos generacionales y vida corta serán unos de los organismos que se afectarán más rápido por alteraciones en ecosistemas marinos y estuarinos (Irwin et al. 2015). Las FAN tienen un alto grado de impacto ambiental, ecológico y socioeconómico. Alteran el ecosistema disminuyendo las concentraciones de oxígeno por procesos de respiración o descomposición hasta incluso generar rápidamente condiciones de hipoxia o anoxia. Además, cubren el medio con altas concentraciones de biomasa, en algunas ocasiones cambiando la coloración del agua (e.g. rojo, pardo, verde) y además algunas especies producen biotoxinas que afectan otros organismos (peces, aves, mamíferos) (Sellner et al. 2003).

Dentro de las causas que producen este tipo de floraciones se encuentra la circulación oceánica y estuarina, la influencia de agua dulce proveniente de ríos (alterando las concentraciones y/o razones de nutrientes) y la combinación de parámetros físicos (corrientes, salinidad, nutrientes, temperatura, estratificación) (Sellner et al. 2003) y atmosféricos.

En Chile, existen cuatro programas de monitoreo asociados a las FAN, los cuales son coordinados por diferentes instituciones de carácter público y/o privado; i) Programa de Sanidad de Los Moluscos Bivalvos (PSMB) coordinado por el Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA); ii) Instituto Tecnológico del Salmon (INTESAL) implementado por la industria salmonicultora; iii) Servicio de Salud coordinado por las secretarías regionales ministeriales de Salud regionales y iv) Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) quienes desarrollan el programa de Manejo y Monitoreo de las Mareas Rojas, con el fin de evaluar la distribución y abundancia de especies FAN, presencia y concentración de las principales biotoxinas marinas, además de coleccionar información ambiental (hidrográficos y meteorológicos) para entender la dinámica de este tipo de eventos (IFOP 2020; SERNAPESCA 2020). Las principales especies fitoplanctónicas presentes en Chile y que están asociadas con la aparición de eventos tóxicos corresponde a los dinoflagelados *Alexandrium catenella* (asociado con brotes de toxina paralizante en moluscos, PSP por sus siglas en inglés :Paralytic Shellfish Poisoning) (Díaz et al. 2018), *Dinophysis acuta* y *D. acuminata* (producción de toxinas lipofílicas (Alves-de-Souza et al. 2008), *Prorocentrum reticulatum* (Sar et al. 2002), las diatomeas del género *Pseudo-nitzschia* (productoras de toxinas amnésicas, ASP del inglés Amnesic Shellfish Poisoning (Sar et al. 2002).

Hasta aquí, es claro el rol que posee el fitoplancton en los ciclos biogeoquímicos y como interviene y modulan tanto el ecosistema circundante y las actividades antrópicas. Considerando que los estudios estacionales de las comunidades fitoplanctónicas en fiordos son claves para la detección de cambios ecosistémicos ante variaciones ambientales (cambios fenológicos) y cambios en el flujo de C, este estudio evalúa mediante muestreos estacionales de alta resolución, la estructura de la comunidad fitoplanctónica (abundancia, composición taxonómica y biomasa), destacando las microalgas formadoras de FAN y como los factores fisicoquímicos e hidroclimáticos podrían influenciar en la estructura de la comunidad fitoplanctónica durante una época invernal y estival del Sistema Estuarino Reloncaví.

# HIPÓTESIS

## Hipótesis General

El Sistema Estuarino Reloncaví (SER) presenta una estratificación de la columna de agua, la cual es modulada por el ingreso de agua dulce proveniente de los ríos tributarios hacia el Fiordo de Reloncaví. Estos factores fisicoquímicos e hidroclimáticos estacionales influyen la composición taxonómica y abundancia de las comunidades fitoplanctónicas, con presencia de floraciones algales de diferente intensidad a lo largo del año. Así, se espera encontrar diferencias entre las comunidades de fitoplancton de un sitio con influencia directa de agua proveniente del Fiordo y otro más alejado durante los periodos estival e invernal.

## Hipótesis Específicas

1. El ensamble fitoplanctónico estará conformado principalmente por diatomeas formadoras de cadenas, seguido por dinoflagelados, lo que será modulado por las condiciones oceanográficas del SER. La presencia de especies potencialmente nocivas incrementará durante el periodo estival, mientras la riqueza será más alta en la estación ubicada en la boca del Fiordo de Reloncaví.
2. La distribución estacional fitoplanctónica estará caracterizada por dos periodos de alta abundancia a lo largo del año, siendo más alta en la época estival en ambos sitios de muestreo en comparación a invierno. La estación con mayores abundancias será la más cercana a la boca del Fiordo de Reloncaví.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Determinar la composición taxonómica y la abundancia de las comunidades fitoplanctónicas en el Sistema Estuarino Reloncaví, sus patrones de variabilidad espacio-temporal y su relación con parámetros fisicoquímicos e hidroclimáticos.

### Objetivos Específicos

- Caracterizar y comparar los factores fisicoquímicos de la columna de agua de dos sitios de muestreo en el Sistema Estuarino Reloncaví a lo largo de ocho campañas oceanográficas.
- Evaluar la composición taxonómica de las comunidades fitoplanctónicas y sus variaciones temporales.
- Determinar la abundancia y variabilidad de las comunidades fitoplanctónicas durante los periodos estival e invernal en ambos sitios.
- Relacionar la composición taxonómica y abundancia del fitoplancton con parámetros fisicoquímicos e hidroclimáticos.
- Identificar la presencia de microalgas que son potenciales productoras de floraciones algales nocivas (FAN) en la zona de estudio y relacionarlas con las condiciones oceanográficas e hidroclimáticas de la zona de estudio.

## MÉTODOS

Se establecieron dos puntos de muestreo (Figura 2), localizados estratégicamente en el centro del seno (Estación SR;  $-41.636^{\circ}\text{S}$ ;  $-72.834^{\circ}\text{O}$ ) y en la boca del fiordo (Estación FRb;  $-41.722^{\circ}\text{S}$ ;  $-72.677^{\circ}\text{O}$ ) Reloncaví. La estación SR se encuentra en el sitio de fondeo de la boya oceanográfica del Observatorio Marino de Reloncaví (OMARE) del Centro i-mar de la Universidad de Los Lagos, mientras la estación FRb se localizó cerca de la localidad de Caleta La Arena, en la boca de descarga del Fiordo de Reloncaví. Un total de 8 campañas de alta resolución temporal fueron realizadas durante los periodos estival (noviembre, diciembre 2018; enero, febrero 2019) e invernal (julio, agosto, octubre, noviembre 2019). Parte de las variables fisicoquímicas para la época estival fueron analizadas en la Tesis “Caracterización de la influencia estuarina en el Seno de Reloncaví y su relación hidroclimática” por Iturria, 2020, sin embargo, se emplearon en esta investigación para completar el periodo de muestreo.

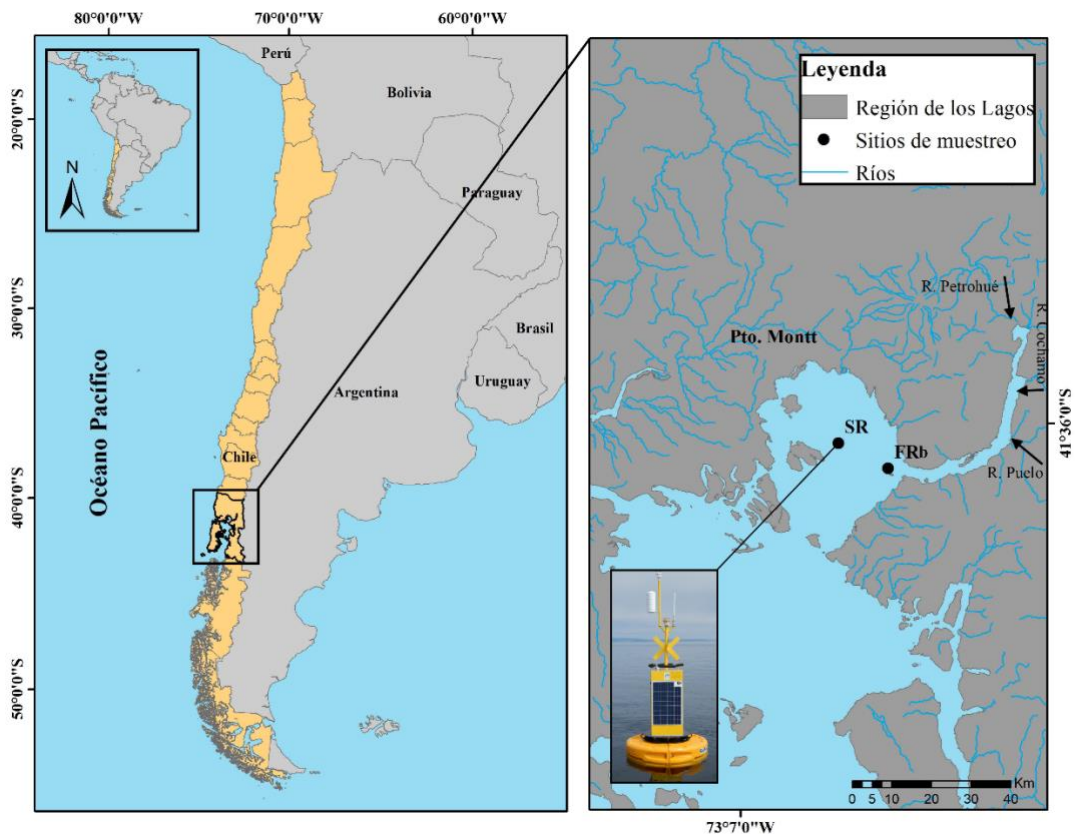


Figura 2. Sitios de muestreo en el Sistema Estuarino Reloncaví: Seno de Reloncaví (SR) y boca del Fiordo de Reloncaví (FRb).

## Variables hidroclimáticas

Los datos de precipitaciones fueron obtenidos a partir de los boletines climatológicos mensuales de libre acceso de la Dirección General de Aguas (DGA) (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/boletinClimatologicoMensual>). Se utilizaron datos de precipitación acumulada diaria de la ciudad de Puerto Montt, Región de Los Lagos.

Se utilizó como referencia el caudal del río Puelo, uno de los ríos tributarios que aporta más del 80% de agua dulce al sistema (Lara et al. 2008; Muñoz et al. 2016). Los datos de caudal fueron obtenidos desde el portal web del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) (<https://www.cr2.cl/datos-de-caudales/>). Se utilizaron datos de caudal medio diario del río Puelo ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ). Para la precipitación y el caudal se utilizaron datos correspondientes al periodo entre 2003 y 2020. Los datos históricos fueron promediados mensualmente para observar los patrones anuales y realizar una comparación respecto a los dos años en los que se desarrolló el presente estudio. También se calculó la anomalía de precipitación y caudal para el año 2018 y 2019.

Los datos del viento en la superficie y la presión atmosférica al nivel del mar se obtuvieron de los datos climáticos de reanálisis ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu>). Estos datos horarios cubrieron el período de 2016 a 2020 en una cuadrícula espacial regular de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . Para el reanálisis de ERA5 se utilizó la asimilación de datos 4D-Var en CY41R2 del ECMWF con 137 niveles en la vertical (el nivel superior a 0,01 hPa). Para el producto viento, ERA5 incorporó diferentes datos de dispersómetros satelitales como AMI (ERS 1 y ERS2), ASCAT (METOP-A/B), OSCAT (OCEANSAT-2) y SeaWinds (QuikSCAT), y datos *in situ* proporcionados por el sistema de información de la Organización Meteorológica Mundial (WMO-WIS) (por ejemplo, estaciones terrestres, boyas a la deriva, estaciones de barcos, radiosondas, radares y datos de aeronaves).

Luego del procesamiento de los datos, se realizaron figuras para el nivel (0,01 hPa = 10m) donde se extrajeron las componentes zonal (U10) y meridional (V10) del viento superficial. Luego se realizó un promedio estacional en cada una de las estaciones (puntos de la grilla) y se calculó la magnitud del viento según la siguiente ecuación:

Eq I. Magnitud del viento

$$mag = \sqrt{U10^2 + V10^2}$$

Donde:

*mag*: magnitud del viento

*U10*: componente zonal

*V10*: componente meridional

Los datos fueron validados según Pérez-Santos y colaboradores (2019), que reportaron la correlación estadísticamente más alta entre los valores de vientos superficiales del ERA5 y los datos meteorológicos *in situ* de la boya oceanográfica OMARE y un faro de la Armada instalado en el sistema de fiordos patagónicos.

### Variables oceanográficas

En ambos sitios de muestreo (SR y FRb) se obtuvieron parámetros oceanográficos, utilizando un CTD AML Modelo Metrec-XL que perfila la temperatura y la salinidad en función de la presión, equipado con sensores adicionales de pH, oxígeno disuelto (mL/L y  $\mu\text{M}$ ) y su cálculo del porcentaje de saturación de oxígeno (% sat.) y la fluorescencia (V) (Tabla 1.).

Tabla 1. Características técnicas del CTD-AML

Equipo	Sensor	Rango de medición	Resolución del sensor
CTD AML Modelo Metrec-XL	Presión	0-500 dbar	0,05%
	Temperatura	-2° a 32°C	$\pm 0,005^\circ\text{C}$
	Conductividad	0-90 mS/cm	$\pm 0,01 \text{ Ms/cm}$
	pH	0-14	$\pm 0,01$
	Oxígeno disuelto	0-800 $\mu\text{M}$	5%
	Fluorescencia	0-5 voltaje	0,0004

La identificación de masas de agua se realizó mediante diagramas T-S, utilizando los valores característicos de los tipos de agua usados por Sievers y colaboradores (2002) y Sievers y Silva (2006).

Adicionalmente, se calculó la frecuencia de Brunt-Väisälä ( $N^2$  [ciclos hora<sup>-1</sup>]) (Eq III) para cuantificar la estratificación de la columna de agua con la siguiente ecuación (Plata & Filonov 2007):

Eq II. Variabilidad en la estratificación

$$N^2 = \left(\frac{g}{\rho}\right) * \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)$$

Donde:

$N$ : es la frecuencia de Brunt-Väisälä

$g$ : es la aceleración de la gravedad ( $9,8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ )

$\rho$ : es la densidad del agua

$z$ : es la profundidad

La estratificación de la columna de agua también se calculó utilizando el parámetro de estratificación  $n_s$  (Haralambidou et al. 2010)

Eq III. Parámetro de estratificación

$$n_s = \left( \frac{\delta S}{S'_m} \right)$$

Donde

$$\delta S = S_{fondo} - S_{superficie}$$

$$S'_m = \left( \frac{1}{2} \right) S_{fondo} + S_{superficie}$$

$S_{fondo}$  y  $S_{superficie}$  son las salinidades de la mayor y menor profundidad, respectivamente. Si  $n_s < 0.1$ , la columna de agua está completamente mezclada,  $0.1 < n_s < 1.0$  la columna de agua se encuentra parcialmente mezclada y cuando  $n_s > 1.0$  la columna de agua se encuentra estratificada con la presencia de una pluma salina.

Para los modelos de circulación y edad del agua en el sistema Estuarino Reloncaví se usó el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting (WRF) y el modelo hidroclimático MIKE 3D FM según lo indicado por Pinilla y colaboradores (2020). Se realizó un promedio de tres años para primavera, verano, otoño e invierno, en las profundidades de 0 a 10 m y de 10 a 25m. La velocidad de la corriente se expresó en  $\text{ms}^{-1}$  y la edad del agua en días.

Se colectaron muestras de agua con botellas Niskin en 7 profundidades discretas (0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 m) en cada una de las dos estaciones de muestreo, en las cuales se midió clorofila- $a$  (Cl- $a$ ), nutrientes inorgánicos nitrogenados (nitratos y nitritos), fosfatos y silicatos y carbono orgánico ( $C_{org}$ ), nitrógeno total particulado (NPT) e isótopos estables de nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) y carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) en material particulado.

### Determinación de Clorofila-*a*

Para la medición de la fluorescencia de la Cl-*a*, se filtraron 500 mL con filtros de fibra de vidrio de 0.7 µm de poro y 25 mm de diámetro (GF/F, Whatman). En el laboratorio, se adicionó a cada filtro 10 mL de acetona al 90%, se aplicó ultrasonido en un baño de agua fría por 10 minutos, se refrigeraron a 4°C durante 24 h en oscuridad y se midió el extracto con un fluorómetro Turner Design Trilogy. Las concentraciones se estimaron según lo establecido por Holm-Hansen & Riemann (1978). Para calcular la concentración de Cl-*a* de las muestras se realizó una curva de calibración con un estándar Clorofila *a* (SIGMA: 96145).

Los registros de fluorescencia fueron convertidos a valores de Cl-*a* usando las mediciones *in-situ*. Se realizó una correlación con los valores de Cl-*a in-situ* y la fluorescencia obtenidos directamente del sensor calibrado ( $R^2 = 0,99982$ ) (Anexo 1), usando la ecuación:

Eq IV. Correlación de Cl-*a in-situ* y la fluorescencia

$$y = 4206,2x - 1208,7$$

Donde:

y: es la concentración de Cl-*a* calculada

x: valor de fluorescencia del CTD

### Determinación de nutrientes inorgánicos

A partir de las muestras de agua se filtraron 15 mL en duplicado por cada profundidad a través de filtros de 0,7 µm de poro, utilizando una bomba peristáltica y se almacenaron a -20°C para su posterior análisis (Kattner 1999). Los nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ), ortofosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) y silicatos ( $\text{SiO}_2^{4+}$ ), se midieron con un autoanalizador SEAL AutoAnalyzer 3H y métodos estándar de agua de mar (Kattner & Becker 1991) en el laboratorio de Biogeoquímica del Departamento de Oceanografía (Universidad de Concepción), en colaboración con la Dra. Laura Farías. Los resultados de la sílice fueron corregidos por el efecto de la salinidad como  $\text{SiO}_2\text{SEF}$  (µM)

Eq V. Corrección de la sílice por la salinidad

$$\text{SiO}_2\text{SEF} = 1,3 - 8,253x10^{-3}S$$

Donde:

S: es la salinidad *in situ*

### C<sub>org</sub>, NPT e isótopos de $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{13}\text{C}$ en material particulado

El análisis de C<sub>org</sub>, NPT e isótopos de  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ , se realizó en colaboración con el Laboratorio de Biogeoquímica e Isótopos Estables Aplicados (LABASI) a cargo del Dr. Claudio Latorre. De las muestras de agua se filtraron entre 8 y 10 litros, con filtros de fibra de vidrio de 0.7  $\mu\text{m}$  de poro y 47 mm de diámetro (GF/F, Whatman) previa calcinación a 450° C por 4 h. Para preservación, se congelaron los filtros en sobres de aluminio a -20°C hasta su procesamiento. Una vez en el laboratorio, se liofilizaron y pesaron. Para remover el componente inorgánico del material particulado, los filtros se pusieron en una cámara de fumigación (0.1N HCl) para posteriormente ser secados a temperatura controlada (50°C). El contenido de C<sub>org</sub> y NPT se cuantificó mediante combustión relámpago a alta temperatura con un analizador elemental (EA Flash 2000 Thermo Finnigan) midiendo los isótopos estables de nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) y carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) en un espectrómetro de masa IRMS Delta V Advantage (Verardo et al. 1990). Los valores de razón isotópica de carbono se calcularon en relación al estándar de Viena Pee Dee Belemnite (PDB) y el de nitrógeno con N<sub>2</sub> atmosférico (Fry & Sherr 1989a), como sigue (Fry & Sherr 1989b):

Eq VI. Razón isotópica

$$R = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \text{ ó } \frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}}$$

Eq VII. Comparación con un estándar internacional

$$\delta X(\text{‰}) = \left[ \left( \frac{R \text{ muestra}}{R \text{ estandar}} \right) - 1 \right] * 100$$

donde:

Notación delta ( $\delta$ ): Es una comparación con un estándar internacional. Las relaciones isotópicas se determinaron según los estándares internacionales de la Agencia Internacional de Energía Atómica (Viena): IAEA-N1 y IAEA-N2 para  $^{15}\text{N}$ , NBS 22 y USGS-24 para  $^{13}\text{C}$ , y peptona como estándar interno.

X: isótopo de interés

R: proporción de átomos del isótopo pesado y del liviano.

$\delta X$ : Valores positivos implican enriquecimiento en el isótopo más pesado en relación con el estándar y valores negativos empobrecimiento.

#### *Fuentes de materia orgánica en SER*

La producción de materia orgánica alóctona para el SER fue estimada en base al modelo de mezcla de dos fuentes (Bianchi, 2007) ya empleados para la Patagonia Chilena (Lafon et al., 2014; González et al., 2016), usando la siguiente ecuación:

Eq VIII. Producción de materia orgánica alóctona

$$\%C_{alociono} = \left( \frac{\delta^{13}C_{muestra} - \delta^{13}C_{marino}}{\delta^{13}C_{terrestre} - \delta^{13}C_{marino}} \right)$$

donde:

$\delta^{13}C$  muestra: es la composición isotópica de la muestra

$\delta^{13}C$  marino: es el valor del end-member marino de la estación más oceánica

$\delta^{13}C$  terrestre: es el valor del end-member fluvial para POC. Para nuestro caso se empleó los valores más extremos como end-member fluvial/lacustre  $\delta^{13}C$  -32,92 y como end-member marino -18,03.

#### **Análisis de la comunidad fitoplanctónica**

La recolección de muestras de agua para análisis de fitoplancton se realizó en los dos sitios (SR y FRb), durante las ocho campañas de muestreo. Los análisis cualitativos y cuantitativos de fitoplancton fueron realizados en colaboración con el Centro de Estudios de Algas Nocivas (CREAN) del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), Puerto Montt.

#### *Análisis cualitativo*

La recolección de muestras se realizó utilizando redes de plancton con trama de malla de 23  $\mu m$  y 5  $\mu m$ , mediante lances verticales desde 20 m de profundidad hasta superficie y fijadas con formalina. Las muestras fueron preservadas en frascos plásticos.

Se utilizó un microscopio óptico de campo luminoso (100x y 400x), con condensador de contraste de fase y equipo de epifluorescencia para la identificación de todas las microalgas contenidas hasta el menor nivel taxonómico posible.

### Análisis cuantitativo

Para el análisis cuantitativo se emplearon 50 mL de las muestras de aguas colectadas cada 5 metros desde la superficie, hasta los 30 metros y fijadas con formalina. Las muestras se contabilizaron a nivel específico en cámaras de sedimentación, con volumen variable según la concentración (la más frecuente fue de 10 mL). Para el recuento celular se aplicó la técnica de Utermöhl (1958) en microscopios invertidos, complementados con equipo de contraste de fase.

### Análisis de datos

Los datos obtenidos del CTD-O se sometieron a un control de calidad, eliminando los registros fuera de rango, posteriormente se realizaron promedios cada 1 metro de todas las variables. Los análisis oceanográficos se realizaron utilizando el programa *Ocean Data View* (ODV), versión 5.3.0 (Schlitzer 2020). Se emplearon los valores de salinidad absoluta (g/kg), temperatura conservativa (°C) y la anomalía de densidad ( $\text{Kg m}^{-3}$ ) calculados en ODV mediante las metodologías propuesta en TEOS-10 (IOC et al. 2010) (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones para variables oceanográficas propuesta en TEOS-10

Variable oceanográfica	Fórmula
Salinidad absoluta donde	$S_A = S_R + \delta S_A = \left( \frac{35,16504 \frac{\text{g}}{\text{kg}}}{35} \right) S_P + \delta S_A$ <p> <math>S_P</math>= Salinidad práctica  <math>S_R</math>= Salinidad de referencia más precisa del agua de mar del Atlántico  <math>\delta S_P</math>= Anomalía geográficamente dependiente que corrige las sustancias disueltas que no afectan la conductividad         </p>
Temperatura conservativa donde	$\Theta = \left( \frac{h^0}{C_p^0} \right)$ <p> <math>C_p^0</math>=3989,24495292815 J/kg K (referencia de la capacidad calorífica específica, para estar lo más cerca del promedio espacial de la capacidad calorífica del océano)         </p>
Anomalía de densidad donde	$\sigma_{s,t,p} = \rho - 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ <p>           Densidad anómala in-situ= agua dulce a 4°C            Anomalía de la densidad de la presión atmosférica         </p>

Se realizaron análisis multivariados sobre los datos biológicos y ambientales utilizando los software PRIMER-E (versión 7.0.21) (Clarke et al. 2014) y RStudio. Se usó gráfico de sombra (shade plot) en cada sitio como representación visual de la matriz de abundancia del fitoplancton (después de la transformación

de  $\sqrt[4]{abundancia}$  para aumentar la importancia de las especies raras), en donde el blanco denota ausencia y la gama de colores la abundancia (transformada) en los datos (Clarke et al. 2014).

Para establecer si existían diferencias significativas en la estructura comunitaria del fitoplancton entre sitios y épocas, se utilizó el análisis de similitud (ANOSIM) y posteriormente los datos se sometieron a un análisis de ordenación no-métrica multidimensional (nMDS), para su visualización en dos dimensiones. La identificación de los aportes de las especies que más contribuyen a la similitud y la disimilitud entre sitios y épocas se realizó con la prueba de porcentaje de similitud (SIMPER); usando el software RStudio, versión 1.3.1093 (2009-2020 RStudio, PBC). La relación entre variables ambientales y la abundancia fitoplanctónica se estableció empleando un análisis de correspondencia canónica (CCA).

## RESULTADOS

### Condiciones hidroclimáticas

En 2018, las precipitaciones diarias en Puerto Montt fluctuaron entre 0 mm a 54,9 mm. En los meses de marzo, octubre y noviembre se registraron precipitaciones sobre los valores medios climatológicos históricos (2003-2020) (Figura 3 a y Figura 3 b). Mientras, 2019 se caracterizó por presentar un déficit de precipitaciones, siendo menores con respecto a los valores climatológicos mensuales históricos, con registros de 0 mm a 54,4 mm (Figura 3 a y Figura 3 b). En promedio durante 2018 y 2019 se observó una tendencia al déficit en precipitaciones. Esta situación se acentuó en el 2019, con valores muy por debajo de la media (Figura 3 c).

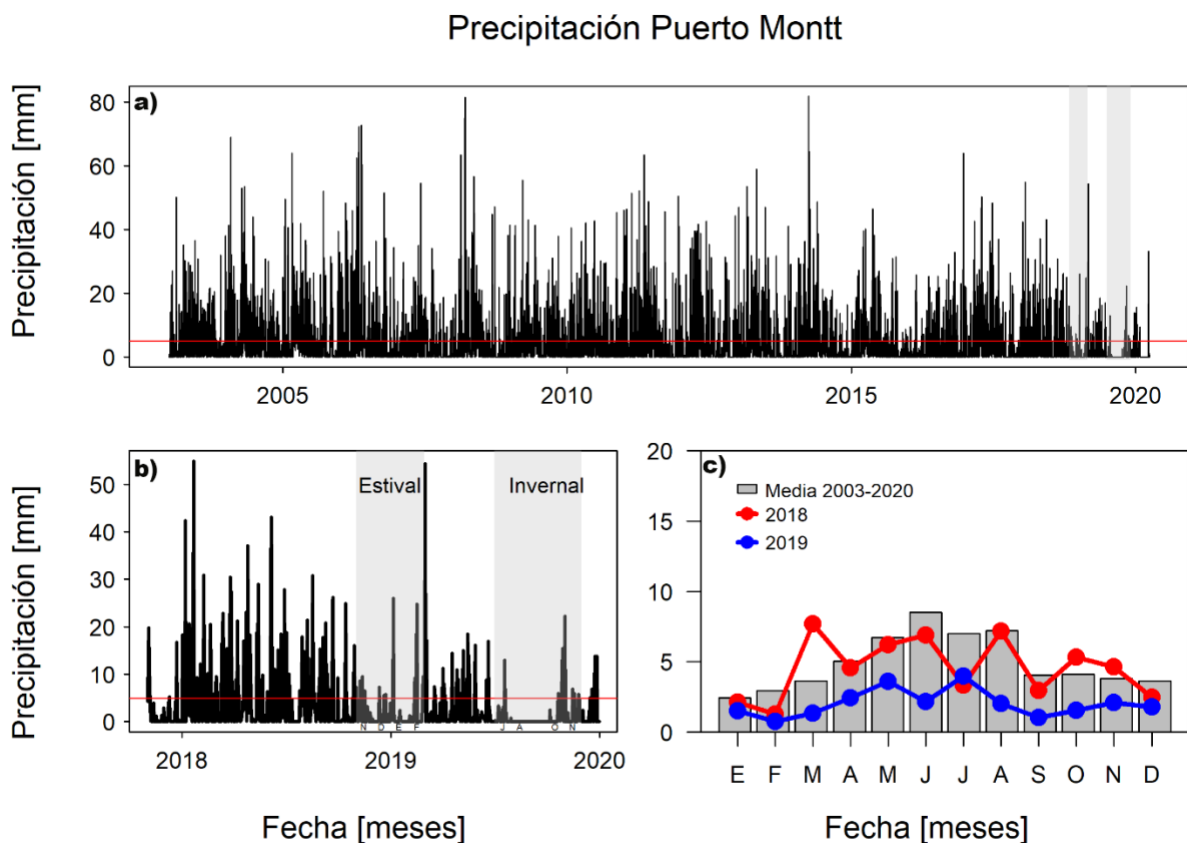


Figura 3. Serie de tiempo de precipitación en la estación Meteorológica localizada en el aeropuerto el Tepual, Puerto Montt (Datos de la Dirección Meteorológica de Chile). a) Serie de tiempo diaria en el periodo 2003-2020. b) Serie de tiempo diaria durante 2018 y 2019. Las barras grises muestran el periodo

de las campañas de verano e invierno. c) Datos de precipitación media mensual y la anomalía de precipitación para el 2018 y 2019.

El análisis de la serie de caudal del río Puelo, principal tributario de agua dulce al fiordo Reloncaví, mostró aportes que superaron los  $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  durante el invierno y la primavera (Figura 4 a). A finales del 2018 y principios de 2019, se registraron caudales relativamente bajos acompañados por escasas precipitaciones. Solo se pudo observar un evento de aumento de descarga con valores superiores a  $300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  (Figura 4 b). A pesar de ello, durante 2018, este río registró una memoria hidrológica que le permitió mantenerse en la media o levemente por encima de ella. En la época invernal de 2019, los valores estuvieron en el rango de los valores medios (Figura 4 c).

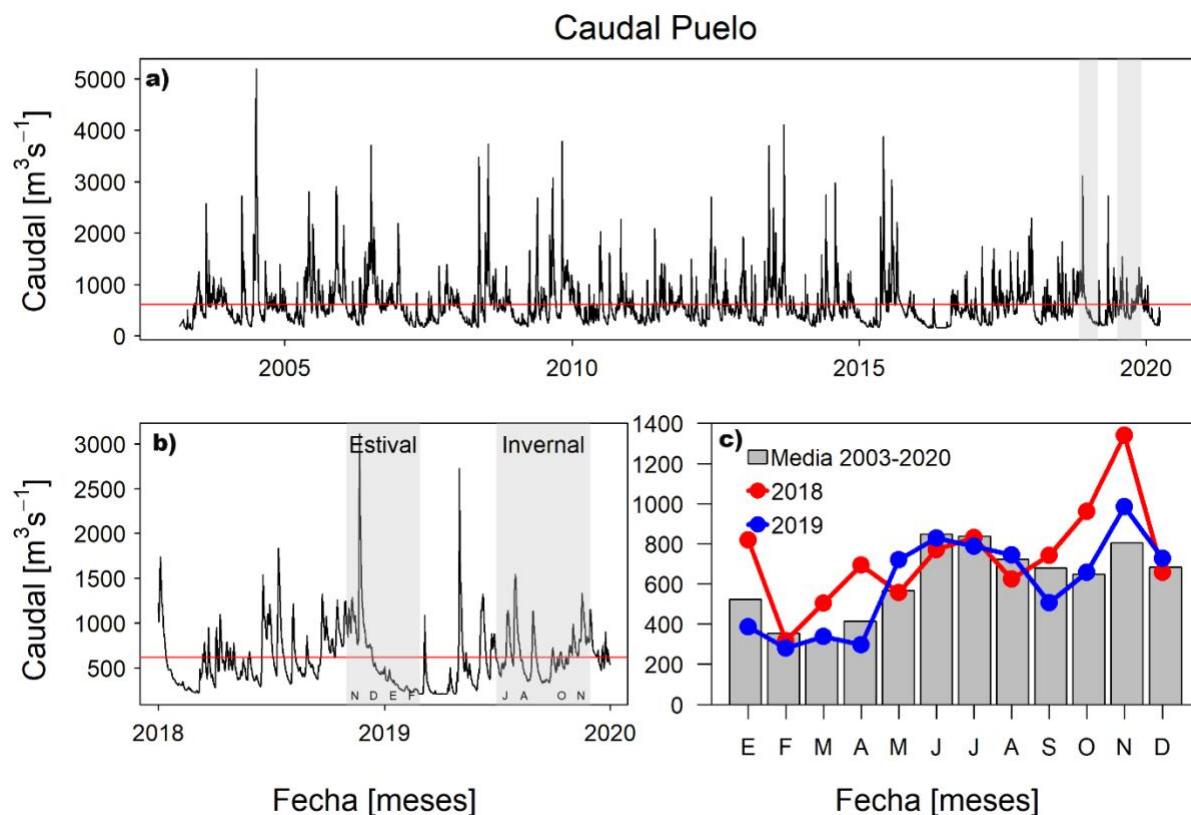


Figura 4. Serie de tiempo del caudal del Río Puelo. a) Serie de tiempo diaria en el periodo 2003-2020. b) Serie de tiempo diaria durante 2018 y 2019. Las barras grises muestrean el periodo de las campañas de verano e invierno. c) Datos de caudal medio mensual y la anomalía de caudal para el 2018 y 2019.

Los productos de reanálisis de vientos se muestran en la Figura 5. El promedio para cada estación climática está en el panel de la izquierda (círculo magenta), de coordenadas (41,75°, -72,75°-O), fue representativa del comportamiento del viento en el Seno de Reloncavi. En los productos de reanálisis para el viento durante el período 2016-2020 se presentó una alta variabilidad, con fluctuaciones diarias, semanales y estacionales. Sin embargo, al realizar los promedios estacionales se observó que los vientos dominantes fueron del sureste y sur durante la primavera y llegando hasta el verano, pero con velocidades relativamente menores. Los vientos del norte fueron más dominantes en otoño e intensificándose durante el invierno. Los vientos más fuertes ( $> 7 \text{ m s}^{-1}$ ) fueron registrados en invierno.

La estacionalidad de la componente norte-sur (v) se observa en el dominio del viento desde el norte a noroeste en otoño e intensificándose en invierno. El dominio de la componente desde el sur se observó en primavera-verano. Además, en el dominio de las frecuencias de las direcciones del viento, se encontró un predominio en orden descendente: la combinación de viento sur (56%) en verano, le sigue dirección norte en invierno (54%) y otoño (48%) para volver a total al sur en primavera (40%) (Tabla 3). Por otro lado, las magnitudes presentadas muestran que la mayor frecuencia de eventos de viento fue en invierno con un promedio de  $4,4 \pm 2,2 \text{ m.s}^{-1}$  con una disminución progresiva hacia el verano para luego aumentar en un nuevo ciclo en otoño (Tabla 3).

Tabla 3 . Porcentaje (%), promedio  $\pm$  desviación estándar, mínimos y máximos de frecuencia de vientos para las cuatro estaciones del año comprendidas entre el periodo 2016 a 2020.

Estación climática	Norte	Oeste	Sur	Este	Promedio magnitud	Promedio dirección
Verano	18	22	56	4	$3,3 \pm 1,7$ [0,2; 9,6]	275.7
Otoño	48	10	18	24	$3,9 \pm 2,2$ [0,4; 10,1]	172.3
Invierno	54	13	15	18	$4,4 \pm 2,2$ [0,2; 10,7]	169.3
Primavera	31	25	40	4	$3,6 \pm 1,9$ [0,2; 9,9]	249.6

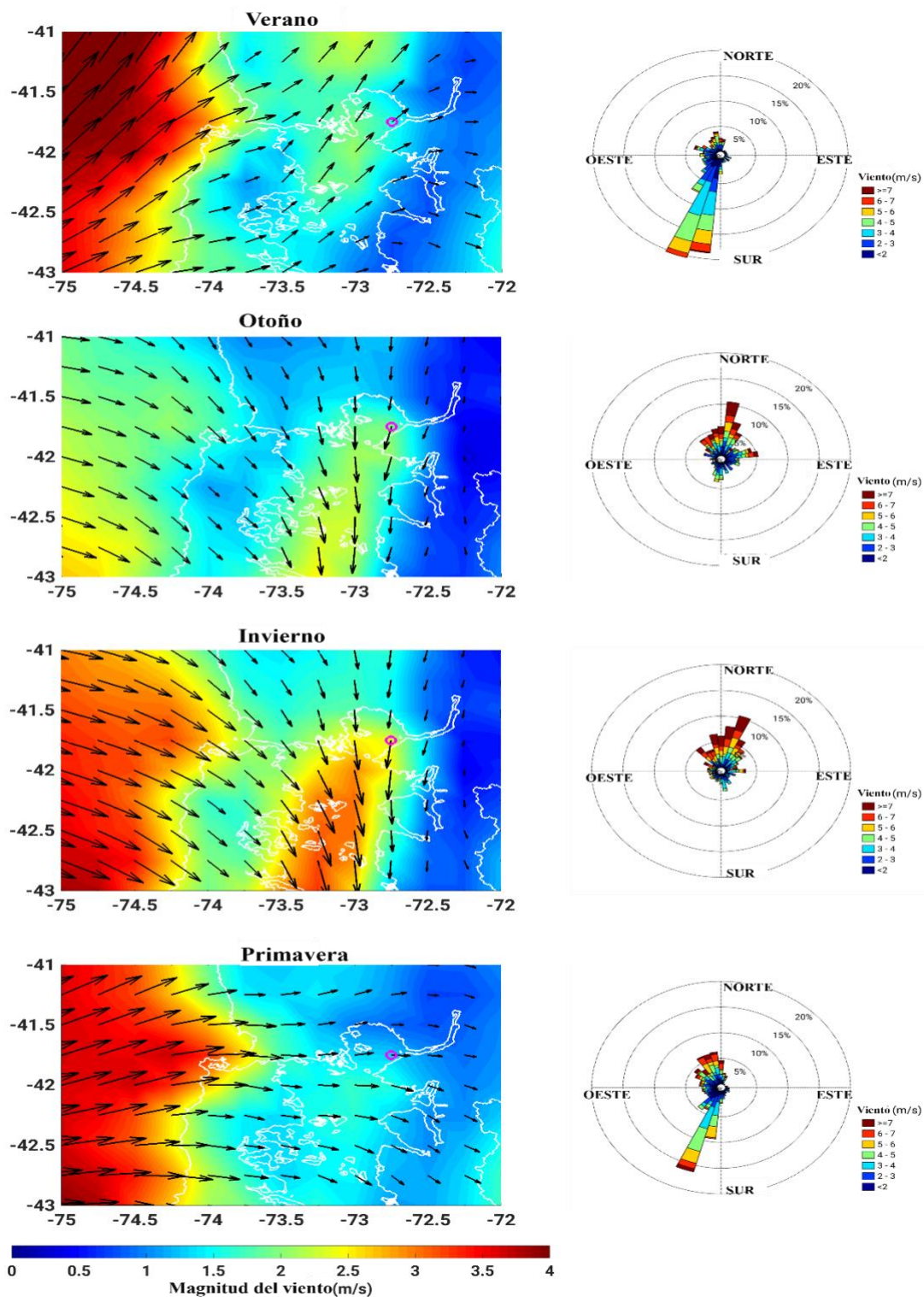


Figura 5. Producto de reanálisis de vientos promedios estacionales para el período de 2016 a 2020 en una cuadrícula de  $0,25 \times 0,25$ . Magnitud del viento en m/s (barra de color), flechas magnitud y dirección del vector velocidad (U10, V10). Rosa de vientos promedio por estación.

## VARIABLES OCEANOGRÁFICAS

Para entender el comportamiento temporal de las condiciones hidrográficas registradas en las dos estaciones de muestreo, se graficó la evolución temporal de los ocho perfiles oceanográficos en cada estación, FRb (Figura 7 y Figura 10) y SR (Figura 8 y Figura 11). Se observaron diferencias de los parámetros físicos entre ambas estaciones (salinidad absoluta, temperatura conservativa, densidad potencial anómala, frecuencia de Brunt-Väisälä, concentración de oxígeno y porcentaje de saturación de oxígeno (Tabla 4). A continuación, se describen en detalle.

La salinidad absoluta en ambos sitios (Figura 7 y Figura 8) mostró una distribución de dos capas, con diferencias significativas comparando los primeros 30 metros de la columna de agua ( $p$ -valor < 0,005) (Tabla 4) entre sitios y entre los meses de muestreo. Se observó la presencia de Agua estuarina-salada (AESA: salinidad <31 g/kg y isopicna ( $\sigma_\theta$ ) ~ 15-22,5 kg/m<sup>3</sup>) en la superficie (aproximadamente 10m) y Agua Subantártica Modificada (ASAAM: salinidad 31–33 g/kg y  $\sigma_\theta$  entre ~ 22,5 y 24,5 kg/m<sup>3</sup>) en la capa más profunda (>10m) (Figura 6). La columna de agua (0-30 m) estuvo dominada por la presencia de ASAAM en ambos sitios de muestreo en las 8 campañas con valores promedio de 74,1% en FRb y 66,1% en SR (Figura 6). En la estación FRb (Figura 7a) la capa de agua dulce fue más profunda durante la época estival, alcanzando en promedio los 3,6 m, con valores máximos de salinidad en el mes de noviembre 2018 (30,93 g/kg) y mínimos en diciembre 2018 (22,73 g/kg). En la temporada invernal la capa de agua dulce fue más somera, con una profundidad promedio de 1,92 m con valores máximos (30,84 g/kg) y mínimos (21,10 g/kg) durante el mes noviembre 2019. Sin embargo, durante julio el AESA alcanzó la mayor profundidad (6m) de la época y en octubre sólo se registró en superficie con una salinidad con características de este tipo de agua. En la estación SR (Figura 8 a.) se observaron salinidades características de la masa de agua AESA durante toda la época estival con profundidades promedio de 4,65 m, alcanzando valores máximos (30,87 g/kg) en febrero en profundidades mayores a las observadas en FRb (16 m). Durante la época invernal la salinidad fue en promedio alta y estable (i.e. baja desviación estándar; Tabla 4). En julio y agosto, la columna de agua presentó sólo salinidades superiores a los 31 g/kg, observándose el AESA a partir de septiembre, con una profundidad promedio de 4,55 m.

La temperatura conservativa en ambos sitios mostró aguas más cálidas durante la época estival (FRb: 12,32°C; SR: 13,04°C) y aguas más frías durante el invierno austral (FRb: 10,98°C; SR: 11,23 °C), con diferencias significativas entre ambos sitios (Tabla 4). En la estación FRb existió diferencias significativas entre épocas (Tabla 4), con aguas más cálida registradas durante febrero (16,95 °C) y las más fría en agosto (9,50 °C). Durante la época estival se presentó una estratificación térmica en la columna de agua (Figura

7 b), con presencia de aguas más cálidas en la capa superficial (12.5-16°C) y una capa homogénea más fría en profundidades superiores a 10 m (11-12,5 °C). Se registró un núcleo de temperaturas cálidas en la capa profunda del mes de julio (10,5°C-11,5°C°C) entre los ~23 m y 30 m. Gran parte de la época invernal mostró un comportamiento homogéneo con bajas temperaturas en toda la columna de agua (Figura 7 b). La temperatura conservativa en SR también mostró diferencias entre las épocas (Tabla 4) y osciló entre 10,26°C (julio) y 17,42°C (febrero). Durante la época estival se identificó una capa de agua cálida en los primeros 20 m (10,82°C -17,42°C) y una capa fría en el fondo (10,76°C -12,25°C) Figura 8 b.). En julio también se registró el núcleo de agua más cálida (10,27° C 11,50 ° C) entre los ~23 m y 30 m. Al igual que en FRb se observó un comportamiento homogéneo con bajas temperaturas desde julio hasta octubre en la mayor parte de la columna de agua, con un aumento progresivo a partir de noviembre.

## Diagrama T-S

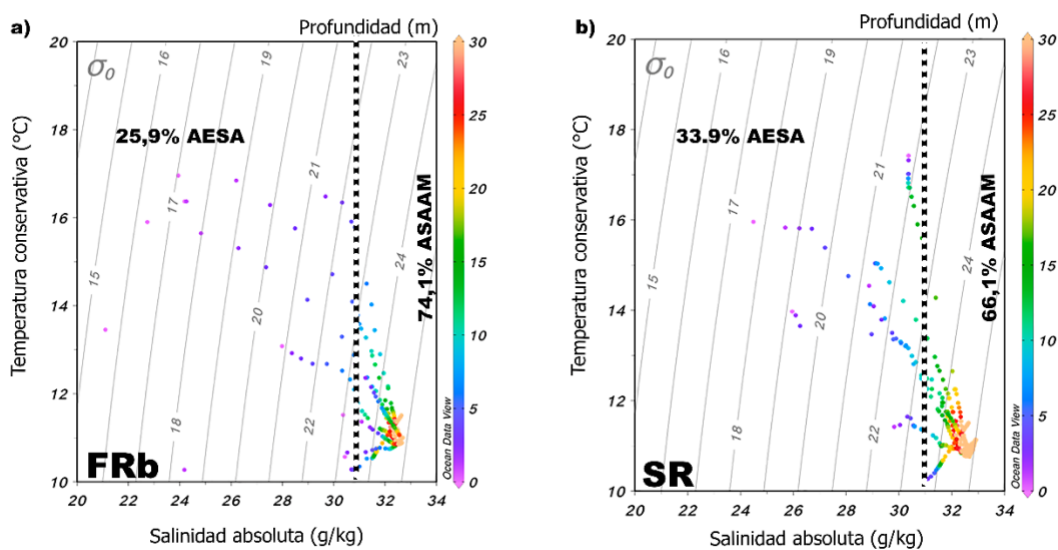


Figura 6 .Diagramas T-S para el FRb y el SR. La barra de colores indica la profundidad.

Tabla 4 . Variables oceanográficas en el Sistema Estuarino Reloncaví SER (media ± desviación estándar [ mínimo; máximo]).

Variable oceanográfica	FRb		SR	
	Estival	Invernal	Estival	Invernal
Salinidad absoluta (g/Kg) *	31,19 ± 1,95 [22,73; 32,61]	31,74 ± 1,52 [21,10; 32,68]	30,92 ± 1,66 [24,48; 32,89]	31,68 ± 0,85 [28,86; 32,91]
Temperatura conservativa (°C) *	12,32 ± 1,579 [10,86; 16,96]	10,98 ± 0,487 [9,50; 13,45]	13,04 ± 1,94 [10,76; 17,42]	11,23 ± 0,82 [10,26; 14,54]

Densidad potencial anómala (Kg/m <sup>3</sup> ) *	23,47 ± 1,75 [16,34; 24,82]	24,13 ± 1,18 [15,55; 24,86]	*	23,12 ± 1,54 [17,65; 24,99]	24,05 ± 0,76 [21,27; 25,01]	*
Frecuencia de Brunt-Väisälä (ciclo/h) *	19,32 ± 18,42 [-0,13; 82,54]	13,97 ± 19,62 [-1,83; 153,97]		16,84 ± 13,68 [-1,56; 62,57]	9,67 ± 8,11 [-1,76; 32,01]	*
O <sub>2</sub> (mg/L) *	8,00 ± 1,32 [5,50; 10,52]	7,86 ± 0,88 [6,00; 11,64]	*	8,43 ± 1,29 [4,20; 10,66]	9,16 ± 2,07 [6,04; 13,13]	*
O <sub>2</sub> (μM) *	250,24 ± 41,29 [172,07; 328,81]	238,50 ± 24,19 [193,87; 363,75]	*	263,65 ± 40,45 [131,46; 333,24]	286,29 ± 64,93 [188,80; 410,45]	*
O <sub>2</sub> (%sat) *	91,08 ± 16,74 [61,55; 125,19]	86,71 ± 8,49 [68,91; 105,40]	*	96,71 ± 15,18 [46,71; 119,76]	91,60 ± 11 [67,59; 116,44]	*
pH *	8,00 ± 0,13 [7,77; 8,27]	7,88 ± 0,10 [7,72; 8,32]	*	8,08 ± 0,16 [7,65; 8,31]	7,90 ± 0,14 [7,72; 8,28]	*
Clorofila (μg/L)	6,64 ± 5,20 [1,92; 20,79]	2,92 ± 2,57 [1,26; 15,33]	*	7,53 ± 8,33 [1,10; 32,91]	2,41 ± 1,11 [0,71; 4,75]	*

(\*) Significativo p valor <0.005, entre sitios (FRb -SR) y entre épocas del año (estival-invernal).

La distribución vertical de la densidad potencial presentó una estructura similar a la salinidad absoluta en ambos sitios (Figura 7 c. y Figura 8 c.), aunque se evidenciaron diferencias entre sitios y épocas (Tabla 4). En FRb la isopicna de 24 kg/m<sup>3</sup> se situó a los 15 m en la época estival, mientras en invierno ascendió hasta los 5 m. En SR esta misma isopicna alcanzó la superficie durante el invierno. La frecuencia de Brunt-Väisälä mostró valores promedio más altos durante la época estival (FRb: 19,32 ciclo/h; SR: 16,84 ciclo/h) y valores promedio más bajos durante la época invernal (FRb: 13,97 ciclo/h; SR: 9,67 ciclo/h) en ambos sitios (Tabla 4). En FRb los valores más altos de Brunt-Väisälä cubrieron los primeros 20 m de profundidad durante todo el año (Figura 7 d), con un máximo de 82,54 ciclo/h durante la temporada estival y 153,97 ciclo/h en la invernal. Los menores valores de Brunt-Väisälä se observaron en las capas más profundas (>20m) de ambas estaciones (estival: -0,13 ciclo/h; invernal: -1,56 ciclo/h). En el SR se observó una capa más estratificada durante la época estival con valores más altos en la capa superficial (62,57 ciclo/h) que en la profunda (-1,56 ciclo/h) (Figura 8 d.). En contraste, los mínimos de Brunt-Väisälä (-1,76 ciclo/h-32,01 ciclo/h) ocurrieron durante gran parte del invierno.

Se observó que la distribución vertical de la frecuencia de Brunt-Vaisala y la variabilidad del parámetro de estratificación ( $n_s$ ) durante los ocho meses de muestreo se comportan de manera similar

(Figura 9). La columna de agua para ambos sitios de muestreo estuvo parcialmente mezclada al inicio de la época estival. Sin embargo, finalizando diciembre se comenzó a observar una tendencia a la mezcla. En FRb la columna de agua estuvo mezclada desde abril hasta junio. Mientras, que en SR desde diciembre 2018 hasta septiembre 2019 dominó la mezcla de la columna de agua.

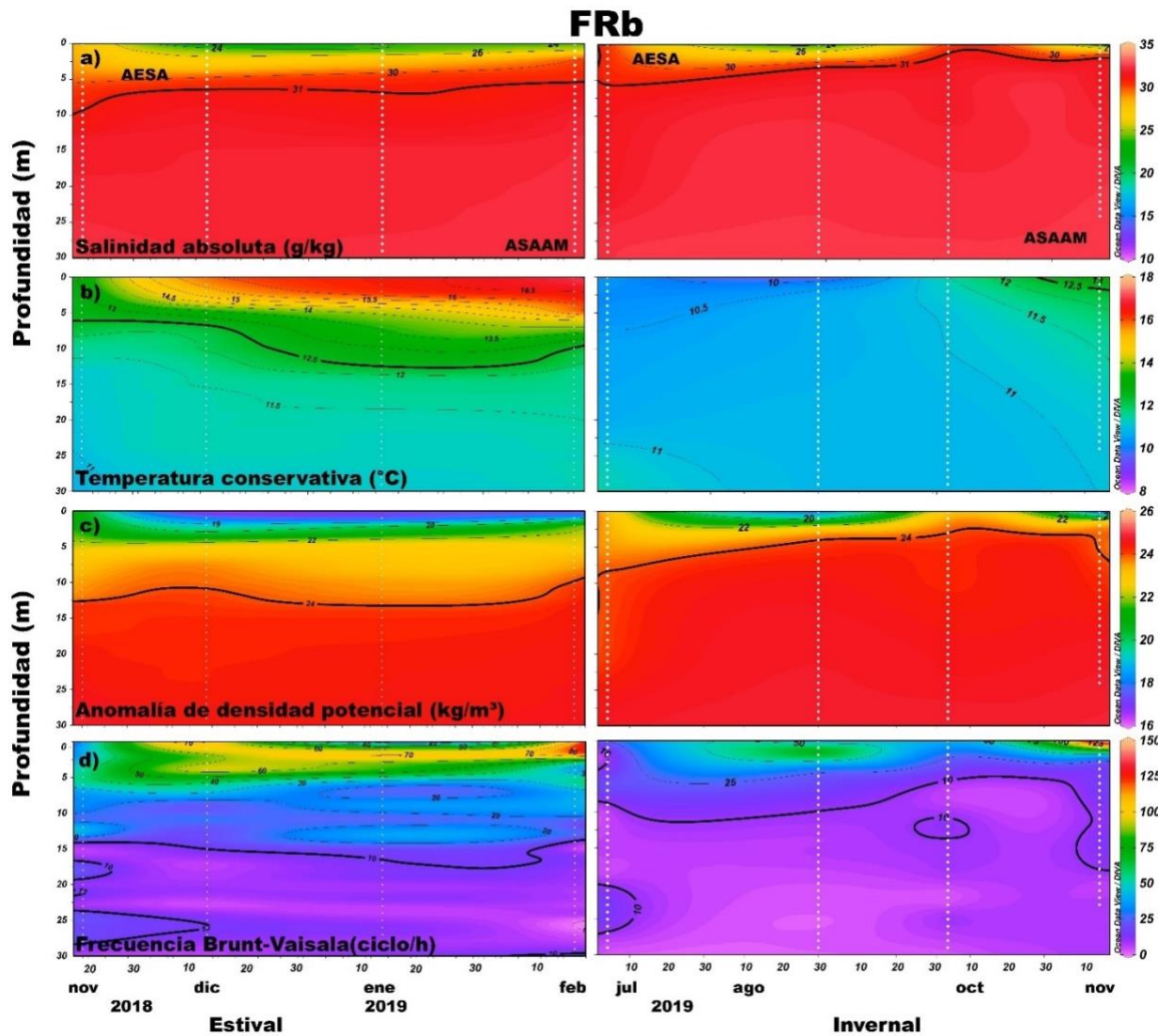


Figura 7. Parámetros oceanográficos de la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb) a lo largo de la serie de tiempo (época estival e invernal). (a) Salinidad absoluta SA (g/kg) (b) Temperatura conservativa  $\Theta$  (°C) (c) densidad potencial anómala  $\sigma$  (kg/m<sup>3</sup>) (d) frecuencia de Brunt-Väisälä ( $N^2$ ) (ciclo/h).

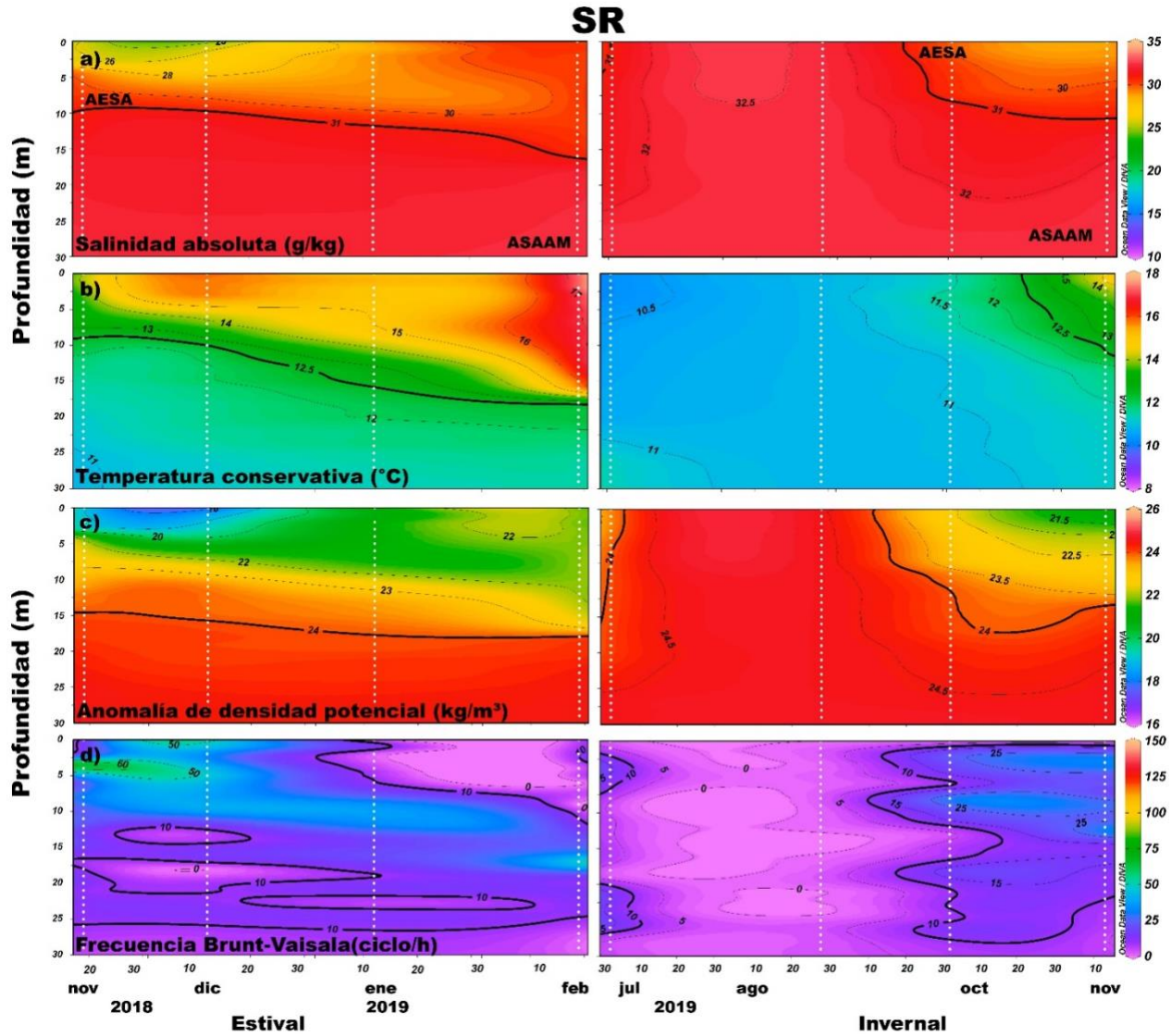


Figura 8. Parámetros oceanográficos de la estación del Seno de Reloncaví (SR) a lo largo de la serie de tiempo (época estival e invernal). (a) Salinidad absoluta SA (g/kg) (b) Temperatura conservativa  $\Theta$  (°C) (c) densidad potencial anómala  $\sigma$  (kg/m<sup>3</sup>) (d) frecuencia de Brunt-Väisälä (N<sub>2</sub>) (ciclo/h).

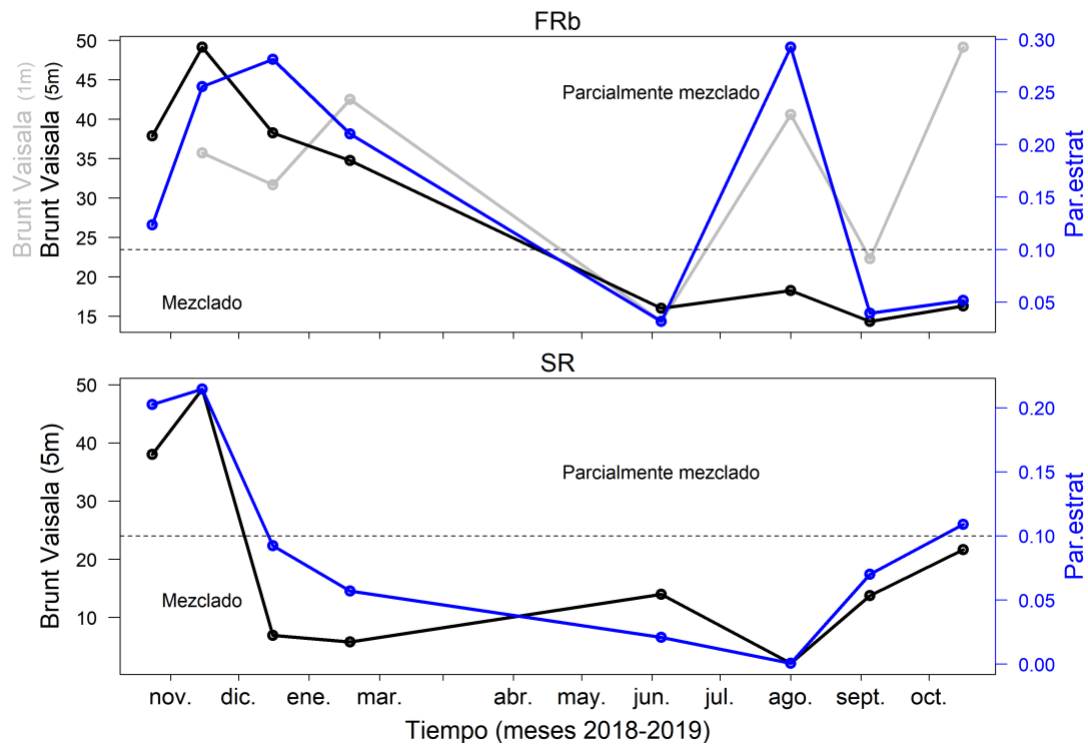


Figura 9. Distribución vertical de la frecuencia de Brunt-Väisälä (N2) (línea negra) y el parámetro de estratificación (ns) (línea azul) en FRb (a) y SR (b).

Los valores de oxígeno disuelto (OD) y el porcentaje de saturación de oxígeno (SOD) permitieron identificar la existencia de aguas muy oxigenadas en ambos sitios de muestreo (OD =9–11 mg/L y SOD=100–120 %) (Tabla 4). Los perfiles verticales de OD y SOD de FRb indicaron que fue el sitio con menores valores promedio (época estival: OD=8,00 ± 1,32 mg/L, 250,24 ± 41,29 µM, SOD= 91,08 ± 16,74 %; invernal: OD=7,86± 0,88 mg/L, 238,50 ± 24,19 µM, SOD=86,71 ± 8,49 %) (Tabla 4). La capa superficial (~20m) mostró a lo largo de las ocho campañas los valores máximos, sobre todo en febrero. Durante el inicio de la época invernal se alcanzaron altos valores de OD y SOD en toda la columna de agua (Figura 10 a-b). En SR se observaron los máximos de OD y SOD a mayor profundidad (~15 m) durante febrero (OD=10,66 mg/L, SOD= 119,76 %) y julio (OD= 13,13 mg/L; SOD= 116,44%) (Tabla 4). Durante diciembre y agosto se observaron dos pulsos con una ligera disminución en las concentraciones de estos dos parámetros en toda la columna de agua, después de visualizar periodos con saturaciones elevadas (Figura 11 a-b).

Los perfiles de pH mostraron para ambas estaciones una tendencia similar a la de OD y SOD con valores promedio más altos durante la época estival (FRb=8,00± 0,13; SR: 8,08± 0,16) y más bajos en la invernal (FRb=7,88 ± 0,10; SR=7,90 ± 0,14) (Tabla 4). Sin embargo, en julio su comportamiento fue variable (Figura 10 y Figura 11 c).

Como indicador relativo de la concentración de fitoplancton, se analizó la variación temporal de la concentración de Cl-a (Figura 10 d. y Figura 11 d). Se identificó una capa sub-superficial (~5-20 m) de valores máximos en ambas estaciones en enero y febrero. Además, no se observaron diferencias significativas entre estaciones, pero si entre las épocas por sitio (Tabla 4). En FRb los valores medio de Cl-a fueron de 6,64 ± 5,20 µg /L en la época estival y 2,92 ± 2,57 µg /L en la invernal (Tabla 4), con un máximo durante la campaña de febrero (20,79 µg /L) a los 10 m (Figura 10 d). Un pulso de menor intensidad fue registrado en la época invernal durante noviembre, observándose concentraciones máximas de 15,33 µg/L a los 0 m. El periodo donde se observaron menores concentraciones de Cl-a fue desde julio hasta octubre a lo largo de la columna de agua. En SR fue similar el comportamiento de la Cl-a, con valores promedio de Cl-a de 7,53 ± 8,33 µg /L en la época estival y 2,41 ± 1,11 µg /L en la invernal. El máximo en forma de parche también se identificó entre enero y febrero, con la mayor concentración finalizando la época (32,91 µg /L) a 20 m de profundidad (Figura 11 d). Entre ambos sitios, el SR presentó las menores concentraciones promedio de Cl-a en invierno, con valores desde los 0,71 µg /L hasta los 4,75 µg /L.

### FRb

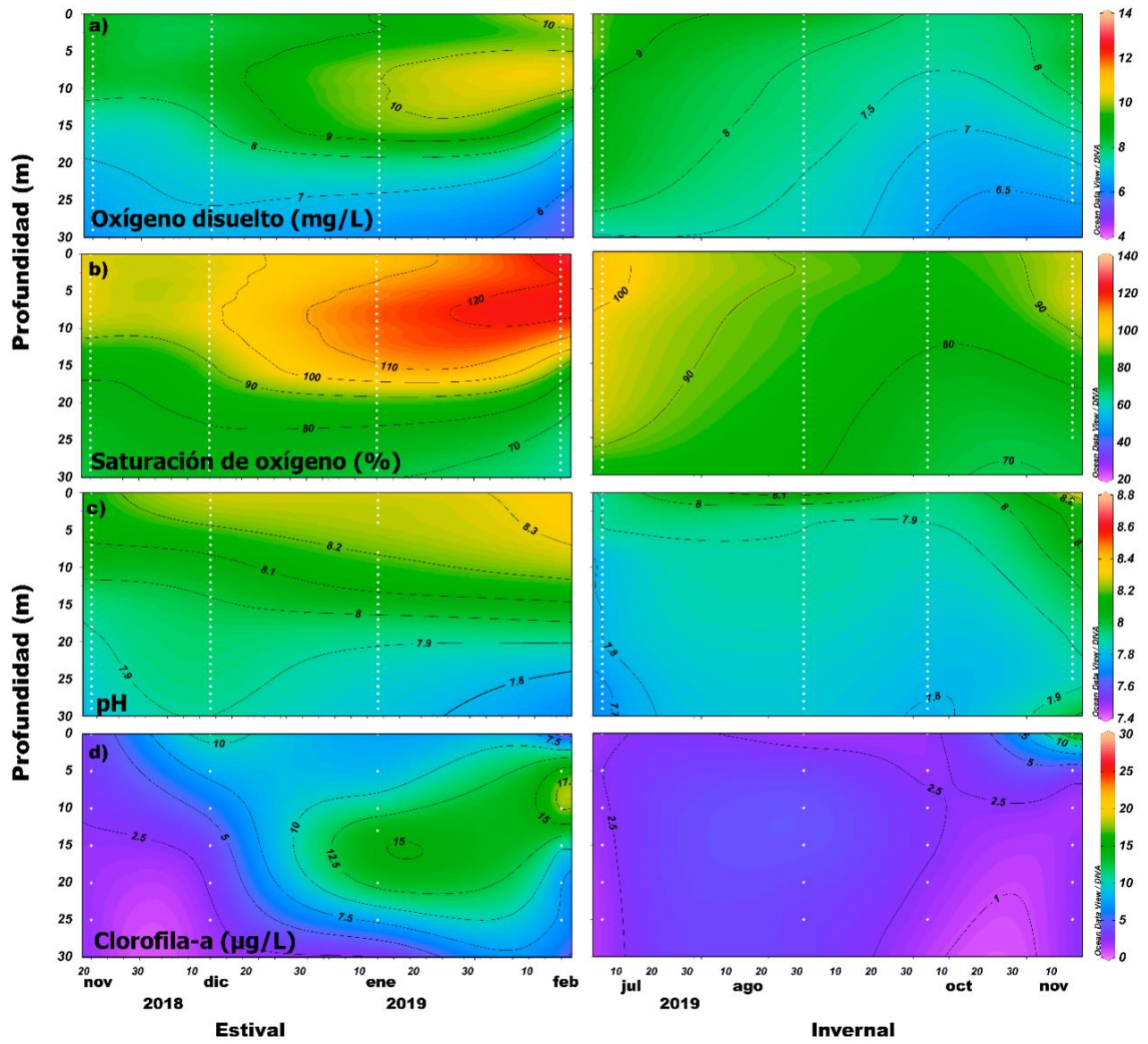


Figura 10. Distribución vertical del (a) oxígeno disuelto, (b) saturación de oxígeno, (c) pH y (d) clorofila *a* para la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb).

## SR

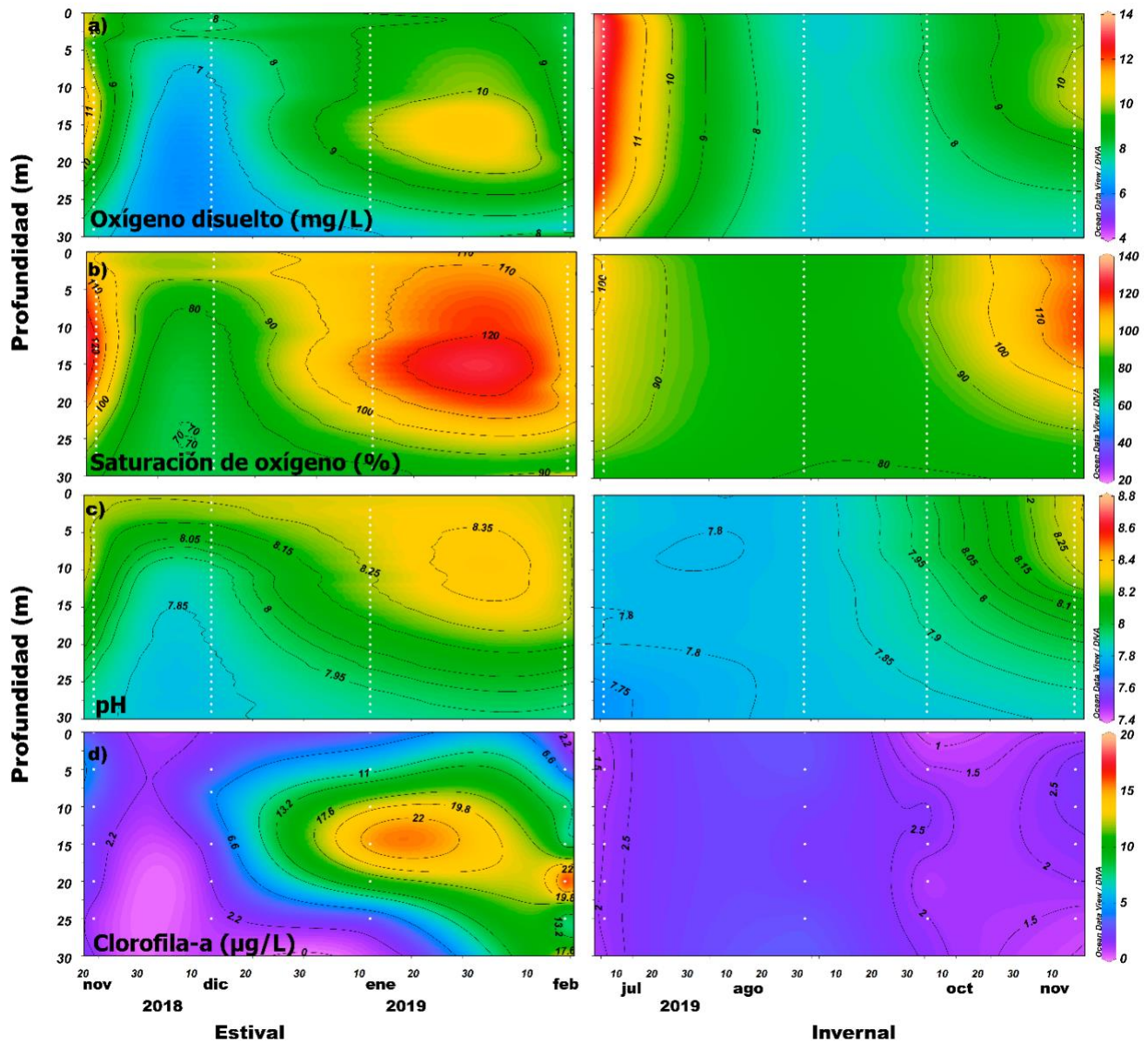


Figura 11. Distribución vertical del (a) oxígeno disuelto, (b) saturación de oxígeno, (c) pH y (d) clorofila *a* para la estación del Seno de Reloncaví (SR).

### Modelo de Circulación SER

Se realizó la configuración en la circulación promedio para las cuatro estaciones del año desde 0 a 10 m (capa superficial) (Figura 12 a.) y 10-25 m (capa subsuperficial) (Figura 12 b.) para el Sistema estuarino Reloncaví. No se encontraron diferencias para los promedios de circulación de las dos capas de agua analizadas. Durante los veranos, cuando predominan vientos provenientes del sur las corrientes promedio se dirigen desde la boca del fiordo Reloncaví en dirección oeste, conectando con la Isla Huar. En el invierno

este patrón de circulación promedio cambia y la corriente principal que sale del Fiordo Reloncaví se dirige hacia el sur. En ambos casos, para condiciones promedio de invierno y verano, en el sector de Punta Redonda, Isla Huar las corrientes se dirigen hacia el este.

Se evidenció un giro anti-horario constante en el centro del Seno Reloncaví, que en la capa superficial tiene mayor conexión con la boca del Fiordo en primavera-verano (Figura 13 a.). En otoño-invierno la conexión es débil o desaparece. En la capa subsuperficial el patrón de circulación es más homogéneo durante el año con una débil conexión de la boca del fiordo y el seno.

Hubo una variación estacional en la edad del agua del SER. Se observó una edad entre los 330 y 350 días en invierno, primavera y otoño (Figura 13 a y b) y una relativamente más alta en verano (>350días) (Figura 13 a y b). La edad de agua más baja se observó en invierno en la capa superficial en la boca del Fiordo Reloncaví con dirección al sur, lo que contrasta con la edad de agua más alta (~360 días) durante el verano, observada en la sección noroeste para la capa superficial (Figura 13 a) y que se intensifica hacia la capa subsuperficial del Seno Reloncaví (Figura 13 b), generando un frente de retención.

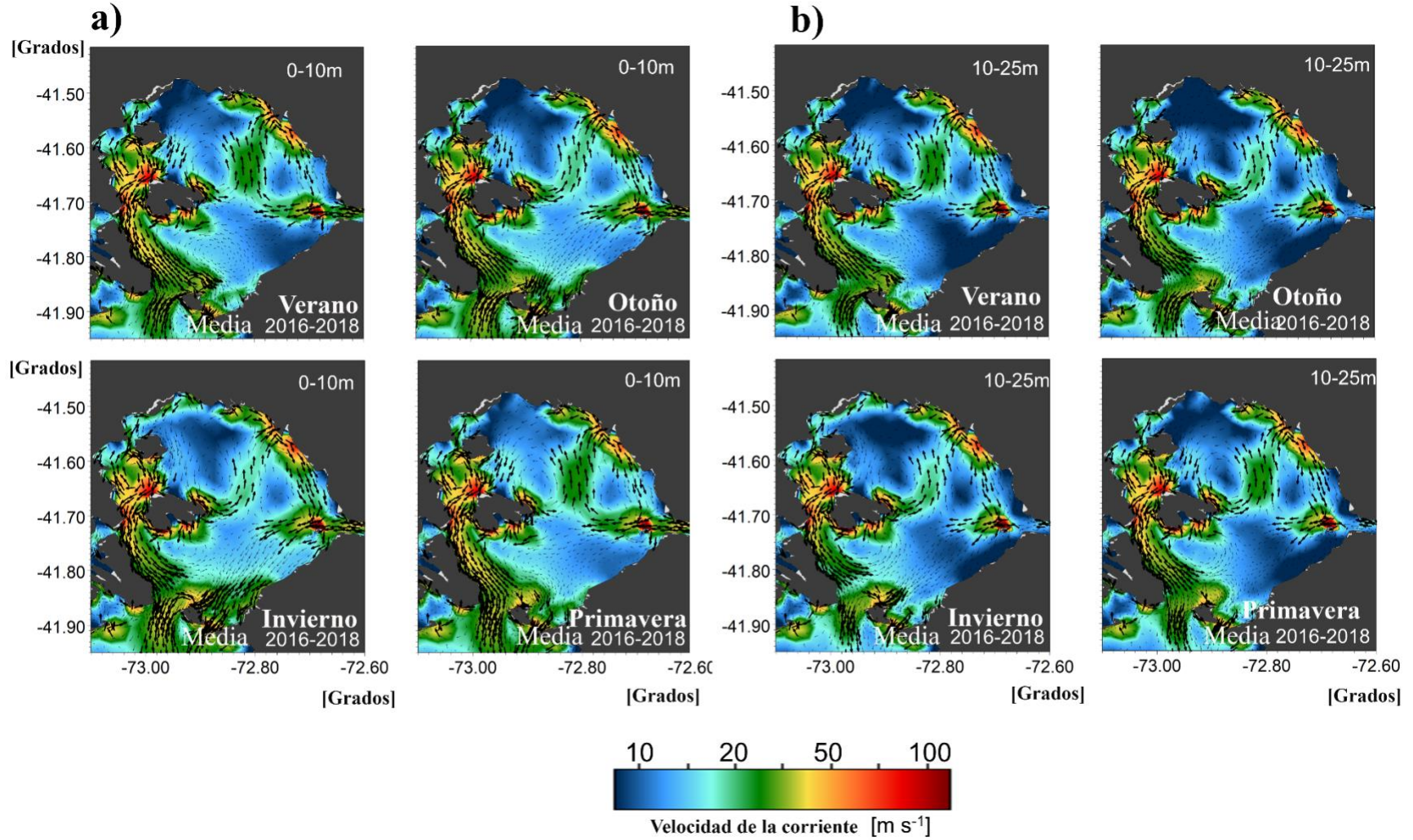


Figura 12. Promedio estacional de la velocidad de la corriente para el agua superficial (0-10m) (a) y el agua profunda (10-25 m) (b) del Sistema Estuarino Reloncaví.

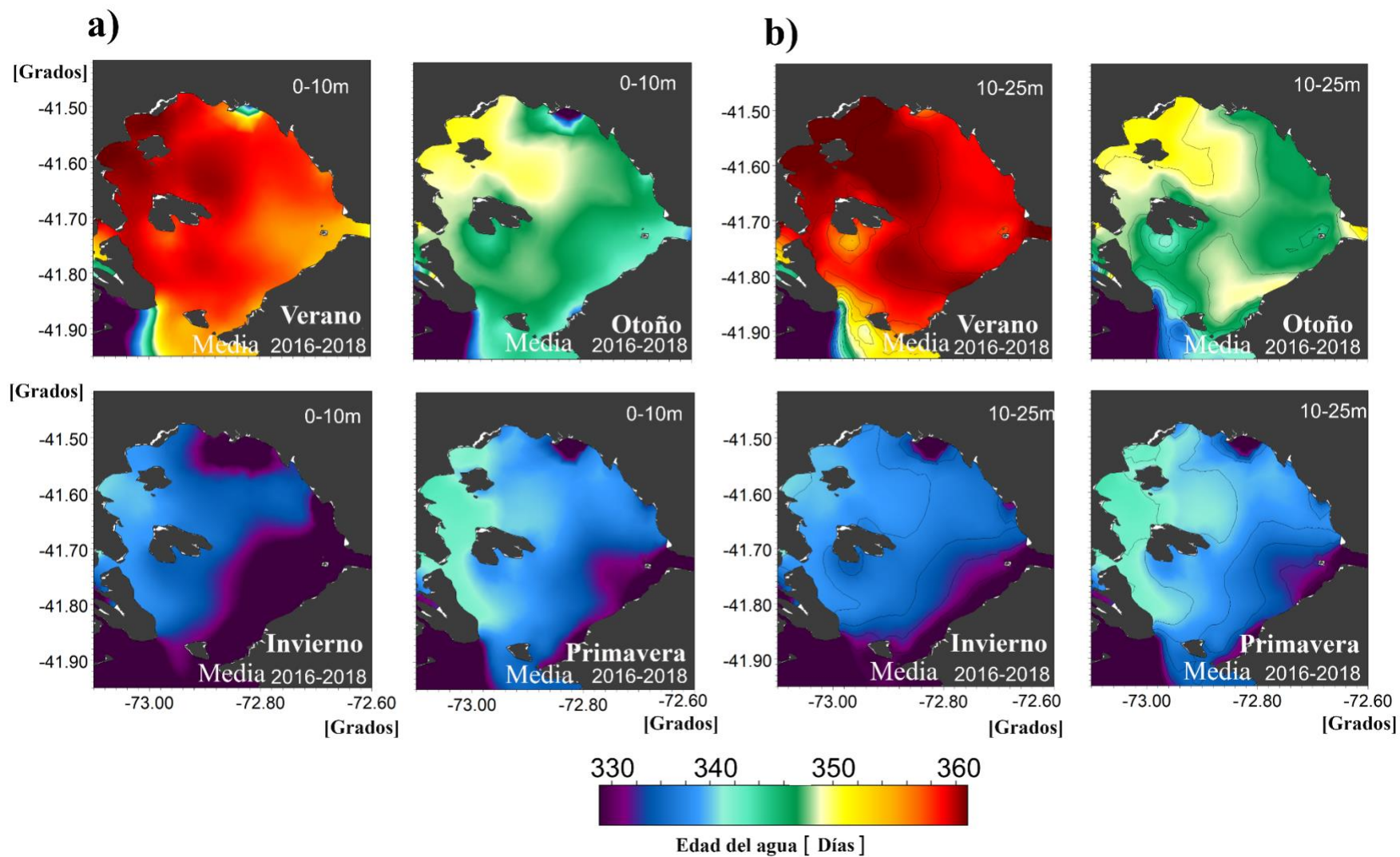


Figura 13. Promedio estacional de la edad del agua horizontal para el agua superficial (0-10m) (a) y el agua profunda (10-25 m) (b) del Sistema Estuarino Reloncaví.

## Variabilidad espacio-temporal de nutrientes inorgánicos

Se realizaron secciones temporales de alta resolución durante las ocho campañas de muestreo para observar la variabilidad del aporte de nutrientes inorgánicos nitrogenados (nitratos y nitritos), fosfatos y silicatos para las estaciones FRb (Figura 14) y SR (Figura 15). La capa superficial (~5 m) en ambos sitios a lo largo del año mostró una concentración relativamente baja en nitrito (FRb: 0,25  $\mu\text{mol/L}$ ; SR:0,18  $\mu\text{mol/L}$ ), nitrato (FRb: 3,34  $\mu\text{mol/L}$ ; SR:3,41  $\mu\text{mol/L}$ ) y fosfato (FRb: 0,95  $\mu\text{mol/L}$ ; SR: 0,85  $\mu\text{mol/L}$ ). Sin embargo, solamente el nitrito estuvo agotado en su totalidad en SR a 5m. Por otro lado, se observó un comportamiento contrario con el silicato, donde las mayores concentraciones de este nutriente fueron observadas en los primeros 5 m de la columna de agua de las dos estaciones (FRb: 23,54  $\mu\text{mol/L}$ ; SR:12,44  $\mu\text{mol/L}$ ).

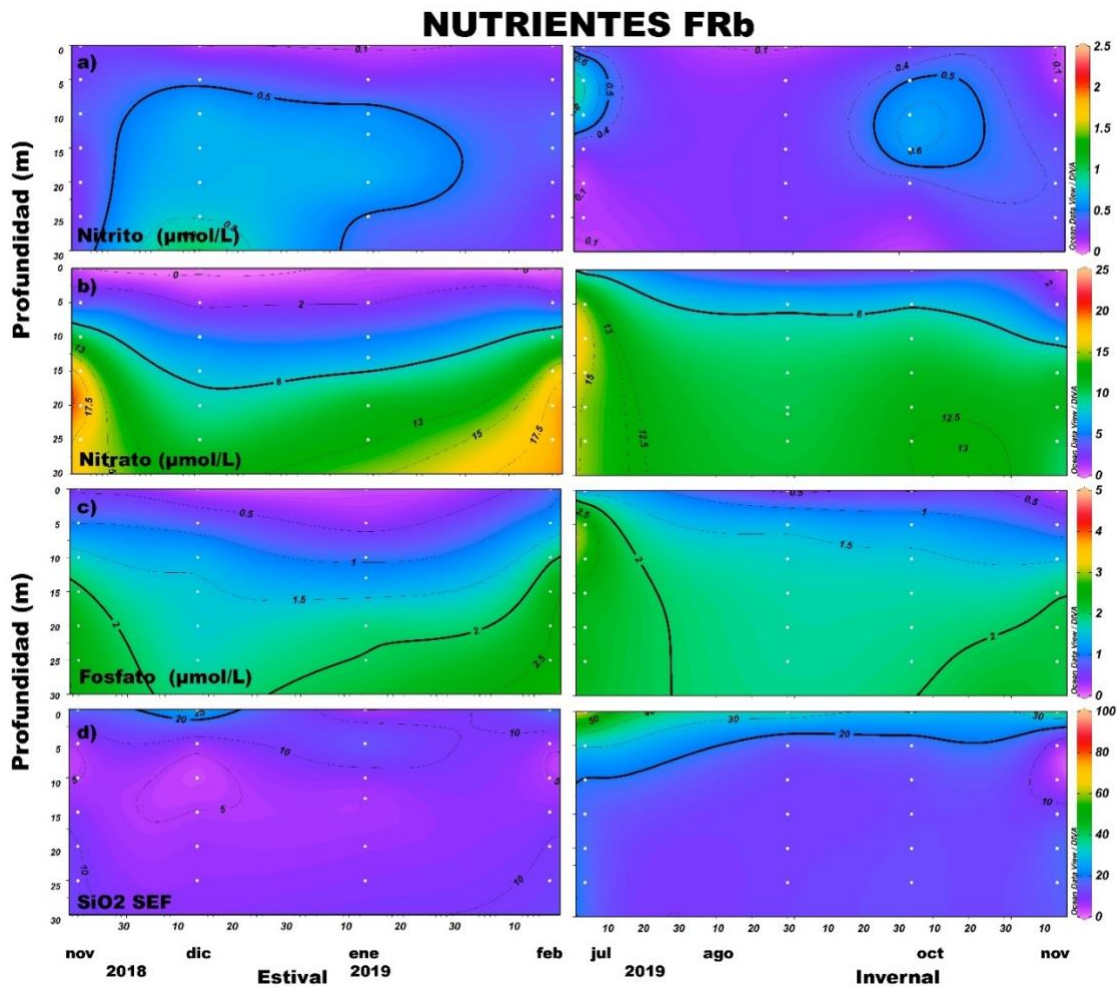


Figura 14 . Distribución vertical de los nutrientes inorgánicos para la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb).

## NUTRIENTES SR

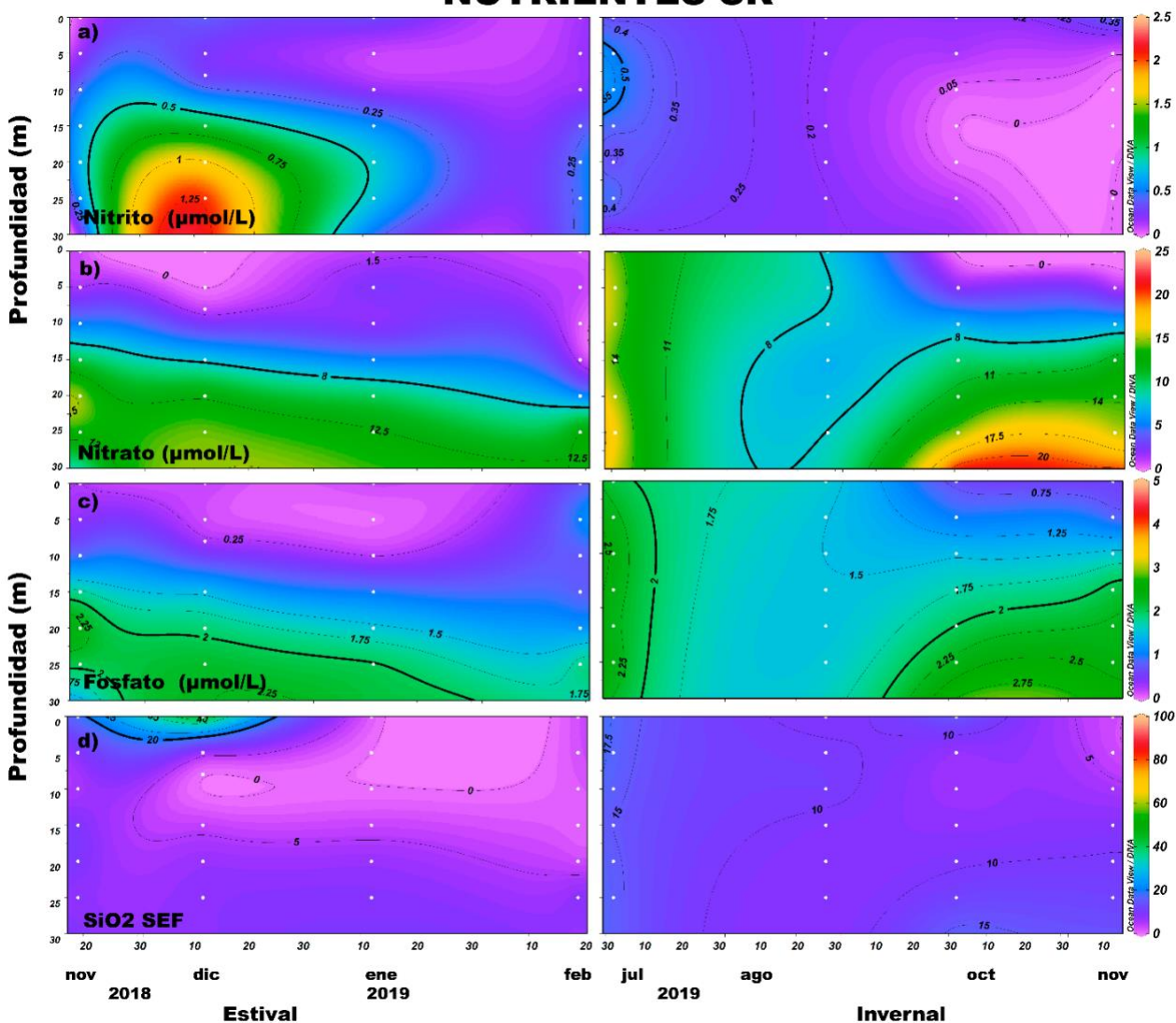


Figura 15 .Distribución vertical de los nutrientes inorgánicos para la estación del Seno de Reloncaví (SR)

En la estación FRb se observó una señal continua de nitrito sub-superficial durante casi toda la época estival con concentraciones entre 0,5- 1,05  $\mu\text{mol/L}$ , y con máximos a los 30 m en diciembre (1,05  $\mu\text{mol/L}$ ) (Tabla 5). En julio y octubre se evidenciaron dos pulsos con un aumento de la concentración de nitrito en la época invernal (Figura 14). Las concentraciones de nitratos y fosfatos en FRb, al igual que los nitritos durante la época estival estuvieron asociados a mayor profundidad, con valores máximos durante noviembre del 2018 y febrero y julio del 2019. La concentración de silicatos presentó valores promedio de 9,44  $\mu\text{mol/L}$  en la época estival y 18,41  $\mu\text{mol/L}$  en la invernal, con alto desvío estándar con respecto a los valores medios en ambas temporadas (estival: 6,72; invernal: 13,09  $\mu\text{mol/L}$ ). Los valores máximos estuvieron asociados a menor profundidad, especialmente durante el invierno austral (66,71  $\mu\text{mol/L}$ ).

En la estación SR el comportamiento de los cuatro nutrientes siguió el mismo patrón que FRb, con excepción de la época estival, donde la concentración de nitrito superó la concentración de la otra estación (1,27  $\mu\text{mol/L}$ ) (Figura 15). A finales de la época invernal se observó una disminución a partir del mes de octubre, en la capa sub-superficial. La máxima concentración de nitrato (21,72  $\mu\text{mol/L}$ ) en el SER se registró en el SR a los 30 m entre octubre y noviembre. La mínima concentración de fosfato sucedió prolongadamente durante el verano. El silicato, a pesar de presentar las mayores concentraciones en la superficie, fue durante el verano que se alcanzó la concentración máxima de 49,37  $\mu\text{mol/L}$ .

Tabla 5 . Distribución de nutrientes en el Sistema Estuarino Reloncaví SER (media  $\pm$  desviación estándar [mínimo; máximo]).

Nutriente	FRb		SR		
	Estival	Invernal	Estival	Invernal	
Nitrito ( $\mu\text{M}$ ) *	0,41 $\pm$ 0,25 [0,07; 1,05]	0,30 $\pm$ 0,22 [0,05; 0,89]	0,34 $\pm$ 0,33 [0,02; 1,27]	0,18 $\pm$ 0,18 [0; 0,63]	*
Nitrato ( $\mu\text{M}$ )	9,52 $\pm$ 6,75 [0,15; 20,47]	10,00 $\pm$ 4,26 [1,32; 16,22]	6,59 $\pm$ 5,79 [0,01; 15,89]	10,51 $\pm$ 5,87 [0,01; 21,72]	*
Fosfato ( $\mu\text{M}$ )	1,58 $\pm$ 0,78 [0,10; 2,75]	1,71 $\pm$ 0,69 [0,19; 3,20]	1,16 $\pm$ 0,79 [0,04; 2,42]	1,87 $\pm$ 0,65 [0,66; 3,08]	*
SiO <sub>2</sub> SEF ( $\mu\text{M}$ ) *	9,44 $\pm$ 6,72 [1,22; 31,52]	18,41 $\pm$ 13,09 [0,19; 66,71]	7,21 $\pm$ 9,36 [0,02; 49,37]	11,04 $\pm$ 4,40 [2,52; 17,32]	*
N/P	5,00 $\pm$ 2,27 [0,28; 8,67]	5,76 $\pm$ 0,89 [2,95; 7,00]	7,57 $\pm$ 15,36 [0,06; 84,26]	5 $\pm$ 2,17 [0,02; 7,78]	
N/Si	1,13 $\pm$ 0,62 [0; 2,23]	1,03 $\pm$ 1,74 [0,03; 9,77]	2,52 $\pm$ 5,52 [0; 28,35]	0,90 $\pm$ 0,40 [0; 1,45]	*
Si/N	11,46 $\pm$ 40,09 [0,45; 210,11]	4,13 $\pm$ 8,04 [0,10; 31,31]	2,00 $\pm$ 3,58 [0,03; 17,23]	12,53 $\pm$ 44,35 [0,68; 226,61]	*

Las diferencias estadísticamente significativas en la media entre sitios (\*) se muestran en la columna Nutriente. Las diferencias estadísticamente significativas en la media entre estaciones por cada sitio (\*) se muestran al final del sitio correspondiente.

#### *Relaciones estequiométricas entre nutrientes*

Los tres nutrientes analizados (N, P, Si) se correlacionaron positivamente entre sí en todo el SER (FRb n=48 y SR n=53 y r entre 0,66 y 0,93; p<0.01) (Tabla 6). Esto permite ver que, a pesar de las diferencias debidas a su origen y consumo, se encuentran acoplados a procesos conjuntos. Los valores de la relación

N/P oscilaron entre valores cercanos a 0 (0,023) en la temporada invernal en el SR. Los valores máximos fueron registrados en la época estival en FRb con valores aproximados a 8,67. La correlación fue positiva y significativa (n=101, r=0,939, p<0.001) para todos los valores.

Tabla 6 . Resultados generales de la correlación (Pearson, n=6, p <0,01) entre la concentración de nitrato, fosfato y silicato en aguas del SER. Relación de regresión entre nitratos, fosfatos y silicatos para todos los datos (n=101).

	<b>FRb</b> <b>n=48</b>	<b>SR</b> <b>n=53</b>	<b>Y</b>	<b>a</b>	<b>X</b>	<b>b</b>	<b>r</b>
$r_{N/P}$	0.918	0.935	$\text{NO}_3^-$	7.136	$\text{PO}_4^{3-}$	-2.141	0.939
$r_{N/Si}$	0.663	0.843	$\text{SiO}_2$	0.741	$\text{PO}_4^{3-}$	2.019	0.764
$r_{Si/P}$	0.775	0.856	$\text{SiO}_2$	6.211	$\text{NO}_3^-$	-1.182	0.813

La relación ideal propuesta para N/P es de 16:1. Aunque las proporciones entre los datos de nitrato y fosfato fueron muy variables, en general el alejamiento de los valores establecidos por Redfield (Figura 16 a.) se deben a un déficit en nitratos producto del consumo para la producción primaria (Figura 16 c.). En el SR y FRb, la relación Si/P correlacionó positivamente (n=101, r=0,764, p<0.001) para todos los valores, siguiendo un buen ajuste en la regresión lineal (Tabla 6). Aunque de igual forma, la relación N/P también estuvo por debajo de la relación de Redfield y se mantuvo entre valores de 1 a 10 (Figura 16 d). Se pudo observar un aumento relativo de esta relación hacia el periodo invernal y esta tendencia se mantuvo en ambos sitios muestreados. La relación Si/N fue muy similar a la relación de Redfield (Figura 16 c.), sin embargo, se puede observar que se hizo mínima principalmente en el SR y los valores máximos fueron encontrados en el SR (Figura 16 c.), donde la concentración de silicatos fue mayor que en el Seno. Esta relación fue menos significativa en comparación con las otras relaciones (n=101, r=0,813, p<0.001). A partir de esto, el valor observado fue en general inferior a 5. Una excepción a estas relaciones se observa cuando existen pulsos de entradas de algunos nutrientes, para el caso del SER, los pulsos registrados de silicio provenientes de escorrentías cambian abruptamente las relaciones entre nutrientes, como se observa en el recuadro de la Figura 16 d.

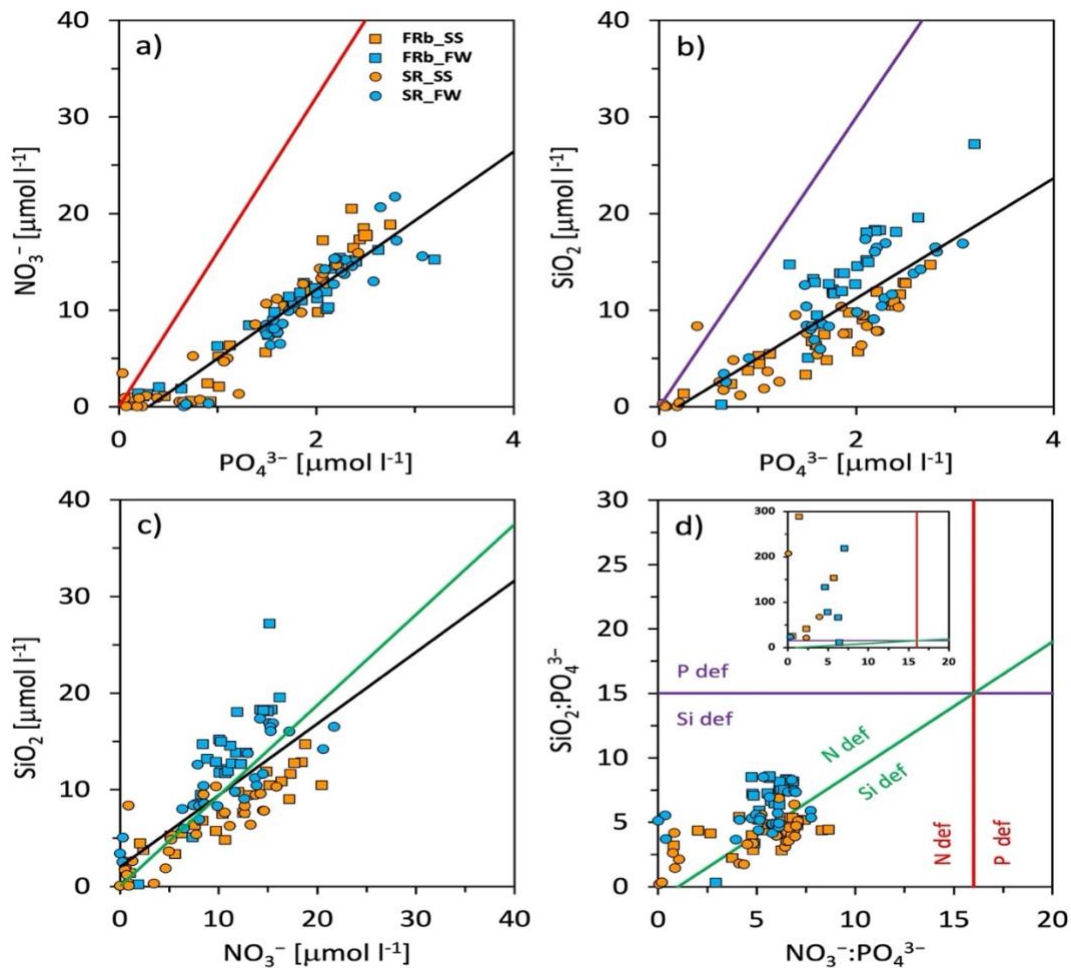


Figura 16 .Resultados de la relación entre nitrato y fosfato (a), silicatos vs fosfatos (b) y silicatos vs nitratos (c) para ambos sitios muestreados (FRb en cuadros y SR en círculos, donde el color naranja representa la época estival y azul la invernal). La relación entre los tres nutrientes se observa en el panel d). La Línea roja, morado y verde muestran la relación teórica planteada por Redfield (1934) para cada nutriente 106C:16N:1P:15Si.

### Dinámica espacio-temporal de la materia orgánica en SER.

La distribución vertical y espacio temporal de las variables biogeoquímicas mostró los valores más elevados del material particulado en suspensión (MPS) durante el periodo invernal (Tabla 7, Figura 17 y Figura 19). Se observó similitud en ambas estaciones en el comportamiento de las concentraciones de  $C_{org}$  y NPT, con valores relativamente altos en la capa sub-superficial entre los 5 y los 20 m (Figura 17 y Figura 19). Al igual que el MPS durante el periodo invernal, la proporción del carbono orgánico en función del nitrógeno particulado total (C/N) alcanzó los valores más elevados (Figura 18).

La concentración del material particulado en suspensión en FRb fue significativamente diferente entre épocas, con valores más altos ( $3,04 \pm 0,84$  mg/L) en la época estival que en la invernal ( $3,69 \pm 0,90$  mg/L) (Tabla 7). Durante los primeros meses muestreados a nivel sub-superficial se mantiene una señal constante con valores  $> 2,5$  mg/L entre los 5 y 25 m. Se observaron dos núcleos durante los tres últimos meses del periodo estival, el primero en la capa superficial con concentraciones  $< 2,5$  mg/L y el segundo en la capa profunda con valores entre 3,5 y 5,27 mg/L (Figura 17 a).

La concentración de  $C_{org}$  en FRb fue levemente mayor durante la época estival, con valores promedio de  $13,29 \pm 4,59$   $\mu\text{mol/L}$ , a pesar de no encontrarse diferencias significativas entre ambos periodos (Tabla 7). Se evidencia una capa sub-superficial entre los 5 y los 20m de profundidad con valores  $> 15$   $\mu\text{mol/L}$  en ambas épocas (Figura 17 b). Los valores mínimos y máximos fueron identificados en el mes de enero a los 30m y 10m respectivamente, con concentraciones de 5,57  $\mu\text{mol/L}$  y 22,17  $\mu\text{mol/L}$  (Tabla 7). Las concentraciones más bajas para el  $C_{org}$  se observan durante la época estival en la superficie y en la capa más profunda, sin embargo, durante la época invernal sólo se pueden observar en la parte más profunda (Figura 17 b). El NPT en general, siguió la misma tendencia que el  $C_{org}$ , con valores en promedio de  $1,96 \pm 0,86$   $\mu\text{mol/L}$  durante primavera-verano y de  $1,60 \pm 0,49$   $\mu\text{mol/L}$  durante otoño-invierno. Las concentraciones mínimas también se observaron a los 30 m del mes de enero (0,69  $\mu\text{mol/L}$ ). Mientras, que las máximas se encontraron sub-superficialmente durante febrero (3,79  $\mu\text{mol/L}$ ) (Tabla 7). Se observó un núcleo definido con concentraciones superiores a 2  $\mu\text{mol/L}$  a lo largo de la época estival. En la época invernal este núcleo sólo estuvo presente a partir de agosto en una capa más superficial (Figura 17 c).

## MATERIA ORGÁNICA FRb

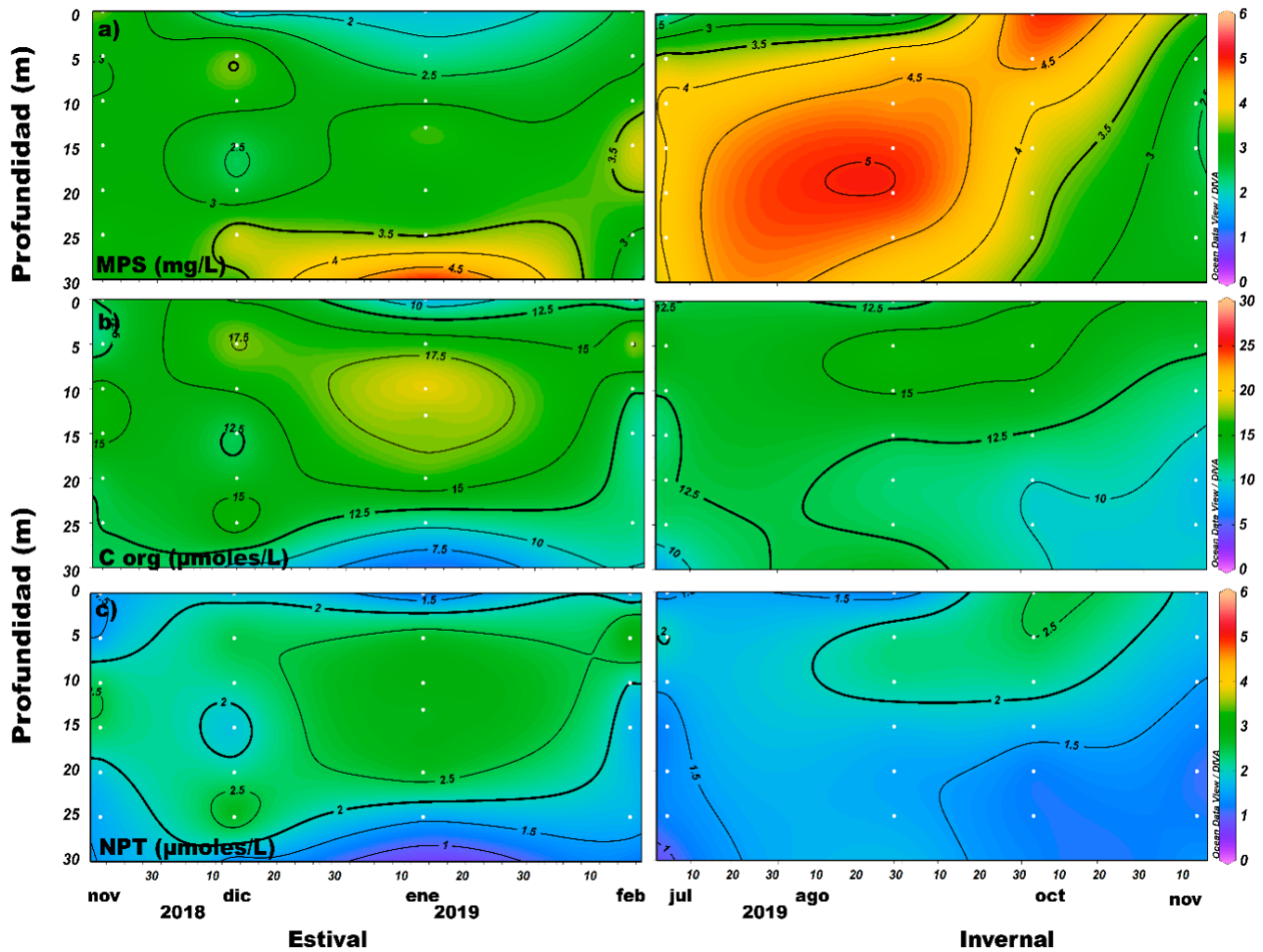


Figura 17 .Distribución vertical de la materia orgánica para la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb).

Tanto la razón de isótopos estables de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y de nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) en FRb para ambos periodos presentaron diferencias significativas (Tabla 7), encontrándose valores más bajos durante el periodo invernal ( $\delta^{13}\text{C}$ : -26,38;  $\delta^{15}\text{N}$ :6,46). La razón isotópica del carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) del material particulado en la columna de agua de FRb tuvo valores entre -24‰ a -28‰ en superficie y fondo a lo largo de la época estival. Mientras, que en la época invernal se observaron valores más bajos alcanzando valores de -33‰ en toda la columna de agua desde julio hasta octubre con valores mínimos de -32,9 ‰. Los valores más altos se observaron de manera constante en la capa sub-superficial durante la época estival, con máximos de -20,87‰ a los 5 m en febrero. Durante la época invernal, los valores menos negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  sólo se observaron a comienzos de noviembre en la capa superficial de la columna de agua, con un máximo de -21,17‰ a 5m (Figura 18 a). En cuanto a la razón de isótopos estables de nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) se observaron

valores promedio de  $8,76 \pm 1,50 \text{ ‰}$  durante la época estival y  $6,46 \pm 2,17 \text{ ‰}$  en la inveral (Tabla 7). Los valores más altos de  $\delta^{15}\text{N}$  se observaron a lo largo de la columna de agua durante enero, febrero, octubre y noviembre 2019 (Figura 18 b). La relación molar entre el carbono y nitrógeno también presentó diferencias significativas para ambos periodos (Tabla 7). Los valores sobre 7 fueron registrados en superficie y fondo en la época estival, pero en la época inveral, se observaron valores en promedio mayores, llegando a razones máximas de 9,53 a comienzos del invierno austral (Figura 18 c.).

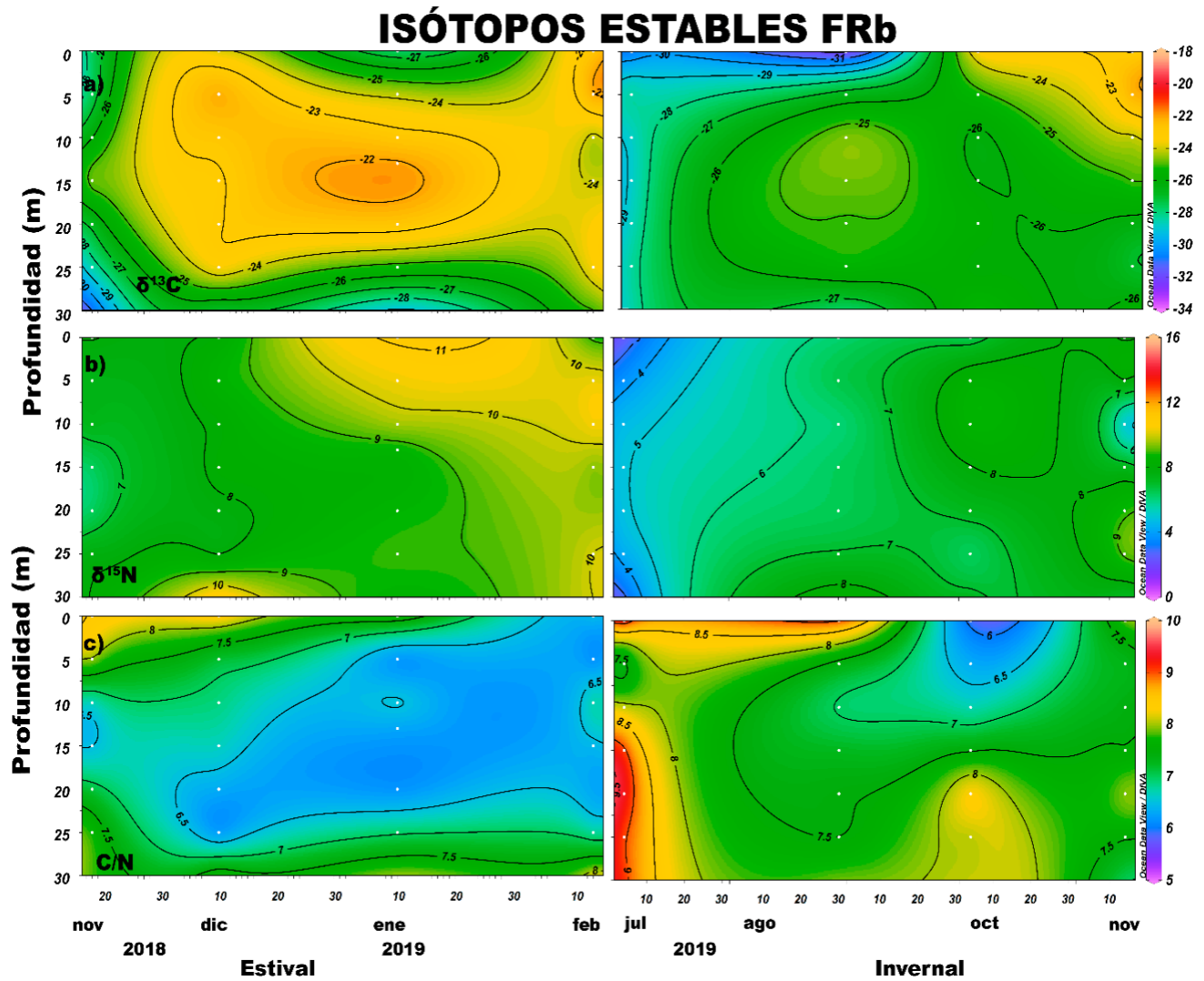


Figura 18. Distribución vertical de la razón de isótopos estables a)  $\delta^{13}\text{C}$ , b)  $\delta^{15}\text{N}$  y c) la relación de proporción de  $\text{C}_{\text{org}}$  en función del NPT (C/N) de material particulado en suspensión en la estación de la Boca del Fiordo de Reloncaví (FRb).

Al igual que en la estación FRb, la concentración del material particulado en suspensión (MPS) en SR también presentó diferencias significativas entre épocas del año, con valores promedio de  $2,74 \pm 0,66$  mg/L en la época estival y  $3,38 \pm 0,48$  mg/L en la invernal (Tabla 7). Las mayores concentraciones de MPS en la época estival para el SR se observaron principalmente en núcleos a los 10 m en diciembre y otro definido a los 30 m en febrero, con concentraciones  $>3,5$  mg/L. En gran parte de la columna de agua se observaron concentraciones entre 1 y 2,5 mg/L, con valores  $>2,5$  en diciembre y enero. En el periodo invernal se observó una capa relativamente homogénea en la columna de agua durante julio y octubre con concentraciones  $>3,5$  mg/L (Figura 19 a.).

La concentración de carbono orgánico particulado en SR también fue mayor durante la época estival en comparación con la invernal, con valores promedio de  $13,86 \pm 5,81$   $\mu\text{mol/L}$ . Los valores máximos fueron observados a finales del periodo invernal (ya en un ciclo del año posterior estival), a los 5 m durante noviembre ( $28,45$   $\mu\text{mol/L}$ ) (Tabla 7). En la columna de agua, durante el periodo estival, se observaron tres capas definidas: (1) la primera capa con valores entre los 4 y 10  $\mu\text{mol/L}$ ; ubicada en la zona más profunda durante noviembre, diciembre y enero; (2) La segunda capa con valores entre los 10 y 17,5  $\mu\text{mol/L}$  a lo largo de las profundidades superficiales y profundizándose a partir de diciembre, hasta alcanzar los 30m y (3) la tercera capa estuvo presente durante diciembre, enero y febrero, con valores superiores a 17,5  $\mu\text{mol/L}$ . Durante la época invernal, la mayor concentración de carbono orgánico particulado fue observada principalmente a nivel sub-superficial durante octubre y noviembre, con valores máximos entre los 5 y 10 m de profundidad. Durante el resto de la época invernal se evidenciaron valores relativamente bajos entre 8 y 15  $\mu\text{mol/L}$  (Figura 19 b). El nitrógeno particulado total en SR siguió una tendencia similar a la del carbono, con valores en promedio de  $2,10 \pm 1,05$   $\mu\text{mol/L}$  en el periodo estival y  $1,73 \pm 0,76$   $\mu\text{mol/L}$  durante el invernal (Figura 19 c). La concentración mínima ( $0,57$   $\mu\text{mol/L}$ ) fue observada en diciembre y la máxima finalizando en invierno austral o comienzos de la primavera ( $4,55$   $\mu\text{mol/L}$ ) (Tabla 7).

## MATERIA ORGÁNICA SR

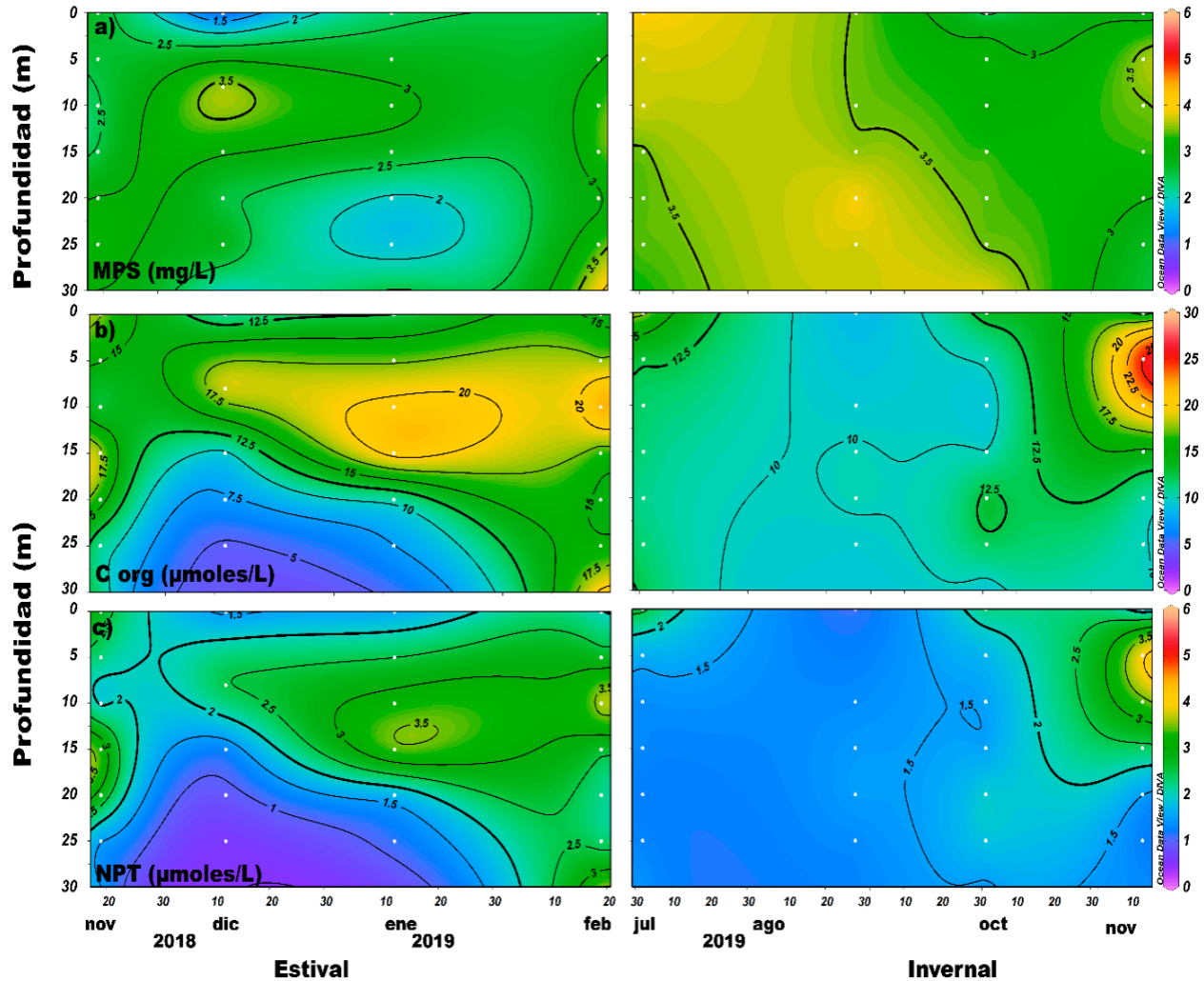


Figura 19 . Distribución vertical de la materia orgánica para la estación del Seno de Reloncaví (SR).

En SR los valores para la señal isotópica del carbono orgánico particulado presentó diferencias significativas entre épocas al igual que en el FRb. Por otra parte, la señal isotópica del carbono en la columna de agua de SR tuvo valores significativamente más altos que en FRb, con valores promedio de  $-23,25 \pm 2,75 \%$  en el periodo estival y  $-25,23 \pm 2,75 \%$  en el invernal (Tabla 7).

Los valores más bajos de la señal isotópica del carbono se observaron en la capa profunda de la época estival y a lo largo de toda la columna de agua de julio, agosto y octubre (invernal) (Figura 20 a). Si bien, no se encontraron diferencias significativas entre los sitios para la señal isotópica del nitrógeno, si se pudo observar una señal diferente entre las estaciones para el SR, con valores significativamente más altos en la época estival (promedio de  $9,59 \pm 2,29\%$ ) en relación con la invernal ( $7,24 \pm 2,67 \%$ ) (Tabla 7). Un

núcleo definido por encima de los 25 m fue identificado en la época estival y ascendiendo hacia la superficie durante verano (febrero), con valores  $>10\text{‰}$  (Figura 20 b). En la época invernal, se observó una homogeneización en toda la columna de agua muestreada para los valores promedios de la señal isotópica del N. Sin embargo, se vio un aumento paulatino en la razón isotópica conforme se avanzó hacia la transición invernal-estival (Figura 20 b).

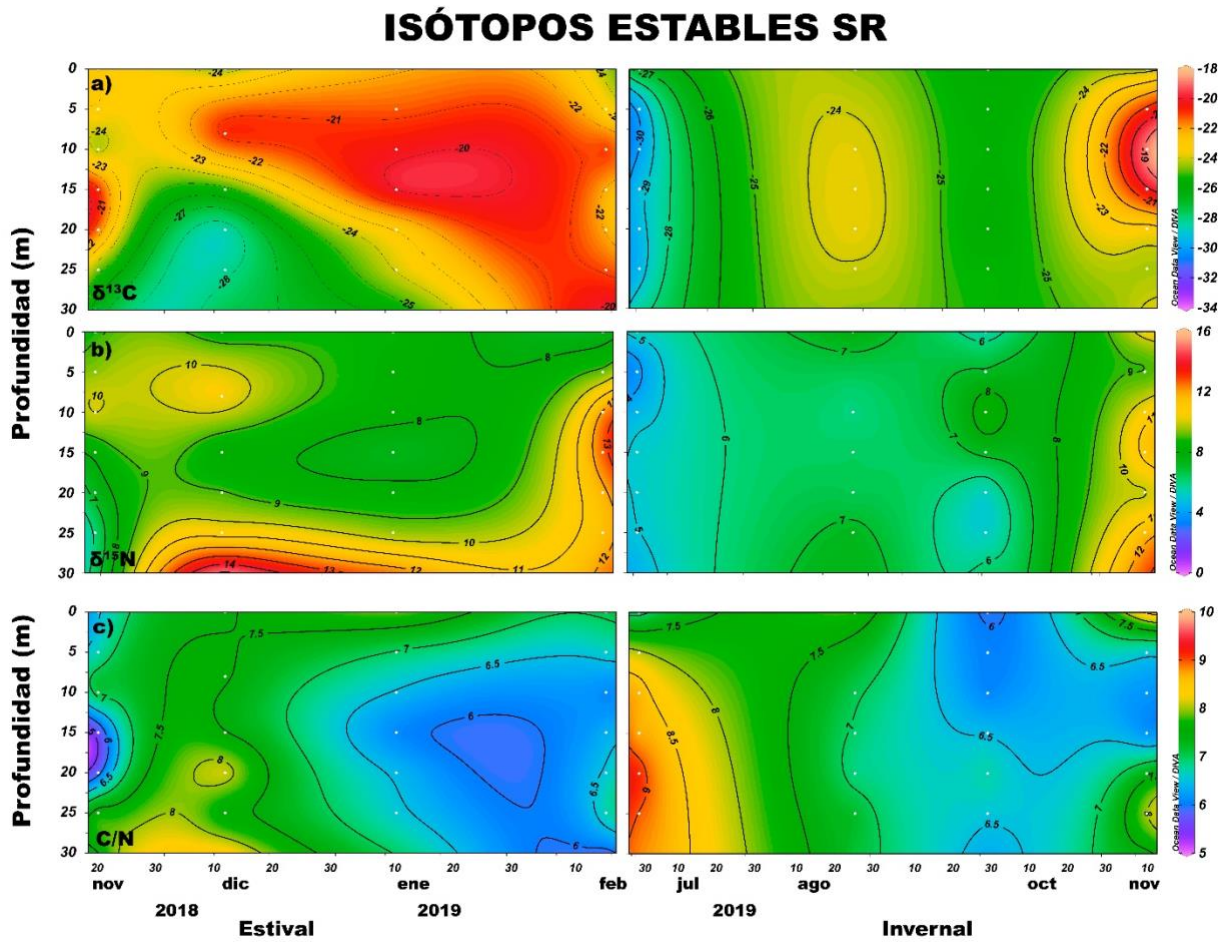


Figura 20 . Distribución vertical de la razón de isótopos estables a)  $\delta^{13}\text{C}$ , b)  $\delta^{15}\text{N}$  y c) la relación de proporción de  $\text{C}_{\text{org}}$  en función del NPT (C/N) de material particulado en suspensión en la estación del Seno de Reloncaví (SR).

No se encontraron diferencias significativas entre la relación molar del carbono orgánico total y nitrógeno total entre las épocas para el SR. No obstante, se observó un aumento de esta relación a nivel superficial, aumento que se profundizó entre noviembre y enero. Este patrón se repite en noviembre del siguiente año. En la época invernal, se mantiene un núcleo definido con una alta relación C/N a principios del muestreo (julio), para luego ir disminuyendo hacia valores < 7 (Figura 20 c.).

Tabla 7. Distribución de las variables químicas: a) C<sub>org</sub>, b) NPT, c) Material particulado en suspensión, d) relación de proporción de C<sub>org</sub> en función del NPT, e) δ<sup>13</sup>C y d) δ<sup>15</sup>N en el Sistema Estuarino Reloncaví SER (media ± desviación estándar [ mínimo; máximo]).

Las diferencias estadísticas en la media entre sitios (\*) se muestran en la columna Variable química. Las diferencias estadísticas en la media entre estaciones por cada sitio (\*) se muestran al final del sitio correspondiente.

Variable química	FRb			SR		
	Estival	Invernal		Estival	Invernal	
MPS (mg/L)	3,04 ± 0,84 [1,34; 5,27]	3,69 ± 0,90 [1,84; 5,20]	*	2,74 ± 0,66 [0,93; 3,94]	3,38 ± 0,48 [2,24; 4,24]	*
C <sub>org</sub> (μmol/L)	13,29 ± 4,59 [5,57; 22,17]	12,14 ± 2,56 [7,45; 17,76]		13,86 ± 5,81 [4,2; 24,54]	12,23 ± 4,35 [8,24; 28,45]	
NPT (μmol/L)	1,96 ± 0,86 [0,69; 3,79]	1,60 ± 0,49 [0,81; 2,60]		2,10 ± 1,05 [0,57; 4,12]	1,73 ± 0,76 [1,11; 4,55]	
C/N	7,05 ± 0,94 [5,39; 8,53]	7,79 ± 1,00 [5,83; 9,53]	*	6,90 ± 0,86 [5,31; 8,68]	7,29 ± 1,07 [5,69; 9,51]	
δ <sup>13</sup> C*	-24,91 ± 2,70 [-31,19; -20,87]	-26,38 ± 2,51 [-32,9; -21,17]	*	-23,25 ± 2,75 [-29,37; -18,71]	-25,23 ± 2,95 [-30,35; -18,02]	*
δ <sup>15</sup> N	8,76 ± 1,50 [5,97; 11,69]	6,46 ± 2,17 [2,18; 10,00]	*	9,59 ± 2,29 [5,81; 15,60]	7,24 ± 2,67 [2,79; 12,68]	*

### Fuentes de materia orgánica en SER

El Material Orgánico Particulado (MOP) en estuarios se compone de una mezcla de materiales terrestres y marinos orgánicos. La relación molar POC/PN diferencia el fitoplancton (con valores de 6-10) de los detritos terrestres y no vivos (valores > 12). En este estudio, la relación entre el COP vs el NPT estuvo en un rango entre 5,3 - 9,5 en toda la columna de agua, para ambos sitios y ambas estaciones (Tabla 7).

Esta relación fue positiva y altamente significativa ( $n=101$ ;  $r= 0,97$ ;  $p<0,001$ )Tabla 8. La alta correlación se ajustó a una regresión lineal con una pendiente menor (5,17) a la esperada de 6,6 propuesta por Redfield si toda la materia orgánica estuviera constituida por organismos fitoplanctónicos (Figura 21 a). Además, un exceso de  $3,3 \mu\text{moles L}^{-1}$  en el carbono orgánico, fue evidenciado en el balance de la ecuación.

El %C alóctono calculado para todas las muestras fue en promedio de un 44,9%. La relación entre el % C<sub>org</sub> y el C/N fue positiva y significativa ( $n=101$ ;  $r= 0,70$ ;  $p<0,001$ ), mostrando que el aumento de la razón C/N se da principalmente por la contribución de la materia orgánica alóctona producida en el SER (Figura 21b) coherente con los valores más bajos en  $\delta^{13}\text{C}$  (Figura 21c), y la débil relación no lineal entre  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  y clorofila-a (Figura 21d) considerado un indicador de biomasa fitoplanctónica. La señal isotópica del carbono  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  vs COP/clorofila (g/g) (Figura 21e) o su inversa en  $\mu\text{g}/\text{mg}$  (Figura 21 f), muestra que la mayoría de los valores se encuentran bajo 200 de CO/clorofila o más que 5 en clorofila7COP.

Las relaciones COP/clorofila para este estudio variaron de 13,65 a 513,66 (promedio de 123,42) para el SER, con valores más altos principalmente en el SR en invierno en un 17,45% de los casos (Figura 21 e). Es interesante destacar que la mayoría de los valores  $>200$  son los que predominan en la época invernal en el SR y unos pocos valores en época estival en FRb que coinciden con muestras sub-superficiales. La misma tendencia se observó al realizar la relación inversa (Figura 21 f).

Tabla 8 . Ecuación de regresiones para la relación entre indicadores de materia orgánica

Y	a	X	b	r
COP [ $\text{mmol l}^{-1}$ ]	5.17	NT	3.31	0.96
%COP aloctono	0.13	C/N	-0.46	0.69
$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ [‰]	-2.00	C/N	-10.40	0.70
$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ [‰]	1.93	$\text{Ln}(\text{Cl-a})$	-27.28	0.56
$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ [‰]	-0.04	COP/Cl-a	-21.56	0.57

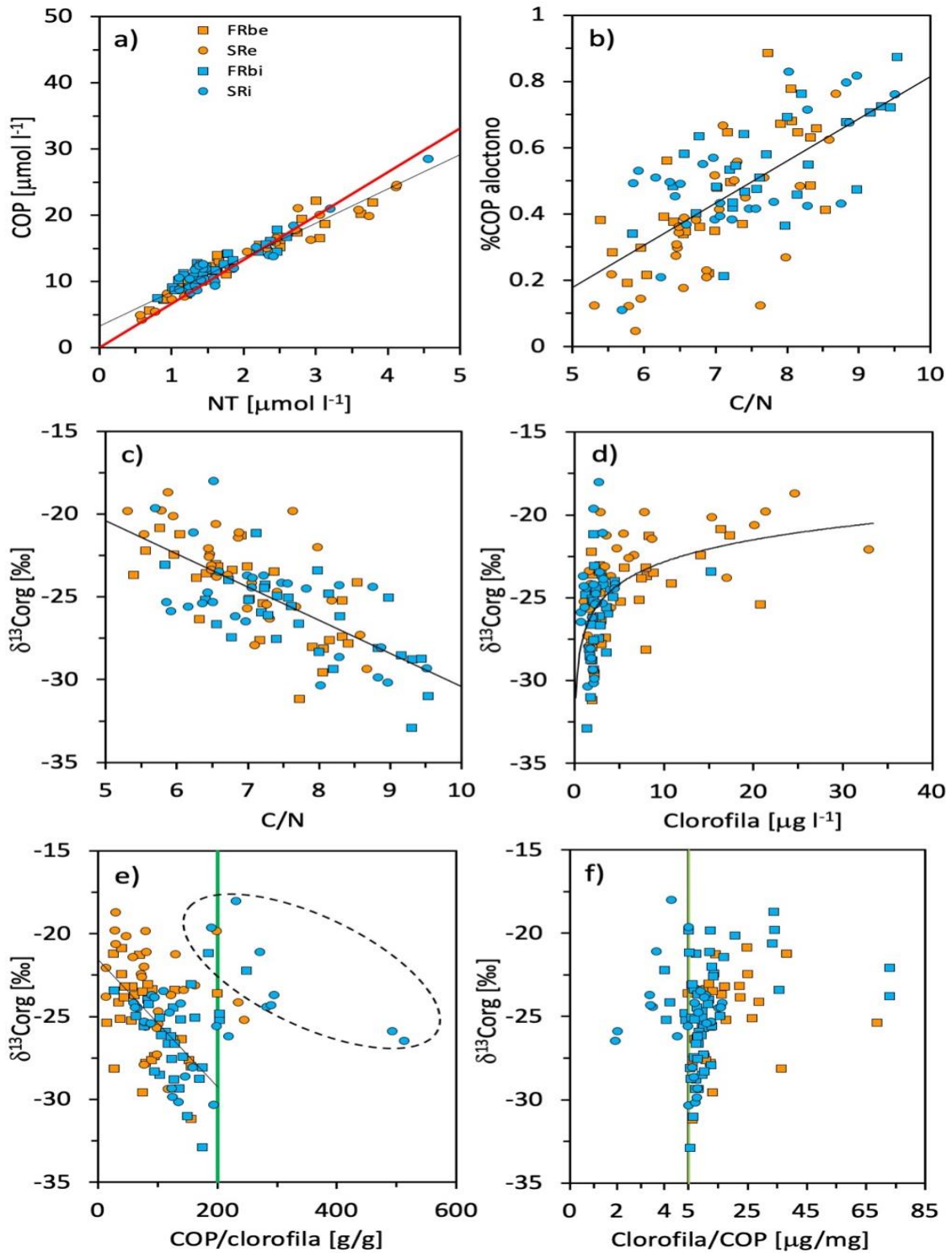


Figura 21. Relación entre COP y NPT (a), silicatos vs fosfatos (b), silicatos vs nitratos (c) y la relación entre los tres nutrientes (d) para ambos sitios muestreados (Seno Reloncaví, SR y boca del Fiordo de Reloncaví, FRb). Las líneas roja, azul y negra muestran la relación teórica planteada por Redfield: 106C:16N: 1P:15Si.

## Comunidad fitoplanctónica

### Análisis cualitativo

El análisis cualitativo del fitoplancton colectado mediante arrastres verticales (0 – 30 m), utilizando una red de plancton con un tamaño de poro de 23  $\mu\text{m}$  evidenció gran diversidad fitoplanctónica en ambos sitios de muestreo (FRb:95 especies; SR: 88 especies). El total de las especies detectadas fueron agrupadas en 6 grandes grupos taxonómicos: diatomeas, dinoflagelados, silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas (Tabla 9).

En las muestras colectadas en FRb el grupo con mayor porcentaje de representantes fueron las diatomeas, con 59% del total de especies, observando mayor diversidad durante la época invernal. Los dinoflagelados fueron el segundo grupo taxonómico con mayor porcentaje de especies, equivalente al 35,79%, pero a diferencia de las diatomeas, la mayor diversidad ocurrió durante el periodo estival. Se observaron pocas especies de silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas durante ambas épocas climáticas, con porcentajes que no superaron el 3% del total de especies de la estación en cada grupo. Se observó la misma tendencia en el comportamiento de la cantidad de especies de los grupos en SR de las cuales el 48,86% son diatomeas, el 44,31% son dinoflagelados, el 2,27% son ciliados y el 1,14% son silicoflagelados, zoomastigoforos y euglenofíceas cada uno. Al igual que en FRb los dinoflagelados tuvieron más riqueza de especies durante la época estival. Mientras, ausencia de silicoflagelados y zoomastigoforos fue observado en el periodo invernal.

Se realizó una clasificación entre las especies catalogadas como nocivas. Se consideraron especies nocivas a las que tienen potencial para generar daño mecánico en las branquias de peces en cultivo y/o tóxicas que pueden producir biotoxinas marinas, ya sea del tipo paralizante, amnésica, diarreica, entre otras. El análisis de este grupo evidenció la presencia de 8 especies nocivas en ambos sitios de muestreo, de las cuales 7 fueron diatomeas (*Ditylum brightwellii*, *Eucampia zodiacus*, *Leptocylindrus danicus*, *Leptocylindrus minimus*, *Rhizosolenia setigera*, *Rhizosolenia styliformis*, *Skeletonema spp.*) y sólo una correspondiente a los silicoflagelados (*Dictyocha speculum*). Se observó la presencia en ambas estaciones de la diatomea *Pseudo-nitzschia cf. australis*, responsable del síndrome de intoxicación por Toxina Amnésica de Mariscos (TAM) debido a su capacidad de producir ácido domóico (AD) y de los dinoflagelados *Dinophysis acuminata* y *Dinophysis spp.*, asociados a la producción de toxinas lipofílicas, entre ellas pectenotoxinas (PTX2). Adicionalmente en FRb estuvo presente el dinoflagelado *Protoceratium reticulatum*, asociada a la producción de yesotoxinas (YTXs) (Anexo 2). Estas dos últimas toxinas, a pesar

de no representar un riesgo para la salud humana debido a que no producen intoxicaciones, si son responsables de mortalidades y malformaciones de vertebrados e invertebrados marinos.

Tabla 9. Número de especies fitoplanctónicas, según la división de los grandes grupos taxonómicos en FRb y SR.

Grupo fitoplanctónico	FRb			SR		
	Estival	Invernal	Total	Estival	Invernal	Total
Diatomeas	44	38	56	30	35	43
Dinoflagelados	27	22	34	29	23	39
Silicoflagelados	1	1	1	1	0	1
Zoomastigoforos	1	1	1	1	0	1
Ciliados	2	2	2	1	2	2
Euglenofíceas	1	1	1	1	1	1
<b>TOTAL</b>	<b>76</b>	<b>65</b>	<b>95</b>	<b>63</b>	<b>61</b>	<b>88</b>

#### Análisis cuantitativo

El análisis cuantitativo del fitoplancton colectado con botellas Niskin, mostró una comunidad fitoplanctónica dominada principalmente por diatomeas y dinoflagelados, respecto a los demás grupos (silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas) (Figura 22 y Figura 23). Se observó una alta densidad celular de diatomeas en el estrato más superficial (0-15 m) en FRb con una concentración máxima de 1.944.600 cel. L<sup>-1</sup> a los 15 m (Figura 22 c). El muestreo de agosto se destacó por las altas densidades de diatomeas a lo largo de la columna de agua, encontrándose el valor máximo a 30 m de profundidad (153.700 cel. L<sup>-1</sup>). De manera general, las menores densidades alcanzadas por las diatomeas se observaron en el estrato más profundo (20-30 m) con una concentración mínima que no supera 1.000 cel. L<sup>-1</sup> durante julio a los 30m (Figura 22 e.). Los dinoflagelados dominaron principalmente en febrero (Figura 22 g y h.) con densidades celulares que superaron las 68.000 cel. L<sup>-1</sup>(5m de profundidad) y disminuyeron durante el periodo invernal. Los demás grupos taxonómicos destacaron por su presencia en julio en la capa superficial alcanzando densidades de hasta 1.900 cel. L<sup>-1</sup>(Figura 22e).

En SR se observaron las mayores densidades celulares de diatomeas y dinoflagelados durante febrero con concentración máximas de 2.610.700 cel. L<sup>-1</sup> y 111.500 cel. L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 23 d) y durante noviembre del 2018 se identificaron las menores densidades de diatomeas, con valores cercanos a 300 cel. L<sup>-1</sup>(Figura 23 a). Mientras, que en la época invernal durante julio y agosto fueron los valores más

bajos en la concentración de dinoflagelados ( $300 \text{ cel. L}^{-1}$ ) (Figura 23 e y f). En diciembre y octubre la categoría “Otros”, conformado por silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas, tuvo las densidades más elevadas con  $1.300 \text{ cel. L}^{-1}$  (Figura 23 b y g) y durante agosto no se observó ninguna especie correspondiente a esta clase (Figura 23 f).

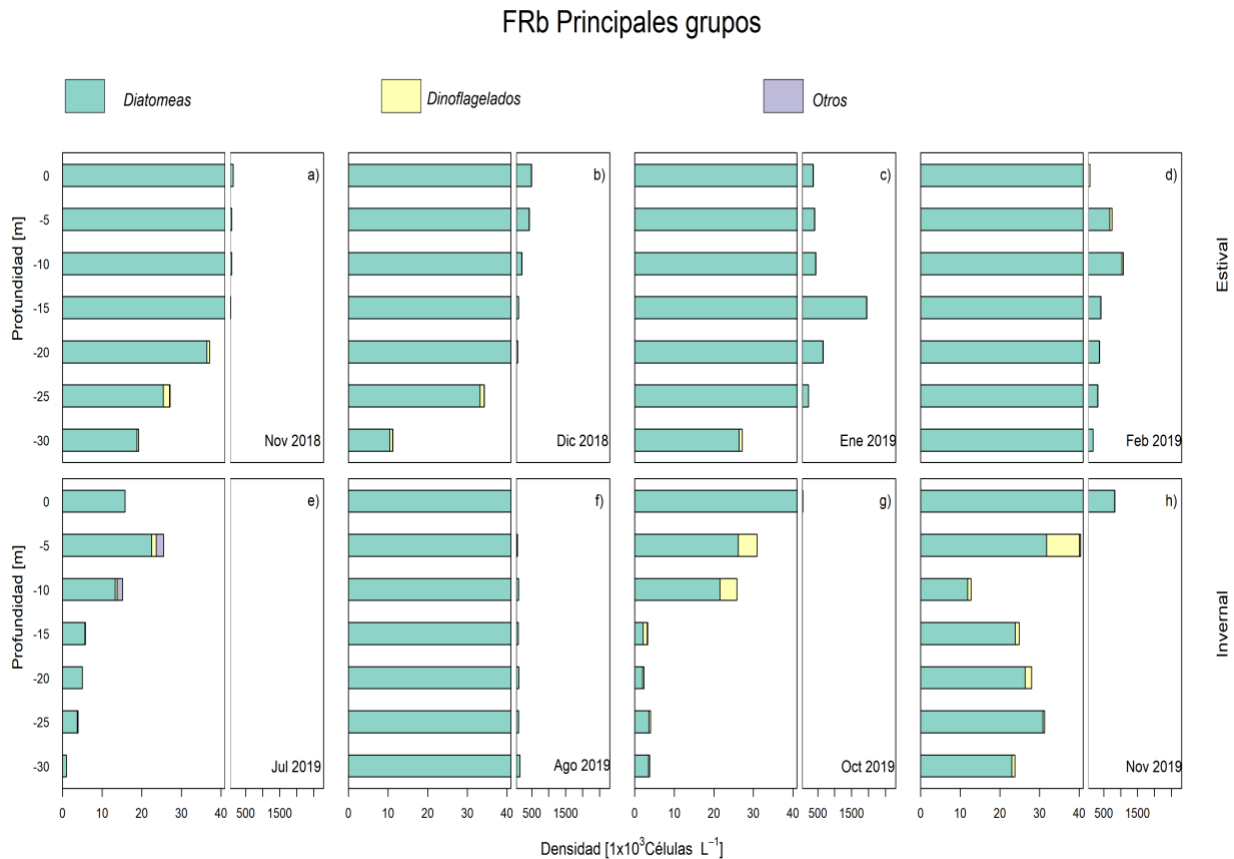


Figura 22. Distribución en la columna de agua de las densidades celulares ( $1 \times 10^3 \text{ cel. L}^{-1}$ ) de los principales grupos detectadas en FRb. Los silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas fueron agrupadas en la categoría de Otros debido a su baja densidad celular.

### SR Principales grupos

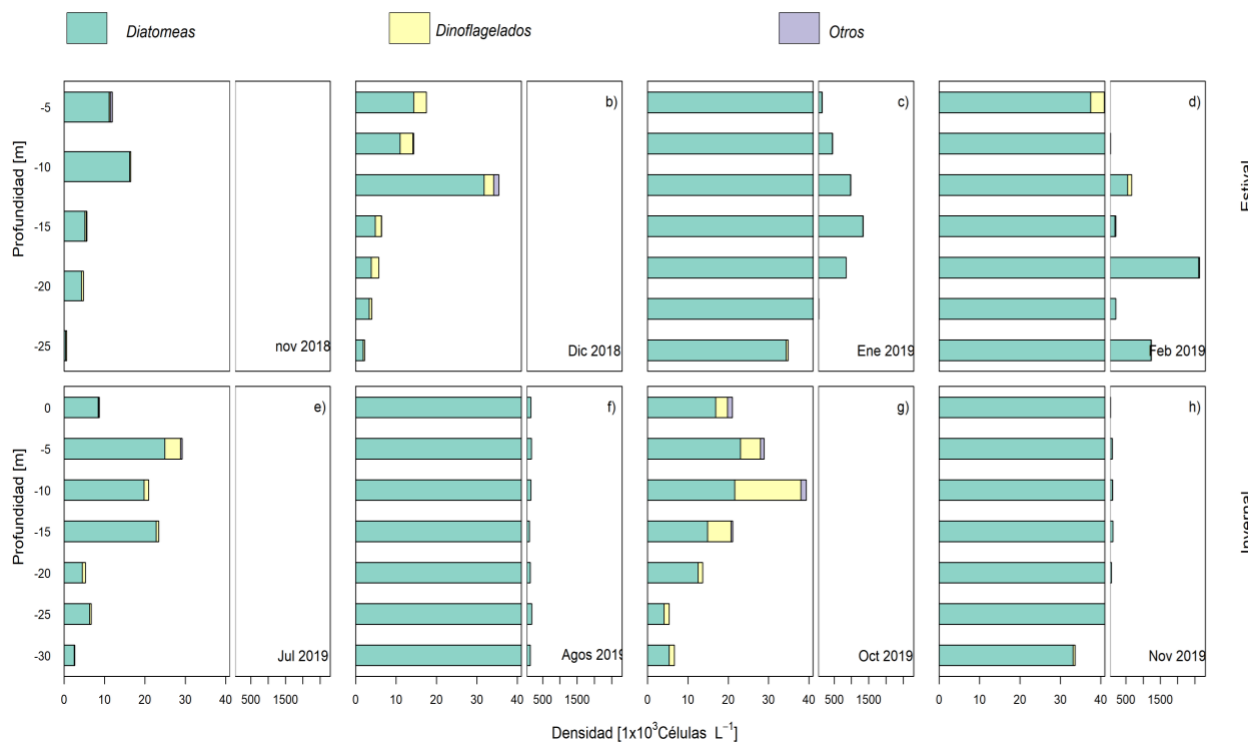


Figura 23 Distribución en la columna de agua de las densidades celulares ( $1 \times 10^3 \text{ cel. L}^{-1}$ ) de los principales grupos detectados en SR. Los silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas fueron agrupadas en la categoría de Otros debido a su baja densidad celular.

Se realizaron diagramas de sombra como representación visual de las matrices de abundancia de las especies del fitoplancton en ambos sitios de muestreo. Para estas figuras se realizó una transformación de raíz cuarta para eliminar el mayor peso en el análisis a las especies dominantes y entender el comportamiento de toda la comunidad incluyendo las especies raras (con % de presencia bajos) (Figura 24 y Figura 25). Se observó que, en ambos sitios de muestreo, especies como *Navicula spp.* y *Pseudo-nitzschia spp.* están presentes en casi todos los meses del año, con densidades celulares mayores durante el periodo estival. Por el contrario, *Thalassiosira spp.* y *Thalassiosira cf. minúscula* presentaron mayores densidades en la época invernal.

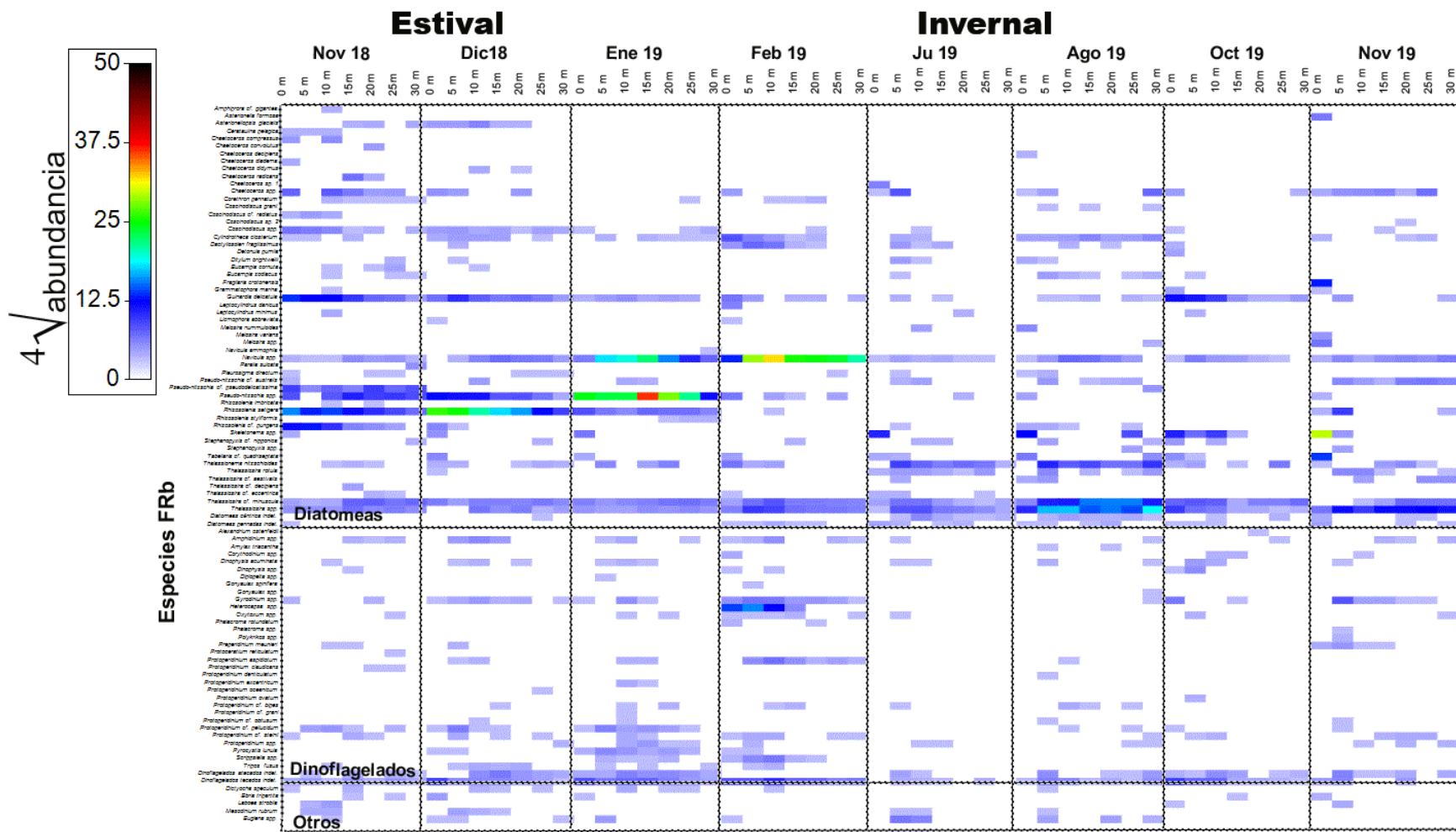


Figura 24. Gráfico sombreado de la distribución de especies de la comunidad fitoplanctónica a lo largo de las ocho campañas de muestreo en FRb.



Se realizó en cada estación una selección de diez categorías importantes para entender el comportamiento de la comunidad fitoplanctónica que incluyó las nueve especies con mayor densidad celular y la categoría otros que representa la suma de las densidades de los silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas (Figura 26 y Figura 27 ). Las especies más abundantes, en orden de importancia numérica en FRb, fueron: *Pseudo-nitzschia* spp., *Navicula* spp., *Rhizosolenia setigera*, *Skeletonema* spp., *Thalassiosira* spp., *Thalassiosira* cf. *minúscula*, *Guinardia delicatula*, *Heterocapsa* spp. y *dinoflagelados tecados indeterminados*.

Se observó durante noviembre y diciembre del 2018 que la especie con mayor densidad celular en todos los estratos fue *Rhizosolenia setigera* con 162.100 cel. L<sup>-1</sup> y 1.230.500 cel. L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 26 a y b). La segunda especie con la densidad más representativa en noviembre fue *Guinardia delicatula* (94.100 cel. L<sup>-1</sup>) y en diciembre *Pseudo-nitzschia* spp. (69.800 cel. L<sup>-1</sup>). Durante estos dos meses no hubo presencia de *Heterocapsa* spp. y la especie con menor abundancia fue *Skeletonema* spp. (noviembre: 300 cel. L<sup>-1</sup>; diciembre: 800 cel. L<sup>-1</sup>). En enero *Pseudo-nitzschia* spp. tuvo la mayor densidad celular (3.452.400 cel. L<sup>-1</sup>), seguida de *Navicula* spp. con la densidad más alta a los 15m (234.900 cel. L<sup>-1</sup>). En febrero siguió presentando altas densidades *Navicula* spp. Sin embargo, reduce la abundancia de *Pseudo-nitzschia* spp. (2.700 cel. L<sup>-1</sup>) y se observó la aparición de *Heterocapsa* spp. con densidades superiores a los 120.000 cel. L<sup>-1</sup>. En enero la categoría otros mostraron abundancias bajas (1.100 cel. L<sup>-1</sup>) y en febrero no se evidenció la presencia de *Skeletonema* spp. (Figura 26 c y d).

En general, durante el periodo invernal las densidades celulares fueron menores. En julio y agosto las especies con mayores densidades fueron *Thalassiosira* spp. (14.500 cel. L<sup>-1</sup>) y *Skeletonema* spp. (12.700 cel. L<sup>-1</sup>) y *Pseudo-nitzschia* spp. fue la especie con menor abundancia (julio: 200 cel. L<sup>-1</sup>; agosto: 400 cel. L<sup>-1</sup>) (Figura 26 e y f). Durante estos dos meses no hubo presencia de *Rhizosolenia setigera*. En octubre se registraron densidades más elevadas en el estrato superficial (0-10 m) con abundancias de 45.500 cel. L<sup>-1</sup> de *Guinardia delicatula* y 23.900 cel. L<sup>-1</sup> de *Skeletonema* spp. No se evidenció la presencia de *Pseudo-nitzschia* spp., *Rhizosolenia setigera* y *Heterocapsa* spp. En el último mes de muestreo (noviembre del 2019) se observó en la superficie de la columna de agua concentraciones de 753.200 cel. L<sup>-1</sup> de *Skeletonema* spp. Sin embargo, desde los 10 hasta los 30 m no se observó esta especie. *Thalassiosira* spp. estuvo presente a lo largo de toda la columna de agua con una densidad superior a las 100.000 cel. L<sup>-1</sup>. Durante este mes tampoco se observó la presencia de *Heterocapsa* spp., y también poca densidad celular de *Pseudo-nitzschia* spp. (Figura 26 g y h).

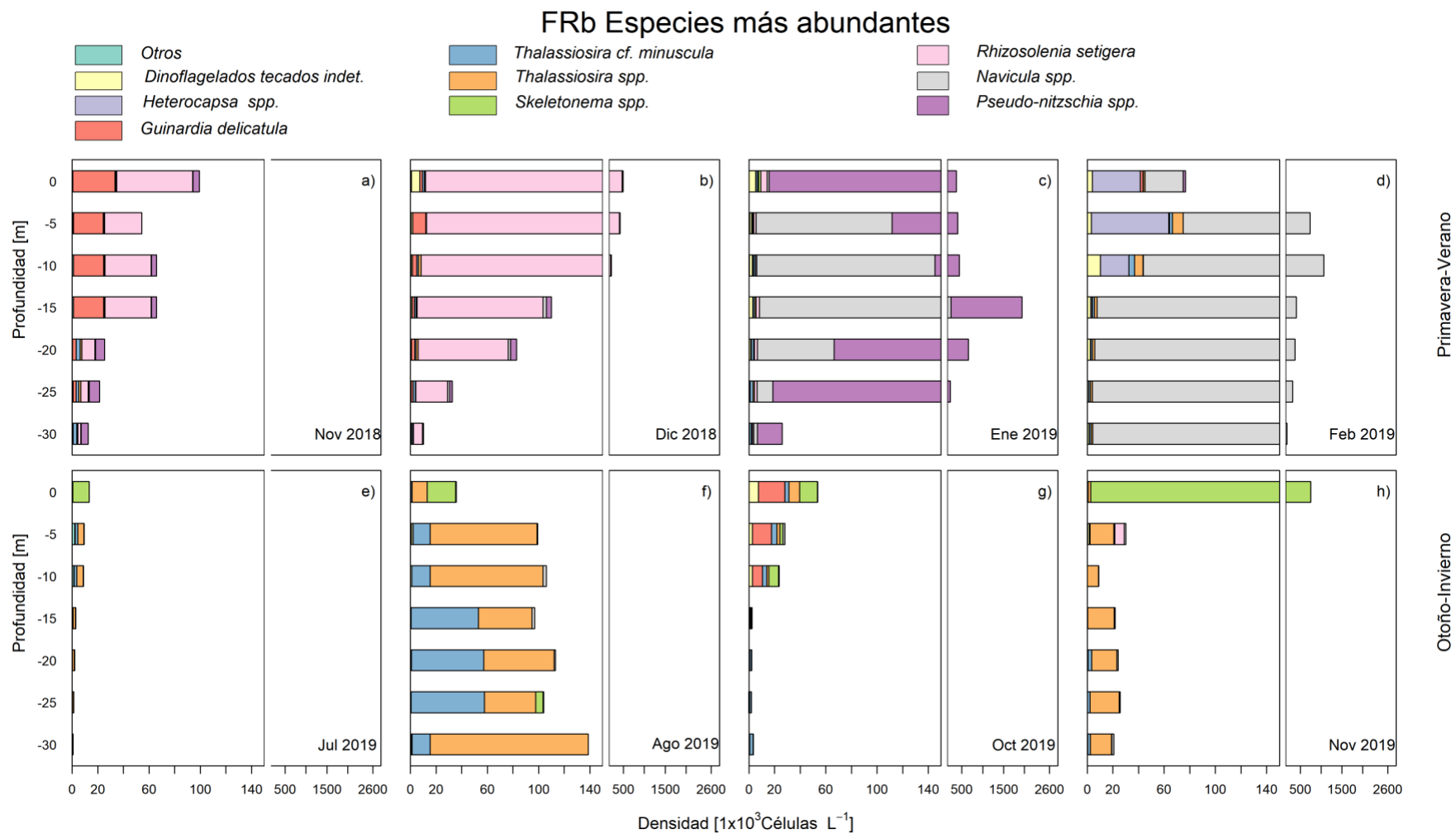


Figura 26. Distribución vertical de la densidad celular (cel. L<sup>-1</sup>) de las principales especies fitoplanctónicas detectadas entre superficie y 30 m en FRb.

Las especies más abundantes, en orden de importancia numérica en SR, fueron: *Navicula* spp., *Pseudo-nitzschia* spp., *Thalassiosira* spp., *Thalassiosira* cf. *minúscula*, *Scrippsiella* spp., *Guinardia delicatula*, *Rhizosolenia setigera*, *Thalassionema nitzschioides* y dinoflagelados tecados indeterminados. Noviembre y diciembre del 2018 fueron los meses con las menores densidades celulares. La especie con mayor densidad celular en todos los estratos fue *Rhizosolenia setigera* con 162.100 cel. L<sup>-1</sup> y 1.230.500 cel. L<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 26 a y b). En noviembre, las dos especies con mayores abundancias fueron *Guinardia delicatula* (20.100 cel. L<sup>-1</sup>) y *Rhizosolenia setigera* (6.200 cel. L<sup>-1</sup>).

No se observó la presencia de *Pseudo-nitzschia* spp., *Thalassiosira* cf. *minúscula*, *Thalassionema nitzschioides* y dinoflagelados tecados indeterminados (Figura 27 a.) Durante diciembre en la capa superior (0-10), *Pseudo-nitzschia* spp. (22.600 cel. L<sup>-1</sup>) y *Guinardia delicatula* (18.300 cel. L<sup>-1</sup>) registraron las mayores densidades celulares. Durante este mes no se observó *Rhizosolenia setigera* ni *Thalassionema nitzschioides*. Enero y febrero fueron por el contrario los meses donde se vieron las mayores abundancias de la comunidad fitoplanctónica. En enero, se registró una floración de *Pseudo-nitzschia* spp. con densidades que superaron los 3.330.000 cel. L<sup>-1</sup>. *Navicula* spp. también tuvo densidades celulares altas con 411.900 cel. L<sup>-1</sup> (Figura 26 c y d). *Scrippsiella* spp. no estuvo presente durante enero y *Thalassionema nitzschioides* fue la especie con menor densidad (400 cel. L<sup>-1</sup>). En febrero, *Navicula* spp. alcanzó las densidades más altas con más de 4.875.000 cel. L<sup>-1</sup>. Entre los 0 y los 20 m se registraron densidades celulares altas de *Scrippsiella* spp., mientras que no hubo presencia de *Pseudo-nitzschia* spp., *Rhizosolenia setigera* y *Thalassionema nitzschioides*. *Thalassiosira* spp. fue la especie que durante este mes tuvo las menores densidades (400 cel. L<sup>-1</sup>).

En julio, *Thalassiosira* spp. (30.800 cel. L<sup>-1</sup>) y *Thalassionema nitzschioides* (23.400 cel. L<sup>-1</sup>) estuvieron presentes en toda la columna de agua con densidades más altas (Figura 26 e). Agosto, correspondió al mes de la época invernal donde se observaron las densidades más altas en SR, con mayores abundancias de *Thalassiosira* spp. (747.100 cel. L<sup>-1</sup>) y *Thalassiosira* cf. *minúscula* (30.800 cel. L<sup>-1</sup>) (Figura 26 f). *Scrippsiella* spp. no estuvo presente en ninguno de estos dos meses. En agosto, tampoco se observó la presencia de otros grupos, además la densidad celular de *Pseudo-nitzschia* spp. fue baja (700 cel. L<sup>-1</sup>). En octubre, *Thalassiosira* cf. *minúscula* también presentó densidades celulares elevadas (33.800 cel. L<sup>-1</sup>) junto con *Guinardia delicatula* (54.400 cel. L<sup>-1</sup>). *Pseudo-nitzschia* spp. siguió con densidades celulares bajas (100 cel. L<sup>-1</sup>). *Thalassiosira* spp. en noviembre nuevamente volvió a registrar altas densidades (435.600 cel. L<sup>-1</sup>).

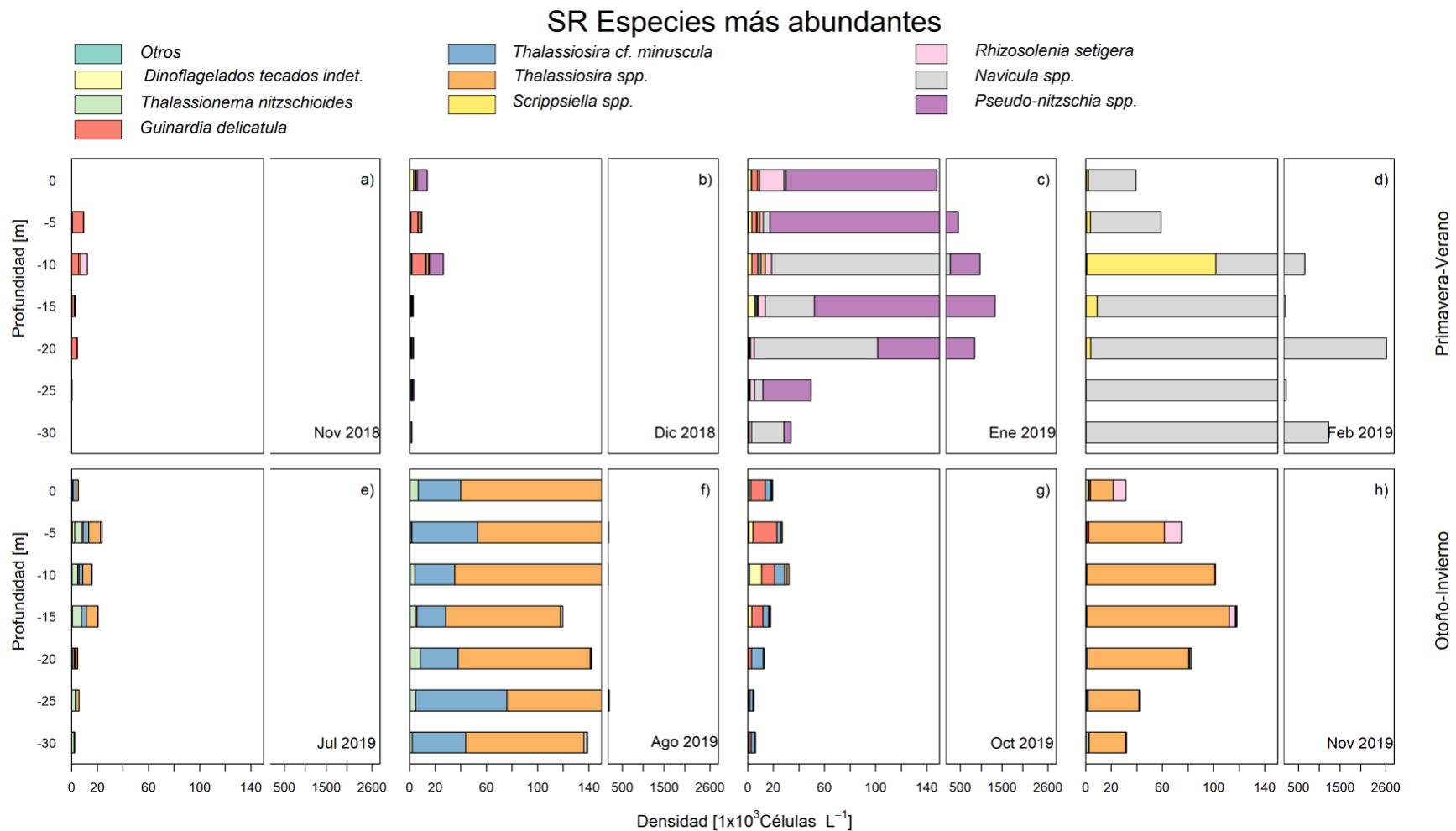


Figura 27. Distribución vertical de la densidad celular ( $cel. L^{-1}$ ) de las principales especies fitoplanctónicas detectadas entre superficie y 30 m en SR.

Un análisis de similitud (ANOSIM) evidenció la existencia de diferencias significativas entre la densidad de fitoplancton entre periodos climáticos (R estadístico: 0,10;  $p=0.001$ ) (Figura 28). Sin embargo, no se observó cambios significativos entre sitios de muestreo (R estadístico: 0.007;  $p=0.108$ ). La ordenación gráfica del escalamiento multidimensional no métrico (nMDS) de todas las muestras de la comunidad fitoplanctónica colectadas en el SER ( $n=112$  muestras), comprobó la separación de la abundancia del fitoplancton entre la época estival e invernal, con una leve superposición (estrés= 0,18) (Figura 29). La mayor contribución a la disimilitud entre épocas climáticas fue dada por *Navicula* spp. y *Pseudo-nitzschia* spp. (Figura 30 a). Esto también se comprobó por la variación en la densidad para estas dos especies entre el periodo estival e invernal (Figura 30 b y c).

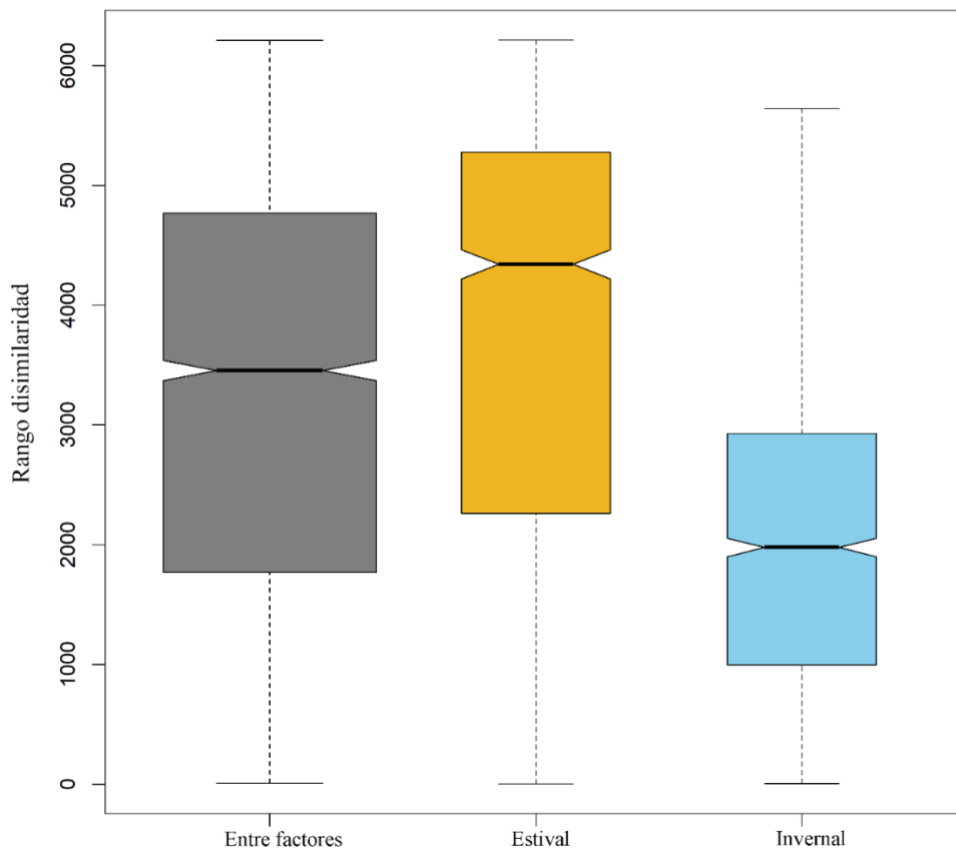


Figura 28. Diagrama de cajas de los resultados de ANOSIM entre épocas climáticas.

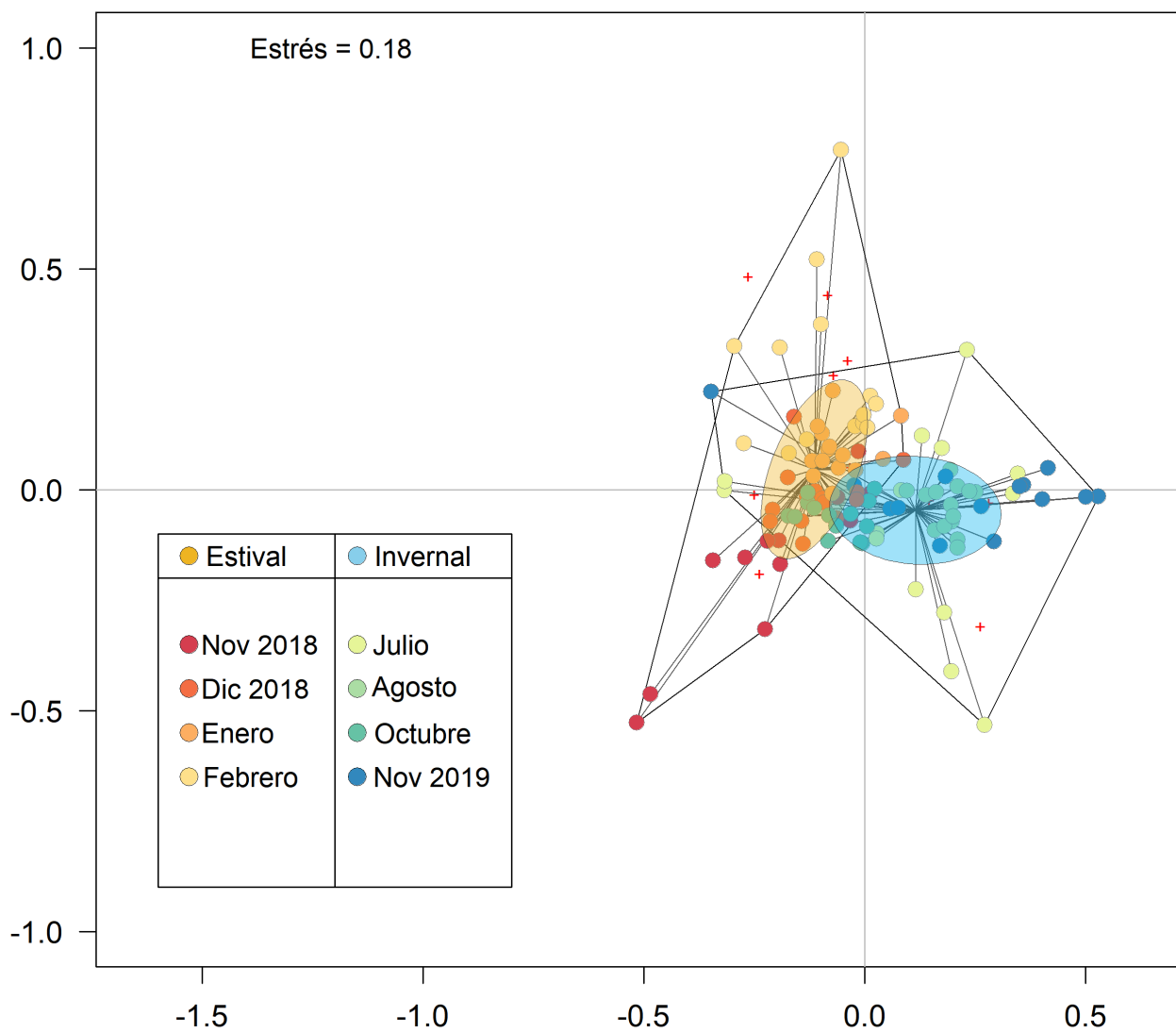


Figura 29. Representación bidimensional del escalamiento multidimensional no métrico (nMDS) entre épocas climáticas.

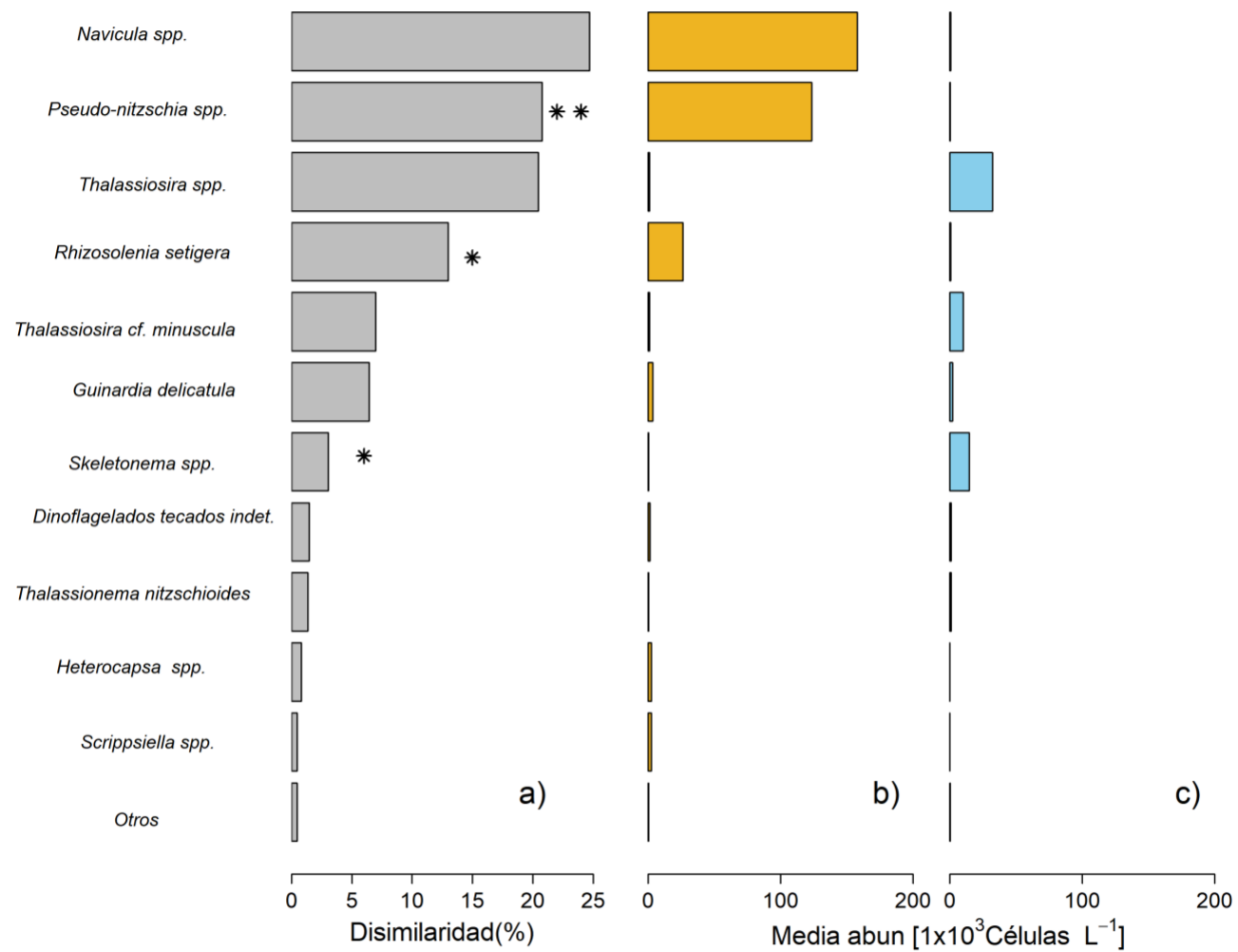


Figura 30. Análisis SIMPER entre épocas climáticas. a) Especies de fitoplancton con las mayores contribuciones a la disimilitud promedio de los ensamblajes de cada época. Abundancia media ( $1 \times 10^3$  cel.  $L^{-1}$ ) por especie según la época estival (b) e invernal (c) \*\*Tóxicas y potencialmente \* Nocivas.

Un análisis de correspondencia canónica (CCA) fue aplicado para determinar cómo las especies de fitoplancton más importantes de FRb (Figura 31) y SR (Figura 32) se organizaron en relación con las variables ambientales (T, S, O<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SiO<sub>2</sub><sup>4+</sup>, Cl-*a*, C<sub>org</sub>, NT, δ<sup>15</sup>N y δ<sup>13</sup>C). El CCA 1 (eje horizontal) y el CCA 2 (eje vertical) explicaron el 58,06% de la varianza acumulada en FRb y 57,29% en SR. El resultado del CCA en ambos sitios confirmó que los conjuntos de datos de las épocas climáticas se diferencian (Figura 29). En FRb se observó que los nutrientes (salvo el silicio) estaban asociados al ingreso de agua oceánica, por lo tanto, se relacionaban con la salinidad. Durante la época estival se observó un aumento del oxígeno y la clorofila, a causa de la productividad primaria representativa de la época. En el periodo invernal se registró la presencia de *Skeletonema spp.*, que se relacionó con el aumento del SiO<sub>2</sub><sup>4+</sup> y la disminución de la salinidad y un leve aumento de la temperatura, esto se evidenció principalmente en la estación invernal. *Pseudo-nitzschia spp.*, tuvo un comportamiento promedio.

Especies como *Rhizosolenia setigera*, *Thalassiosira cf. minuscula* y *Guinardia delicatula*, durante el año, estuvieron asociadas a condiciones limitantes de nutrientes, bajas temperaturas y oxígeno. Proxies de biomasa fitoplactónica como la clorofila, fueron bajos para este subconjunto, sin embargo, existe un leve aumento de carbono. La señal isotópica del C y N tiende a disminuir, esto ocurre principalmente en otoño-invierno. *Heterocapsa spp.* y *Navicula spp.* son especies que se relacionaron con altas concentraciones de nutrientes, materia orgánica y clorofila, asociadas a una señal isotópicamente mas pesada. Estas asociaciones se dieron principalmente en primavera-verano.

En el Seno de Reloncavi, en la época invernal, especies como *Thalassionema nitzschioides*, *Thalassiosira cf. minúscula* y *Thalassiosira spp.* estuvieron asociadas al aumento de nutrientes y salinidad, y disminución de la temperatura. *Pseudo-nitzschia spp.* tuvo un comportamiento opuesto asociado a su vez a un aumento de oxígeno, nitritos, clorofila, carbono orgánico y una señal isotópica enriquecida en carbono, pero empobrecida en nitrógeno. Esto se evidenció principalmente en primavera verano. Para la misma estación, *Scrippsiella spp.*, y *Navicula spp.* estuvieron asociadas con bajas de salinidad, pero con aumentos de nutrientes, clorofila y con una señal isotópica enriquecida en nitrógeno, a diferencia de *R. setigera* que tuvo un comportamiento opuesto.

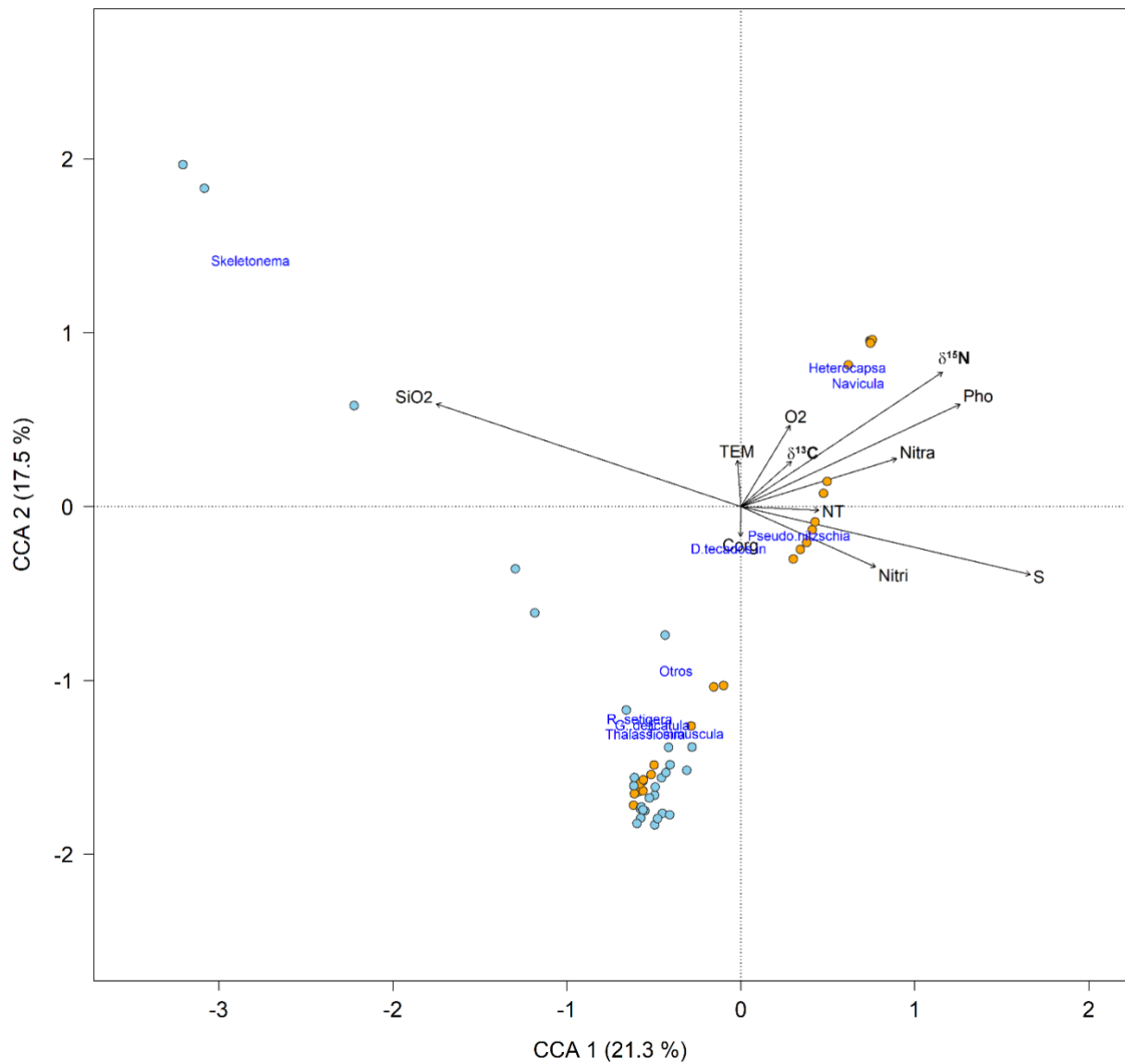


Figura 31. Biplot del análisis de correspondencia canónica (CCA) del conjunto de muestras del FRb. Las muestras colectadas en cada época climática están representadas por círculos (Estival: naranja; invernal: azul). Las flechas indican las variables ambientales.

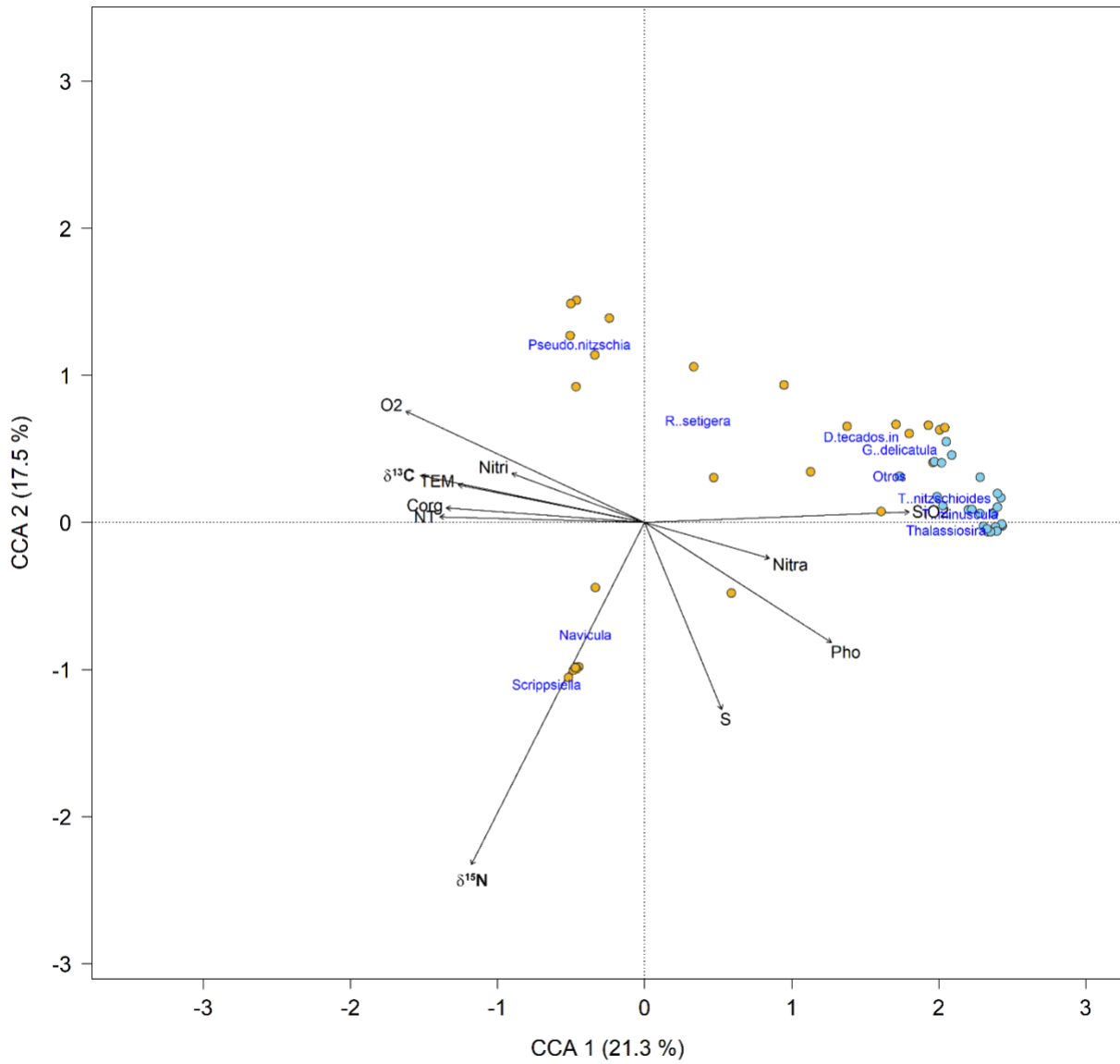


Figura 32. Biplot del análisis de correspondencia canónica (CCA) del conjunto de muestras del SR. Las muestras colectadas en cada época climática están representadas por círculos (Estival: naranja; invernal: azul). Las flechas indican las variables ambientales.

## DISCUSIÓN

En esta tesis se utilizaron datos *in-situ* de fitoplancton para estudiar el comportamiento espacio-temporal de esta comunidad en el sistema estuarino Reloncaví (SER). El periodo de estudio abarcó desde noviembre 2018 hasta noviembre 2019 y se usaron dos estaciones de muestreo, una ubicada en el centro del Seno Reloncaví (SR) y otra en la boca del fiordo Reloncaví (FRb). Entre los principales resultados se evidenció que la distribución espacial del fitoplancton fue similar en todo el SER. Sin embargo, en la mayoría de los muestreos las abundancias de fitoplancton fueron mayores en la estación FRb, situación que se acentuó durante verano y principalmente en febrero, uno de los meses más importantes para el desarrollo y proliferación del fitoplancton, dado principalmente por el aumento de radiación solar. Por otro lado, se destacaron 10 especies, entre ellas las más abundantes fueron *Navicula* spp. y *Pseudonitzschia* spp. A continuación, se discuten los procesos físicos, químicos e hidroclimáticos que contribuyeron a explicar los patrones espacio-temporales encontrados.

### Distribución espacio-temporal de la comunidad de fitoplancton

El estudio de la comunidad de fitoplancton detectó 6 grandes grupos taxonómicos en toda el área de estudio: diatomeas, dinoflagelados, silicoflagelados, zoomastigoforos, ciliados y euglenofíceas. De estos grupos más del 90 % de las especies estuvo representado por diatomeas y dinoflagelados (Figura 22 y Figura 23). Por otro lado, los dinoflagelados fueron el grupo taxonómico que representó mayor riqueza de especies (Tabla 9). Estos resultados coincidieron con otros estudios de la distribución de la comunidad de fitoplancton en los sistemas de fiordos y canales de la Patagonia, donde se destaca la abundancia de diatomeas durante la época de estival y los dinoflagelados en invierno (González et al. 2011; Iriarte et al. 2017; Pérez-Santos et al. 2021). *Skeletonema* spp. fue una de las 10 especies más abundantes durante el periodo de estudio, como también ha sido reportado por Iriarte *et al.* (2017) y Montero *et al.*, (2011) en los fiordos Reloncaví (región de los Lagos) y Puyuhuapi (región de Aysén) y por González *et al.* (2011) en el golfo Elefante (región de Aysén). En estos lugares esta especie representó entre el 70-80 % de la producción primaria (PP).

La luz y la disponibilidad de nutrientes han sido descritos como unos de los factores importantes en el desarrollo y proliferación de las comunidades fitoplanctónicas. Estudios de la disponibilidad de luz (radiación fotosintéticamente activa, PAR por sus siglas en inglés) y fotosíntesis en fiordos, estuarios y

bahías de la Patagonia determinaron que su mayor intensidad se observó durante el verano entre los 7 y 30 metros de profundidad (Huovinen et al. 2016). Nuestros resultados mostraron altas densidades de fitoplancton en los primeros 30 metros de la columna de agua, principalmente durante la época de verano. Sin embargo, Montero *et al.*, (2017) reportaron el florecimiento del dinoflagelado *Heterocapsa triquetra* en invierno con baja intensidad de luz, pero con ingreso de nutrientes hacia la capa fótica producto de la mezcla vertical debido a los vientos. En este contexto, los vientos calculados para el nivel superficial (0.01 hPa = 10m) (Figura 5) muestran que las velocidades son significativamente mayores en otoño e invierno, provenientes desde el norte. Estas velocidades se ven intensificadas en invierno con valores incluso >7 m/s, en comparación con el promedio de los vientos en primavera-verano, donde son predominantemente del sur, sur-oeste, con intensidades leves (1,7-3,3 m/s) a moderadas (3,6-5,5 m/s).

Debido a las características topográficas del Seno de Reloncaví la influencia de los vientos locales serían determinantes en la estimación del oleaje y en la circulación superficial (Castillo et al. 2016). Aunque no es posible comparar todos los parámetros (hidrografía, nivel del mar, viento, corrientes de anclajes) en forma temporal, queda en evidencia que estos confirman la alta variabilidad de la circulación superficial y en profundidad. Los datos de corrientes directas muestran en forma más convincente como las aguas del Seno de Reloncaví están fuertemente afectadas por el forzante de la onda de marea y el desnivel de la superficie de agua causada por la acumulación de agua por efecto del viento que afecta a toda la columna de agua, la circulación de tipo estuarino debido al aporte de agua salobre proveniente del estuario de Reloncaví y por el efecto directo del viento sobre las capas superficiales de agua (Castillo et al. 2016). Todos estos procesos pueden intensificar la mezcla vertical y producir altas abundancias de fitoplancton en otras épocas del año fuera de la temporada de alta productividad biológica a pesar de la baja intensidad luminosa.

Los fiordos y canales de la Patagonia están en constante intercambio con las aguas oceánicas ricas en nutrientes del Océano Pacífico (Strub et al. 2019). Estas aguas ingresan a la Patagonia norte principalmente por la Boca del Guafo y se distribuyen hacia el norte y sur de esta región (Sievers & Silva 2006). El alto contenido de nitrato (20-30  $\mu\text{M}$ ) y fosfato (2-3  $\mu\text{M}$ ) que llegan desde el océano junto a los aportes de silicato provenientes desde los ríos, forman parte del alimento principal que posibilita el desarrollo de las comunidades de fitoplancton en la región (Silva & Palma 2008; Silva et al. 2009; Montero et al. 2017). Durante el invierno de 2018, las altas concentraciones de nutrientes en la estación ubicada en el Seno Reloncaví alcanzaron la superficie (Figura 15). Al final de esta época del año comenzó el ingreso de agua dulce al SER debido al derretimiento nival que hace que los caudales del río Puelo y otros aumenten significativamente (Figura 4). Este cambio en la condición de la columna de agua provocó un

aumento de la estratificación (Figura 8 y Figura 9) lo que contribuyó a un desarrollo temprano de las comunidades de fitoplancton, como fue postulado por Pérez-Santos *et al.*, (2021). Sin embargo, este comportamiento en nutrientes y columna de agua no fueron registrado en la estación de la boca del fiordo Reloncaví y será discutido en la próxima sección.

Además de los cambios en abundancia de la comunidad de fitoplancton en la escala estacional, como se ha discutido previamente, se destacó una sucesión de especies que varió mes a mes. Durante noviembre y diciembre de 2018 y enero de 2019 se registró la presencia de *Rhizosolenia setigera*, mientras en febrero dominó *Navicula* spp. En agosto del 2019 fueron *Thalassiosira* spp. y *Thalassiosira* cf. *minúscula* fueron las especies más abundantes (Figura 26 y Figura 27.). Pérez-Santos *et al.*, (2021) reportó en este mismo lugar la ocurrencia de sucesión de especies debido a cambios en las características físico-químicas de la columna de agua. Los principales cambios estuvieron asociados a la profundización de la pycnoclina debido al debilitamiento de la estratificación por la disminución de los aportes de agua dulce.

Finalmente, la distribución similar de especies de la comunidad de fitoplancton en el SER respondió a las condiciones dominantes de los diferentes regímenes de vientos, corrientes, mareas, aportes de nutrientes, agua dulce y la biogeoquímica de las aguas de la Patagonia norte. Esta región se encuentra influenciada por el mismo sistema de vientos durante el otoño-invierno (sistema de bajas presiones atmosféricas) y la primavera-verano (sistema de altas presiones atmosféricas) (Aguirre *et al.* 2019; Pérez-Santos *et al.* 2019). Por otro lado, la conexión de las corrientes oceánicas con la circulación al interior de la Patagonia, contribuyen con la distribución y transporte de las masas de aguas y sus propiedades, ej., temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, y los nutrientes (Castillo *et al.* 2016; Strub *et al.* 2019; Pinilla *et al.* 2020). Este acoplamiento entre procesos atmosféricos, oceánicos y la dinámica oceanográfica en los fiordos y canales de la Patagonia norte justifica la distribución espacio-temporal de la comunidad de fitoplancton encontrada en esta tesis.

### Explicando diferencias espaciales en las abundancias de fitoplancton en el SER

Aunque el estudio de la distribución espacio-temporal de la comunidad de fitoplancton mostró un comportamiento similar en el SER, la estación ubicada en la boca del fiordo Reloncaví registro mayores abundancias de fitoplancton que la estación del centro de Seno. Para entender este comportamiento es importante tener en cuenta las condiciones oceanográficas del fiordo Reloncaví. Castillo *et al.*, (2012; 2016) estudiaron en detalle el régimen de circulación, mareas, vientos e hidrografía de este fiordo. En estos estudios se destacó que la circulación superficial tuvo una dirección promedio en sentido hacia la

boca del fiordo, conectando estas aguas con el Seno Reloncaví. Su origen se debe principalmente a la inclinación del gradiente de presión que se genera a lo largo del fiordo debido a la descarga constante de agua dulce proveniente principalmente del río Puelo, y con menores aportes desde los ríos Petrohue y Cochamó. Este patrón de circulación ha sido bien reproducido por los modelos numéricos desarrollados por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) para esta región de la Patagonia, destacando claramente la intensa circulación que fluye desde el fiordo Reloncaví hacia el Seno Reloncaví (Pinilla et al. 2020) como se observa en la Figura 12. A nivel superficial y subsuperficial, el agua que ingresa al Seno Reloncaví toma dirección principalmente hacia el sur la mayor parte del año, con excepción en verano. Giros anti-horarios en el centro del Seno Reloncaví con conexión intermitente con el Fiordo permite alta retención de material orgánico que llega y/o es producido en el SER.

La circulación superficial antes mencionada domina principalmente los 10 metros de la columna de agua, pero en ocasiones puede alcanzar los 30 metros. En esta capa de la columna de agua fue donde se registraron nuestras máximas abundancias de fitoplancton. Es de esperar entonces que la circulación superficial este ayudando a la advección de un mayor número de células de fitoplancton hacia el Seno Reloncaví sumándose a la población existente y por tanto incrementando la abundancia en la estación de la boca.

La turbulencia es uno de los factores que influencia la composición y abundancia fitoplanctónica. Así, el prodominio de las diatomeas sobre los demás grupos fitoplanctónicos, principalmente dinoflagelados, está influenciado por la dinámica de la circulación superficial registrados en SRb (Figura 12), puesto en los sectores con mayor velocidad e inestabilidad en la columna de agua, se registraron las mayores densidades de diatomeas. En este sentido, Lauria *et al.*, (1999), señalan que en ambientes altamente dinámicos y de gran turbulencia, las diatomeas responden de manera positiva incrementando significativamente sus tasas de crecimiento. Thomas & Gibson (1990a) demostraron que la turbulencia generada por el flujo mareal inhibe el crecimiento de los dinoflagelados. Lauria *et al.*, (1999) encontraron que los dinoflagelados responden positivamente a ambientes más estables y estratificados, en tanto, frente a ambientes turbulentos donde predominan las diatomeas tienen una respuesta negativa, lo cual repercute en las bajas tasas de crecimiento y malformaciones (Thomas & Gibson 1990b).

Otro proceso importante que puede estar contribuyendo al incremento de las abundancias de fitoplancton (ej., grupo diatomeas) en la estación FRb puede estar relacionado directamente con los aportes de sílice desde los ríos que desembocan en este fiordo. En esta estación se registraron altos valores de silicato en los primeros 10 metros de la columna de agua (máximos cercanos a 70  $\mu\text{M}$ ), principalmente

en la época de invierno (Figura 14). Muestréos biogeoquímicos en este fiordo de la Patagonia norte han detectado altas concentraciones de este nutriente inorgánico, alcanzándose valores absolutos entre 100-200  $\mu\text{M}$  (Torres et al. 2014; Yevenes et al. 2017; González et al. 2019). El silicato es uno de los nutrientes inorgánicos importantes en el crecimiento de las diatomeas, contribuyendo significativamente con los niveles de producción primaria reportados para esta zona de la Patagonia por Montero *et al.*, (2011).

Por último, postulamos que la alta estratificación de la columna de agua en este sitio (Figura 7 y Figura 9) favoreció junto a los procesos anteriormente descritos con las altas abundancias de fitoplancton. La estratificación del agua es un proceso clave en contribuir con la producción primaria posibilitando que las células del fitoplancton se mantengan en la zona fótica (Iriarte et al. 2017). En esta área los aportes de agua dulce, principalmente desde el río Puelo (Figura 4), contribuyen al incremento de la estabilidad de la columna de agua generando una intensa pycnoclina que confina al fitoplancton entre la superficie y los ~10 metros de la columna de agua. De hecho, en el Seno Magdalena, fiordo Puyuhuapi, la estratificación térmica de la columna de agua contribuyó con el inicio de una de las floraciones más altas de *Dinophysis acuta* a nivel global (Díaz et al., 2021).

En resumen, las corrientes marinas superficiales, el aporte de silice y la estratificación de la columna de agua fueron los procesos que favorecieron al mayor incremento del fitoplancton en la estación FRb en comparación con la estación SR. Sin embargo, es de esperar que otros procesos como la turbulencia y los eventos de mezcla vertical ayuden a generar un aumento en las abundancias de fitoplancton en el fiordo Reloncaví, pero se necesitan estudios con mayor resolución temporal (ej., ciclos de 24 horas y sinóptica) a la escala mensual utilizada en esta tesis.

### **Relación de los parámetros biogeoquímicos con la comunidad de fitoplancton y su contribución a la formación de la materia orgánica.**

La relación molar COP/NPT diferencia el fitoplancton (con valores de 6-10) de los detritos terrestres y no vivos (valores > 12) (Pocklington 1976) y de bacterioplancton (5-7) (Fukuda et al. 1998). En el SER la mayor producción de materia orgánica es de origen autóctono producto de la producción primaria generada a lo largo del año. La alta correlación positiva entre el COP y NPT asociada a la pendiente menor a la esperada propuesta por Redfield (6,6) (Redfield 1960) si toda la materia orgánica estuviera constituida por organismos fitoplanctónicos sugiere que, en parte la materia orgánica estaría compuesta por microorganismos (bacterioplancton). En el SER las bajas tasas de producción primaria reportadas previamente (Montero et al. 2011) se asociaron con una mayor contribución de células pequeñas a la

biomasa autótrofa, lo que destaca la importancia del plancton y las bacterias de tamaño pequeño para los ciclos de carbono y nitrógeno no solo durante los meses de invierno menos productivos si no que contribuyen activamente en los meses donde la producción primaria estaría soportada por el fitoplancton. El exceso de COP ( $3,3 \mu\text{moles.l}^{-1}$  o la degradación de NT), sugiere que al menos en invierno existe uso de fuentes alóctonas de carbono y nitrógeno por parte del bacterioplancton como fue postulado por Montero y colaboradores (2011). De hecho, cuando los niveles de producción primaria bruta son bajos la utilización de carbono bacteriano como porcentaje de la producción primaria bruta aumenta significativamente (>4100%).

Durante décadas se ha afirmado que los aportes terrestres no constituirían un aporte real a los sistemas acuáticos debido a la naturaleza refractaria de sus compuestos (principalmente de origen vegetal como ligninas y celulosas). Actualmente existe suficiente evidencia para afirmar que la materia orgánica alóctona ( $\text{MO}_{\text{aloc}}$ ) cumple un rol fundamental en ecosistemas acuáticos y en muchos casos puede ser mayor que la producción de materia orgánica autóctona ( $\text{MO}_{\text{aut}}$ ) (Rebolledo et al. 2011; Sepúlveda et al. 2011; González et al. 2019). Además, la  $\text{MO}_{\text{aloc}}$  no solo es remineralizada por parte de la comunidad bacteriana, sino que también es movilizada hacia otros niveles tróficos como invertebrados y vertebrados superiores (Lusseau & Wing 2006; McLeod & Wing 2007, 2009; Vargas et al. 2011).

### ***Relaciones entre macronutrientes en el SER***

La estructura vertical de la columna de agua (estratificada/mixta, modulada por los cambios estacionales e interanuales de la pycnoclina) puede afectar la biomasa y composición de los ensamblajes pelágicos y bentónicos. Los patrones espaciales y temporales de los flujos de carbono (la “bomba biológica”), y la dinámica de nutrientes se encuentran en delicado equilibrio biogeoquímico en esta gran región. En este sentido, el consumo, descomposición y reciclaje de la materia orgánica, resulta en un incremento de la relación carbono/nutrientes. Los nutrientes son removidos de los sistemas acuáticos a medida que las comunidades fitoplanctónicas se reproducen. Luego, cuando por algún efecto limitante dichas poblaciones disminuyen su concentración o mueren, la degradación y mineralización de la materia orgánica resultante permite que los iones retornen al sistema. De esa manera, los nutrientes entran en un ciclo continuo vinculado con diferentes procesos como la productividad secundaria (Libes 2009).

Además de la concentración y distribución de los nutrientes en el agua de mar, es importante la relación que existe entre ellos, tal como la proporción entre Nitrógeno:Fósforo:Sílice (N:P:Si). El fitoplancton, considerado el más abundante de los productores marinos, constituye una fuente dominante de materia orgánica, con una proporción de Nitrógeno/Fósforo de 16:1 (proporción Redfield C:N:P

106:16:1). Las desviaciones de estas proporciones pueden tener diferentes orígenes, una materia orgánica con una proporción diferente de N/P, procesos de remineralización distintos de los aeróbicos, y/o la presencia de nutrientes preformados que caracterizan una masa de agua y pueden acumularse durante su transporte (Libes 2009). En consecuencia, la proporción entre nutrientes es un indicador de procesos físicos y biogeoquímicos que están ocurriendo en el ambiente con implicancias en las comunidades fitoplanctónicas que se desarrollan (diatomeas versus dinoflagelados) y en la productividad del sistema. La proporción entre nutrientes indica que, entre fosfatos, nitrato y silicatos, los silicatos parecen ser el nutriente limitante para el crecimiento fitoplanctónico, especialmente para las diatomeas que lo requieren para la construcción y mantenimiento de su pared celular de silicato (frústulas). Los nitratos, presentan proporciones bajas con respecto a los fosfatos, lo cual evidencia no sólo la incorporación por fitoplancton sino además la existencia de una significativa remoción de nitratos en el ambiente. La correlación positiva entre sí de los tres nutrientes analizados (Tabla 6) permite evidenciar que, a pesar de las diferencias debidas a su origen y consumo, se encuentran acoplados a procesos conjuntos.

La relación ideal propuesta para N y P es de 16 (Redfield 1960), aunque las proporciones entre los datos de nitrato y fosfato fueron muy variables, en general el alejamiento de los valores establecidos por Redfield (Figura 16 a.) se deben a un déficit en nitratos producto del consumo para la producción primaria o a un exceso de fosfatos, quizás de origen antropogénico, que en consecuencia genera un déficit de un 68,5% para toda la región (Figura 16d). Sin embargo, todos estos valores siguieron la misma tendencia de estudios anteriores (Pérez-Santos et al. 2021). Iriarte y González (2008) señalaron la vulnerabilidad del ecosistema de fiordos en esta región y cómo la relación Redfield N:P (nitrógeno a fósforo) afecta la productividad primaria y, a su vez, la producción pesquera. Por otra parte, la estratificación del estuario también restringe la mezcla y el arrastre de nutrientes, lo que resulta una limitación de N disponible para la fotosíntesis (González et al. 2010). La relación N:P calculada de los nutrientes disueltos en esta tesis está en la mayoría de los casos, por debajo de la relación teórica de Redfield de 16, condición que prevalece en la mayoría de los fiordos patagónicos chilenos debido a una baja relación N/P (<10) en relación con la relación teórica (16:1) de Redfield (Iriarte et al. 2007), por lo que las relaciones de Redfield para sistemas de fiordos debería ser considerada, sobre todo en una región que es particularmente vulnerable al cambio climático y las influencias antropogénicas (Iriarte et al. 2010).

La relación Si/P de igual forma que la relación N/P estuvo por debajo de la relación de Redfield y se mantuvo entre valores de 1 a 10 (Figura 16 d). La relación Si/N fue muy similar a la relación de Redfield (Figura 16 c.), sin embargo, se puede observar que se hizo mínima principalmente en el SR y valores máximos fueron encontrados mayormente en el FRb (Figura 16 c.), donde la concentración de silicatos fue

en términos relativos mayor que en el Seno. A partir de esto, el valor observado fue en general inferior a 5. Una excepción de a estas relaciones se observa cuando existen pulsos de entradas de algunos nutrientes, para el caso del SER, los pulsos registrados de silicio provenientes de escorrentías cambian abruptamente las relaciones entre nutrientes, como se observa en el recuadro de la Figura 16 d.

### Dinámica de materia orgánica autóctona y alóctona en el SER

La labilidad de esta materia orgánica es también un factor muy importante y poco estudiado, a pesar de que estos aportes son los que subsidian la productividad local. El destino del MPS en sistemas estuarinos es un aspecto fundamental que depende de muchos factores, por ejemplo, de la corriente mareal, la descarga de los ríos, la batimetría, el gradiente de salinidad y las características propias de la MPS. La floculación de la MPS y por tanto su exportación a los sedimentos, incrementa con la cantidad y el contenido de materia orgánica (Eisma 1986). Es así como, durante los máximos de diatomeas, se incrementa el potencial de agregación, lo que está ligado a la capacidad de producción de exudados de mucopolisacáridos que aceleran la floculación de fitodetritus (Passow 2002; Engel et al. 2004).

En este estudio los end-members utilizados ( $\delta^{13}\text{C}$  -32,9 y -18,02) resultaron ser ligeramente más negativos en comparación a los empleandos en otros trabajos para toda la Patagonia chilena ( $\delta^{13}\text{C}$  -27,35 y -17,12, respectivamente) (González et al. 2019). Si bien el %C alóctono calculado para todas las muestras fue en promedio de un 44,9%, estos valores fueron menores a los reportados por Gónzález y colaboradores (2019) tanto en superficie (FR:62,3 %; SR: 51,8) como a nivel subsuperficial (FR:57,8 %; SR:61,8). La relación entre el % C<sub>org</sub> y el C/N fue positiva y significativa, mostrando que el aumento de la razón C/N se da principalmente por la contribución de la materia orgánica alóctona que sin embargo es producida en el SER (ver Figura 21.b) con valores más empobrecidos en  $^{13}\text{C}$  (Figura 21.c), esto estaría apoyado en parte por la débil relación no lineal entre  $\delta^{13}\text{C}$  C<sub>org</sub> y la clorofila (ver Figura 21.d) como proxy de biomasa fitoplanctónica.

En principio estos resultados obedecen a lo esperado, con una fuerte carga de carbono terrestre en el fiordo Reloncaví, el que es aportado principalmente por las descargas del río Puelo y secundariamente por los ríos Cochamó y Petrohué (González et al. 2010). Sin embargo, un aspecto interesante surge al analizar la relación entre la señal isotópica del carbono  $\delta\text{C}_{\text{org}}$  vs POC/Cl (g/g) (Figura 21.e) o su inversa en  $\mu\text{g}/\text{mg}$  (ver Figura 21.f). La relación POC/Cl (g/g) o su inversa en  $\mu\text{g}/\text{mg}$  a se puede utilizar como una herramienta potencial para rastrear las fuentes de la materia orgánica. Se utiliza para

diferenciar el fitoplancton vivo (<100, (Zeitzschel 1970)) o el POM dominado por fitoplancton incluido el bacterioplancton (<200, (Cifuentes et al. 1988)), mientras que las de fuentes terrestres y la biomasa heterótrofa tienden a ser mayor que 200 (>200,(Savoie et al. 2003)).

Desde el punto de vista de la teoría isotópica de que el POM recién producido es aquel que se compone del COP y  $^{12}\text{C}$  más abundante en la atmósfera (Liu et al. 2007). Es decir, que la mayor parte de POM se encuentra en agregados formados recientemente. En función de esto, y siguiendo a Cifuentes *et al.*,(1988) y Liu *et al.*,(2007) se consideró que las muestras con una relación Clorofila/COP superior a  $5 \mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$  contenían una alta fracción de POM recién producida:agregada. Las relaciones COP/Clorofila para este estudio tuvieron un amplio rango de variación, pero en promedio fueron <200 (promedio de 123,42) para el SER, con valores más altos principalmente en el SR en invierno en un 17,45% de los casos (Figura 21.e). Es interesante destacar que la mayoría de los valores >200 son los que predominan en la época invernal en el SR y unos pocos valores en época estival en FRb que coinciden con muestras subsuperficiales. La misma tendencia se observó al realizar la relación inversa (Figura 21.f). Estos valores extremos pueden estar asociada a eventos de escorrentía y precipitación que ingresaría más POM al sistema que sería aprovechado por bacterioplancton heterotrófico y microplacton heterótrofo y mixótrofo como fue postulado por Montero y colaboradores (2011).

Por otra parte, proporciones más bajas (<200 COP/clorofila o >5 clorofila/COP) para ambos sitios y durante todo el año fueron observados en mayoría, lo que indica que los materiales orgánicos marinos autóctonos jugaron un papel importante en el POM a lo largo del año y disminuye en invierno. El SER es un sistema altamente dinámico con muchas interacciones tierra-océano y en algunos de los end-member terrígenos empleados para modelos puede estar compuesto de POM recientemente producido, y sin embargo tener una señal isotópicamente más liviana, como se mostró en las relaciones presentadas, lo que significa que el POM es autóctono y, por lo tanto, podemos sugerir que el POM autóctono se puede consistir tanto de un end-member marino como terrígeno. También sugerimos que el POM recién producido puede estar compuesto por un end-member marino o terrígeno.

## CONCLUSIONES

1. La comunidad de fitoplancton en el SER no mostro diferencias espaciales para el periodo de estudio, sin embargo, la sucesión de especies registrada respondió a cambios temporales asociadas a las condiciones físico-químicas en la columna de agua.
2. El 90 % de las especies de fitoplancton estuvo representado por diatomeas y dinoflagelados, estos últimos presentaron la mayor diversidad de especies. Las mayores abundancias de la comunidad de fitoplancton fueron encontradas en la estación realizada en la boca del fiordo Reloncaví.
3. El comportamiento de la comunidad de fitoplancton en el SER son el resultado de condiciones similares de vientos, aportes de agua dulce, condición de la columna de agua y parámetros biogeoquímicos a que están expuestas las diferentes especies de fitoplancton en la Patagonia norte.
4. Las corrientes marinas superficiales, el aporte de sílice y la estratificación de la columna de agua fueron los procesos que favorecieron con el mayor incremento del fitoplancton en la estación realizada en la boca del fiordo Reloncaví.
5. La materia orgánica en SER tiene un componente mayormente autóctono, en parte de origen fitoplanctónico, pero también probablemente de origen microbiano. Es retenida por giros antihorarios, por lo que es reminerlizada y tiene una señal isotópica empobrecida en carbono.
6. El SER es un ecosistema complejo con altas interacciones tierra-oceano y en condiciones hidroclimáticas cambiantes pueden alterar el equilibrio de los ciclos biogeoquímicos, la disponibilidad de nutrientes y como consecuencia diversidad de especies planctónicas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acha, E.M., Mianzan, H.W., Guerrero, R.A., Favero, M., Bava, J. (2004). Marine fronts at the continental shelves of austral South America. *Journal of Marine Systems* 44(1-2): 83-105. DOI: 10/cm2hqk.
- Aguirre, C., Rojas, M., Garreaud, R.D., Rahn, D.A. (2019). Role of synoptic activity on projected changes in upwelling-favourable winds at the ocean's eastern boundaries. *npj Climate and Atmospheric Science* 2(1): 44. DOI: 10.1038/s41612-019-0101-9.
- Alves-de-Souza, C., Gonzalez, M.T., Iriarte, J.L. (2008). Functional groups in marine phytoplankton assemblages dominated by diatoms in fjords of southern Chile. *Journal of Plankton Research* 30(11): 1233-1243. DOI: 10/dg6nmj.
- Bianchi, T.S., Arndt, S., Austin, W.E.N., Benn, D.I., Bertrand, S., Cui, X., Faust, J.C., Kozirowska-Makuch, K., Moy, C.M., Savage, C., Smeaton, C., Smith, R.W., Syvitski, J. (2020). Fjords as Aquatic Critical Zones (ACZs). *Earth-Science Reviews* 203: 103145. DOI: 10/gg5jr8.
- Cabello, F.C., Godfrey, H.P. (2016). Florecimiento de algas nocivas (FANs), ecosistemas marinos y la salud humana en la Patagonia chilena. *Revista chilena de infectología* 33(5): 559-560. DOI: 10/gg9pkf.
- Cáceres, M., Valle-Levinson, A. (2010). Variabilidad transversal del flujo y salinidad en paso Nao. *Cienc. Technol. Mar*, 33: 14.
- Castillo, M.I. (2012). Circulación y mezcla en el fiordo Reloncaví. Doctorado en Oceanografía. Universidad de Concepción, Concepción. 91 pp. URL: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.4675.7369>.
- Castillo, M.I., Cifuentes, U., Pizarro, O., Djurfeldt, L., Cáceres, M. (2016). Seasonal hydrography and surface outflow in a fjord with a deep sill: the Reloncaví fjord, Chile. *Ocean Science* 12(2): 533-544. DOI: 10.5194/os-12-533-2016.
- Cifuentes, L.A., Sharp, J.H., Fogel, M.L. (1988). Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary: Carbon and nitrogen isotopes. *Limnology and Oceanography* 33(5): 1102-1115. DOI: 10.4319/lo.1988.33.5.1102.
- Clapperton, C.M. (1994). The quaternary glaciation of Chile: a review. *Revista Chilena de Historia Natural* 67: 15.
- Clarke, K.R., Tweedley, J.R., Valesini, F.J. (2014). Simple shade plots aid better long-term choices of data pre-treatment in multivariate assemblage studies. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 94(1): 1-16. DOI: 10.1017/S0025315413001227.
- Cuevas, L.A., Tapia, F.J., Iriarte, J.L., González, H.E., Silva, N., Vargas, C.A. (2019). Interplay between freshwater discharge and oceanic waters modulates phytoplankton size-structure in fjords and channel systems of the Chilean Patagonia. *Progress in Oceanography* 173: 103-113. DOI: 10/gg44gn.

- Cursach, J.A., Rau, J.R. (2008). Influencia de las perturbaciones humanas sobre la diversidad del ensamble de aves costeras en el Seno de Reloncaví, sur de Chile. *Boletín Chileno de Ornitología* 14(2): 92-97.
- Daneri, G. (2007). Evaluación de la capacidad de carga del Estuario Reloncaví, X Región. Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP).
- Díaz, P.A., Molinet, C., Seguel, M., Díaz, M., Labra, G., Figueroa, R.I. (2018). Species diversity and abundance of dinoflagellate resting cysts seven months after a bloom of *Alexandrium catenella* in two contrasting coastal systems of the Chilean Inland Sea. *European Journal of Phycology*. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09670262.2018.1455111>.
- Eisma, D. (1986). Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research* 20(2-3): 183-199. DOI: 10.1016/0077-7579(86)90041-4.
- Engel, A., Thoms, S., Riebesell, U., Rochelle-Newall, E., Zondervan, I. (2004). Polysaccharide aggregation as a potential sink of marine dissolved organic carbon. *Nature* 428(6986): 929-932. DOI: 10.1038/nature02453.
- Escribano, R., Castro, L. (2004). Plancton y productividad. En: *Biología marina y oceanografía: conceptos y procesos* (pp. 499-518). Trama Impresores S.A., Concepción. URL: <https://isbn.cloud/9789568436001/biologia-marina-y-oceanografia-conceptos-y-procesos/>.
- FAO (2018). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018. Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible. FOOD & AGRICULTURE ORG, Roma.
- FAO (2020). El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción. FOOD & AGRICULTURE ORG, Roma.
- Freeland, H.J., Farmer, D.M., Levings, C.D., Eds. (1980). *Fjord Oceanography*. Springer Science & Business Media, New York, NY. URL: [https://books.google.com/books/about/Fjord\\_Oceanography.html?hl=es&id=SCXnBwAAQBAJ](https://books.google.com/books/about/Fjord_Oceanography.html?hl=es&id=SCXnBwAAQBAJ).
- Fry, B., Sherr, E.B. (1989a).  $\delta_{13}\text{C}$  Measurements as Indicators of Carbon Flow in Marine and Freshwater Ecosystems. En: *Stable Isotopes in Ecological Research Vol. 68* (pp. 196-229). Springer-Verlag. URL: [http://link-springer-com/chapter/10.1007/978-1-4612-3498-2\\_12](http://link-springer-com/chapter/10.1007/978-1-4612-3498-2_12).
- Fry, B., Sherr, E.B. (1989b).  $\delta_{13}\text{C}$  Measurements as Indicators of Carbon Flow in Marine and Freshwater Ecosystems. En: Rundel, P.W., Ehleringer, J.R., Nagy, K.A. (Eds.) *Stable Isotopes in Ecological Research Vol. 68* (pp. 196-229). Springer New York, New York, NY. DOI: 10.1007/978-1-4612-3498-2\_12.
- Fuhrman, J. (1992). Bacterioplankton roles in cycling of organic matter: the microbial food web. En: *Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea Vol. 43* (p. 361). Springer US, Boston, MA. DOI: 10.1007/978-1-4899-0762-2.
- Fukuda, R., Ogawa, H., Nagata, T., Koike, I. (1998). Direct Determination of Carbon and Nitrogen Contents of Natural Bacterial Assemblages in Marine Environments. *Applied and Environmental Microbiology* 64(9): 3352-3358. DOI: 10.1128/AEM.64.9.3352-3358.1998.

- González, H., Calderón, M., Castro, L., Clement, A., Cuevas, L., Daneri, G., Iriarte, J., Lizárraga, L., Martínez, R., Menschel, E., Silva, N., Carrasco, C., Valenzuela, C., Vargas, C., Molinet, C. (2010). Primary production and plankton dynamics in the Reloncaví Fjord and the Interior Sea of Chiloé, Northern Patagonia, Chile. *Marine Ecology Progress Series* 402: 13-30. DOI: 10/cbkrqb.
- González, H.E., Castro, L., Daneri, G., Iriarte, J.L., Silva, N., Vargas, C.A., Giesecke, R., Sánchez, N. (2011). Seasonal plankton variability in Chilean Patagonia fjords: Carbon flow through the pelagic food web of Aysen Fjord and plankton dynamics in the Moraleda Channel basin. *Continental Shelf Research* 31(3-4): 225-243. DOI: 10.1016/j.csr.2010.08.010.
- González, H.E., Nimptsch, J., Giesecke, R., Silva, N. (2019). Organic matter distribution, composition and its possible fate in the Chilean North-Patagonian estuarine system. *Science of The Total Environment* 657: 1419-1431. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.445.
- Haralambidou, K., Sylaios, G., Tsihrintzis, V.A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean microtidal river mouth. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 90(4): 174-184. DOI: 10.1016/j.ecss.2010.08.010.
- Holm-Hansen, O., Riemann, B. (1978). Chlorophyll a Determination: Improvements in Methodology. *Oikos* 30(3): 438. DOI: 10/cxr4nd.
- Huovinen, P., Ramírez, J., Gómez, I. (2016). Underwater Optics in Sub-Antarctic and Antarctic Coastal Ecosystems. Ban, S. (Ed.) *PLOS ONE* 11(5): e0154887. DOI: 10.1371/journal.pone.0154887.
- IFOP (2020). Marea Roja | Proyecto monitoreo marea roja IFOP. 2020. URL: <https://www.ifop.cl/marearaja/>. Accedido: 5 septiembre 2020.
- IOC, SCOR, IAPSO (2010). The international thermodynamic equation of seawater - 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. UNESCO. 196 pp. URL: <http://www.teos-10.org/>.
- Iriarte, J., León-Muñoz, J., Marcé, R., Clément, A., Lara, C. (2017). Influence of seasonal freshwater streamflow regimes on phytoplankton blooms in a Patagonian fjord. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 51(2): 304-315. DOI: 10/gg7vqj.
- Iriarte, J.L., Gonzalez, H.E. (2008). Phytoplankton bloom ecology of the inner sea of chiloé, southern chile. En: *Nova Hedwigia* (pp. 67-79). GEBRUDER BORNTAEGER, Beiheft. URL: <http://repositorio.conicyt.cl/handle/10533/139283>.
- Iriarte, J.L., González, H.E., Liu, K.K., Rivas, C., Valenzuela, C. (2007). Spatial and temporal variability of chlorophyll and primary productivity in surface waters of southern Chile (41.5–43° S). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74(3): 471-480. DOI: 10/dcw63v.
- Iriarte, J.L., González, H.E., Nahuelhual, L. (2010). Patagonian Fjord Ecosystems in Southern Chile as a Highly Vulnerable Region: Problems and Needs. *AMBIO* 39(7): 463-466. DOI: 10.1007/s13280-010-0049-9.
- Irwin, A.J., Finkel, Z.V., Müller-Karger, F.E., Ghinaglia, L.T. (2015). Phytoplankton adapt to changing ocean environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112(18): 5762-5766. DOI: 10/gg9s26.

- Iturria, A. (2020). Caracterización de la influencia estuarina en el Seno de Reloncaví en Chile Austral y su relación hidrolimática. Magister en Medio Ambiente. Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción. 66 pp.
- Kattner, G. (1999). Storage of dissolved inorganic nutrients in seawater: poisoning with mercuric chloride. *Marine Chemistry* 67(1-2): 61-66. DOI: 10/cr5x6m.
- Kattner, G., Becker, H. (1991). Nutrients and organic nitrogenous compounds in the marginal ice zone of the Fram Strait. *Journal of Marine Systems* 2(3-4): 385-394. DOI: 10/bht9rt.
- Labbe Ibanez, P., Iriarte, J.L., Pantoja, S. (2015). Respuesta del microfitoplancton a la adición de nitrato y ácido silícico en fiordos de la Patagonia chilena. *Latin American Journal of Aquatic Research* 43(1): 80-93. DOI: 10/gg422s.
- Lara, A., Villalba, R., Urrutia, R. (2008). A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer–fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change* 86(3-4): 331-356. DOI: 10.1007/s10584-007-9287-7.
- Lara, C., Cazelles, B., Saldías, G.S., Flores, R.P., Paredes, Á.L., Broitman, B.R. (2019). Coupled Biospheric Synchrony of the Coastal Temperate Ecosystem in Northern Patagonia: A Remote Sensing Analysis. *Remote Sensing* 11(18): 2092. DOI: 10.3390/rs11182092.
- Lauria, M.L., Purdie, D.A., Sharples, J. (1999). Contrasting phytoplankton distributions controlled by tidal turbulence in an estuary. *Journal of Marine Systems* 21(1-4): 189-197. DOI: 10.1016/S0924-7963(99)00013-5.
- León-Muñoz, J., Marcé, R., Iriarte, J. (2013). Influence of hydrological regime of an Andean river on salinity, temperature and oxygen in a Patagonia fjord, Chile. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 47(4): 515-528. DOI: 10.1080/00288330.2013.802700.
- Letelier, J., Soto-Mardones, L., Salinas, S., Osuna, P., López, D., Sepúlveda, H.H., Pinilla, E., Rodrigo, C. (2011). Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región norte de los fiordos Patagónicos de Chile. *Revista de biología marina y oceanografía* 46(3): 363-377. DOI: 10/gg48c5.
- Libes, S. (2009). Introduction to marine biogeochemistry. Second Edition. Elsevier Inc., USA. 909 pp.
- Liu, K.-K., Kao, S.-J., Wen, L.-S., Chen, K.-L. (2007). Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter and biogeochemical processes in the eutrophic Danshuei Estuary in northern Taiwan. *Science of The Total Environment* 382(1): 103-120. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.04.019.
- Lusseau, S., Wing, S. (2006). Importance of local production versus pelagic subsidies in the diet of an isolated population of bottlenose dolphins *Tursiops* sp. *Marine Ecology Progress Series* 321: 283-293. DOI: 10.3354/meps321283.
- McLeod, R.J., Wing, S.R. (2007). Hagfish in the New Zealand fjords are supported by chemoautotrophy of forest carbon. *Ecology* 88(4): 809-816. DOI: 10.1890/06-1342.

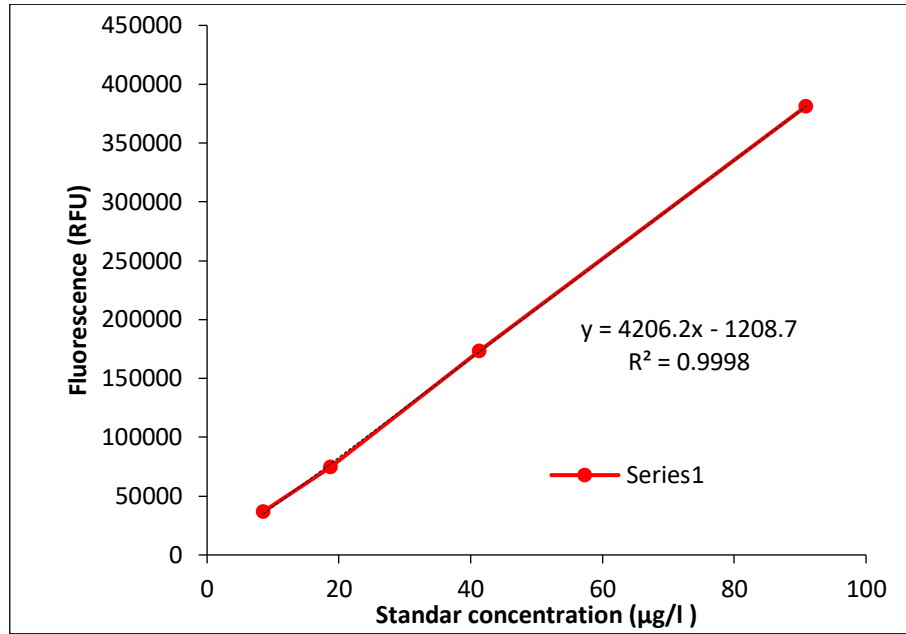
- McLeod, R.J., Wing, S.R. (2009). Strong pathways for incorporation of terrestrially derived organic matter into benthic communities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 82(4): 645-653. DOI: 10.1016/j.ecss.2009.02.025.
- McLusky, D.S., Elliott, M. (2004). *The Estuarine Ecosystem*. Oxford University Press. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198525080.001.0001.
- Mitra, A., Zaman, S. (2016). *Basics of marine and estuarine ecology*. URL: <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4388674>.
- Montero, P., Daneri, G., González, H.E., Iriarte, J.L., Tapia, F.J., Lizárraga, L., Sanchez, N., Pizarro, O. (2011). Seasonal variability of primary production in a fjord ecosystem of the Chilean Patagonia: Implications for the transfer of carbon within pelagic food webs. *Continental Shelf Research* 31(3-4): 202-215. DOI: 10/b3cprk.
- Montero, P., Pérez-Santos, I., Daneri, G., Gutiérrez, M.H., Igor, G., Seguel, R., Purdie, D., Crawford, D.W. (2017). A winter dinoflagellate bloom drives high rates of primary production in a Patagonian fjord ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 199: 105-116. DOI: 10.1016/j.ecss.2017.09.027.
- Muñoz, A.A., González-Reyes, A., Lara, A., Sauchyn, D., Christie, D., Puchi, P., Urrutia-Jalabert, R., Toledo-Guerrero, I., Aguilera-Betti, I., Mundo, I., Sheppard, P.R., Stahle, D., Villalba, R., Szejner, P., LeQuesne, C., Vanstone, J. (2016). Streamflow variability in the Chilean Temperate-Mediterranean climate transition (35°S–42°S) during the last 400 years inferred from tree-ring records. *Climate Dynamics* 47(12): 4051-4066. DOI: 10.1007/s00382-016-3068-9.
- Passow, U. (2002). Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments. *Progress in Oceanography* 55(3-4): 287-333. DOI: 10.1016/S0079-6611(02)00138-6.
- Pérez-Santos, I., Seguel, R., Schneider, W., Linford, P., Donoso, D., Navarro, E., Amaya-Cárcamo, C., Pinilla, E., Daneri, G. (2019). Synoptic-scale variability of surface winds and ocean response to atmospheric forcing in the eastern austral Pacific Ocean. *Ocean Science* 15(5): 1247-1266. DOI: 10.5194/os-15-1247-2019.
- Pérez-Santos, I., Díaz, P.A., Silva, N., Garreaud, R., Montero, P., Henríquez-Castillo, C., Barrera, F., Linford, P., Amaya, C., Contreras, S., Aracena, C., Pinilla, E., Altamirano, R., Vallejos, L., Pavez, J., Maulen, J. (2021). Oceanography time series reveals annual asynchrony input between oceanic and estuarine waters in Patagonian fjords. *Science of The Total Environment* 798: 149241. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149241.
- Perillo, G.M.E. (1995). Chapter 2 Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries. En: *Developments in Sedimentology* Vol. 53 (pp. 17-47). Elsevier. DOI: 10.1016/S0070-4571(05)80022-6.
- Pickard, G.L. (1971). Some Physical Oceanographic Features of Inlets of Chile. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 28(8): 1077-1106. DOI: 10/d8kqdb.
- Pinilla, E., Castillo, M.I., Pérez-Santos, I., Venegas, O., Valle-Levinson, A. (2020). Water age variability in a Patagonian fjord. *Journal of Marine Systems* 210: 103376. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2020.103376.

- Plata, L., Filonov, a (2007). Internal tide in the northwestern part of Banderas Bay, Mexico. *Ciencias Marinas* 33(2): 197-215. DOI: 10/gg5zdx.
- Pocklington, R. (1976). Terrigenous Organic Matter in Surface Sediments from the Gulf of St. Lawrence. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 33(1): 93-97. DOI: 10.1139/f76-011.
- Rebolledo, L., González, H.E., Muñoz, P., Iriarte, J.L., Lange, C.B., Pantoja, S., Salamanca, M. (2011). Siliceous productivity changes in Gulf of Ancud sediments (42°S, 72°W), southern Chile, over the last ~150 years. *Continental Shelf Research* 31(3-4): 356-365. DOI: 10/dts3xf.
- Redfield (1960). The biological control of chemical factors in the environment. *Science Progress* 11: 150-170.
- Sapiano, M.R.P., Brown, C.W., Schollaert Uz, S., Vargas, M. (2012). Establishing a global climatology of marine phytoplankton phenological characteristics: phytoplankton phenology characteristics. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 117(C8): n/a-n/a. DOI: 10/gg8hd6.
- Sar, E.A., Ferrario, M.E., Reguera, B. (2002). *Floraciones Algales Nocivas en el cono Sur Americano*. Instituto Español de Oceanografía. Madrid. 303 pp.
- Sarmiento, J.L., Sundquist, E.T. (1992). Revised budget for the oceanic uptake of anthropogenic carbon dioxide. *Nature* 356(6370): 589-593. DOI: 10/fhj8f7.
- Sauter, T. (2020). Revisiting extreme precipitation amounts over southern South America and implications for the Patagonian Icefields. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(4): 2003-2016. DOI: 10.5194/hess-24-2003-2020.
- Savoie, N., Aminot, A., Tréguer, P., Fontugne, M., Naudet, N., Kérouel, R. (2003). Dynamics of particulate organic matter d15N and d13C during spring phytoplankton blooms in a macrotidal ecosystem (Bay of Seine, France). *Marine Ecology Progress Series* 255: 27-41. DOI: 10.3354/meps255027.
- Schlitzer, R. (2020). ODV: Data. Ocean Data View. 2020. URL: <https://odv.awi.de/data/>. Accedido: 24 julio 2020.
- Sellner, K.G., Doucette, G.J., Kirkpatrick, G.J. (2003). Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 30(7): 383-406. DOI: 10/ffsrdd.
- Sepúlveda, J., Pantoja, S., Huguen, K.A. (2011). Sources and distribution of organic matter in northern Patagonia fjords, Chile (~44–47°S): A multi-tracer approach for carbon cycling assessment. *Continental Shelf Research* 31(3-4): 315-329. DOI: 10/fn9v35.
- SERNAPESCA (2019). *Anuarios Estadísticos de Pesca y Acuicultura*. Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, Valparaíso. URL: <http://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura>. Accedido: .
- SERNAPESCA (2020). Programa *Alexandrium catenella* | Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. 2020. URL: <http://www.sernapesca.cl/programas/programa-alexandrium-catenella>. Accedido: 5 septiembre 2020.

- Sievers, H.A., Silva, N. (2006). Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. En: Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. (pp. 53-58). Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- Sievers, H.A., Calvete, C., Silva, N. (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. *Revista Ciencia y Tecnología del Mar* 25(2): 17-43.
- Sigman, D.M., Hain, M.P. (2012). The Biological Productivity of the Ocean. *nature Education* 3(6): 17.
- Silva, N., Palma, S. (2008). The CIMAR Program in the austral Chilean channels and fjords. En: Progress in the oceanographic knowledge of Chilean interior waters, from Puerto Montt to Cape Horn (pp. 11-15). Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso.
- Silva, N., Sievers, H.A., Prado, R. (1995). Características oceanográficas y una proposición de circulación , para algunos canales australes de Chile entre 41 ° 20' sur y 46 ° 40' sur. *Revista de biología marina* 30: 207-254.
- Silva, N., Rojas, N., Fedele, A. (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 Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56(16): 1004-1020. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.12.013.
- Soto-Mardones, L., Letelier, J., Salinas, S., Pinillas, E., Belmar, J.P. (2009). Analisis de parametros oceanograficos y atmosfericos del Seno de Reloncavi. *Gayana (Concepción)* 73(1):. DOI: 10/bm8g5m.
- Strub, P.T., James, C., Montecino, V., Rutllant, J.A., Blanco, J.L. (2019). Ocean circulation along the southern Chile transition region (38°–46°S): Mean, seasonal and interannual variability, with a focus on 2014–2016. *Progress in Oceanography* 172: 159-198. DOI: 10.1016/j.pocean.2019.01.004.
- Syvitski, J.P., Burrell, D.C., Skei, J.M. (1987). *Fjords: Processes and Products*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Thomas, W.H., Gibson, C.H. (1990a). Effects of small-scale turbulence on microalgae. *Journal of Applied Phycology* 2(1): 71-77. DOI: 10.1007/BF02179771.
- Thomas, W.H., Gibson, C.H. (1990b). Quantified small-scale turbulence inhibits a red tide dinoflagellate, *Gonyaulax polyedra* Stein. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 37(10): 1583-1593. DOI: 10.1016/0198-0149(90)90063-2.
- Torres, R., Silva, N., Reid, B., Frangopulos, M. (2014). Silicic acid enrichment of subantarctic surface water from continental inputs along the Patagonian archipelago interior sea (41–56°S). *Progress in Oceanography* 129: 50-61. DOI: 10.1016/j.pocean.2014.09.008.
- Utermöhl, H. (1958). Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik: Mit 1 Tabelle und 15 abbildungen im Text und auf 1 Tafel. *SIL Communications*, 1953-1996 9(1): 1-38. DOI: 10/gf4m72.

- Valle-Levinson, A., Sarkar, N., Sanay, R., Soto, D., León, J. (2007). Spatial structure of hydrography and flow in a Chilean fjord, Estuario Reloncaví. *Estuaries and Coasts* 30(1): 113-126. DOI: 10/gg47tb.
- Vargas, C.A., Martinez, R.A., San Martin, V., Aguayo, M., Silva, N., Torres, R. (2011). Allochthonous subsidies of organic matter across a lake–river–fjord landscape in the Chilean Patagonia: Implications for marine zooplankton in inner fjord areas. *Continental Shelf Research* 31(3-4): 187-201. DOI: 10/dzvrvv.
- Verardo, D.J., Froelich, P.N., McIntyre, A. (1990). Determination of organic carbon and nitrogen in marine sediments using the Carlo Erba NA-1500 analyzer. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 37(1): 157-165. DOI: 10/bzsh5z.
- Yevenes, M.A., Bello, E., Sanhueza-Guevara, S., Farías, L. (2017). Spatial Distribution of Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O) in the Reloncaví Estuary–Sound and Adjacent Sea (41°–43° S), Chilean Patagonia. *Estuaries and Coasts* 40(3): 807-821. DOI: 10/f94zwb.
- Zeitzschel, B. (1970). The quantity, composition and distribution of suspended particulate matter in the Gulf of California. *Marine Biology* 7(4): 305-318. DOI: 10.1007/BF00750823.

## ANEXO 1: [CORRELACIÓN CON LOS VALORES DE CL-A IN-SITU Y LA FLUORESCENCIA]



Anexo 1 . Calibración de la curva de Cl-a a partir de la fluorescencia.

## ANEXO 2: [LISTADO CUALITATIVO DE ESPECIES EN EL SER]

	FRb		SR		Nocivas
	Estival	Invernal	Estival	Invernal	
<b>DIATOMEA</b>					
<i>Actinoptychus senarius</i>				X	
<i>Asterionella formosa</i>		X			
<i>Amphiprora cf. gigantea</i>	X				
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	X		X		
<i>Cerataulina pelagica</i>	X				
<i>Chaetoceros compressus</i>	X				
<i>Chaetoceros convolutus</i>	X			X	
<i>Chaetoceros decipiens</i>		X			
<i>Chaetoceros diadema</i>	X				
<i>Chaetoceros didymus</i>	X		X	X	
<i>Chaetoceros radicans</i>	X			X	
<i>Chaetoceros sp. 1</i>		X			
<i>Chaetoceros spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Corethron pennatum</i>	X		X	X	
<i>Coscinodiscus cf. radiatus</i>	X		X		
<i>Coscinodiscus granii</i>		X			
<i>Coscinodiscus spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Coscinodiscus sp. 2</i>		X			
<i>Cylindrotheca closterium</i>	X	X	X	X	
<i>Dactyliosolen fragilissimus</i>	X	X	X	X	
<i>Detonula pumila</i>		X			
<i>Diploneis subovalis</i>			X		
<i>Ditylum brightwellii</i>	X	X	X	X	*
<i>Eucampia cornuta</i>	X		X	X	
<i>Eucampia zodiacus</i>	X	X	X	X	*
<i>Fragilaria crotonensis</i>		X			
<i>Grammatophora marina</i>	X	X			
<i>Guinardia delicatula</i>	X	X	X	X	
<i>Guinardia striata</i>				X	
<i>Leptocylindrus danicus</i>	X			X	*
<i>Leptocylindrus mediterraneus</i>			X	X	
<i>Leptocylindrus minimus</i>	X	X	X		*
<i>Licmophora abbreviata</i>	X				
<i>Melosira nummuloides</i>		X			
<i>Melosira varians</i>		X			
<i>Melosira spp.</i>		X			
<i>Navicula ammophila</i>	X		X		
<i>Navicula spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Paralia sulcata</i>	X				
<i>Pinnularia spp.</i>			X		
<i>Pleurosigma directum</i>	X	X	X	X	
<i>Pleurosigma normanii</i>				X	

<i>Pseudo-nitzschia cf. australis</i>	X	X		X	**
<i>Pseudo-nitzschia cf. pseudodelicatissima</i>	X	X	X		
<i>Pseudo-nitzschia spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Rhizosolenia imbricata</i>	X			X	
<i>Rhizosolenia setigera</i>	X	X	X	X	*
<i>Rhizosolenia styliformis</i>	X		X		*
<i>Rhizosolenia cf. pungens</i>	X	X	X	X	
<i>Skeletonema spp.</i>	X	X		X	*
<i>Stauroneis spp.</i>				X	
<i>Stephanopyxis cf. nipponica</i>	X	X		X	
<i>Stephanopyxis spp.</i>		X		X	
<i>Tabellaria cf. quadrisepata</i>	X	X			
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	X	X	X	X	
<i>Thalassiosira rotula</i>	X	X	X	X	
<i>Thalassiosira cf. aestivalis</i>		X	X	X	
<i>Thalassiosira cf. decipiens</i>	X				
<i>Thalassiosira cf. eccentrica</i>	X	X			
<i>Thalassiosira cf. minuscula</i>	X	X	X	X	
<i>Thalassiosira spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Diatomeas céntrica indet.</i>	X	X		X	
<i>Diatomeas pennadas indet.</i>	X	X	X	X	

---

#### DINOFLAGELADOS

<i>Alexandrium ostenfeldii</i>		X			
<i>Amphidinium spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Amylax triacantha</i>		X			
<i>Cochlodinium spp.</i>				X	
<i>Corythodinium spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Dinophysis acuminata</i>	X	X	X	X	**
<i>Dinophysis acuta</i>			X		
<i>Dinophysis spp.</i>	X	X		X	**
<i>Diplopelta spp.</i>	X				
<i>Gonyaulax spinifera</i>	X		X		
<i>Gonyaulax spp.</i>		X	X	X	
<i>Gyrodinium spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Heterocapsa spp.</i>	X		X		
<i>Oxytoxum spp.</i>	X	X	X	X	
<i>Peridiniella cf. sphaeroidea</i>				X	
<i>Phalacroma rotundatum</i>	X		X		
<i>Phalacroma spp.</i>		X		X	
<i>Polykrikos spp.</i>		X	X		
<i>Preperidinium meunieri</i>	X	X		X	
<i>Protoceratium reticulatum</i>	X				**
<i>Protooperidinium aspidiotum</i>	X	X	X		
<i>Protooperidinium claudicans</i>	X				
<i>Protooperidinium crassipes</i>				X	
<i>Protooperidinium conicum</i>			X		
<i>Protooperidinium denticulatum</i>		X		X	
<i>Protooperidinium excentricum</i>	X			X	
<i>Protooperidinium oceanicum</i>	X		X		
<i>Protooperidinium ovatum</i>		X		X	

<i>Protooperidinium pentagonum</i>			X	
<i>Protooperidinium cf. bipes</i>	X	X		X
<i>Protooperidinium cf. depressum</i>			X	
<i>Protooperidinium cf. grani</i>	X			
<i>Protooperidinium cf. obtusum</i>	X	X		X
<i>Protooperidinium cf. pallidum</i>			X	X
<i>Protooperidinium cf. pellucidum</i>	X	X	X	X
<i>Protooperidinium cf. steinii</i>	X	X	X	X
<i>Protooperidinium spp.</i>	X	X	X	X
<i>Pyrocystis lunula</i>	X		X	
<i>Pyrophacus horologium</i>			X	
<i>Scrippsiella trochoidea</i>			X	
<i>Scrippsiella spp.</i>	X		X	
<i>Tripos fusus</i>	X		X	
<i>Tripos horridus</i>			X	
<i>Tripos lineatus</i>			X	
<i>Dinoflagelados atecados indet.</i>	X	X	X	X
<i>Dinoflagelados tecados indet.</i>	X	X	X	X
<b>SILICOFLAGELADOS</b>				
<i>Dictyocha speculum</i>	X	X	X	*
<b>ZOOMASTIGOFOROS</b>				
<i>Ebria tripartita</i>	X	X	X	
<b>CILIADOS</b>				
<i>Laboea strobila</i>	X	X		X
<i>Mesodinium rubrum</i>	X	X	X	X
<b>EUGLENOFÍCEAS</b>				
<i>Euglena spp.</i>	X	X	X	X

Anexo 2. Listado de especies fitoplanctónicas detectadas en muestras de red (0 – 30 m) colectadas en el Sistema Estuarino Reloncaví. En la columna nociva se muestran las especies \*\* Tóxicas y las potencialmente \* Nocivas