

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y GEOGRAFÍA  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR  
VALPARAÍSO, CHILE

Condiciones biogeoquímicas alrededor de un cultivo off-shore piloto de *Seriola lalandi* en la bahía Flamenco, Chañaral, Chile.

Trabajo de titulación para optar al Título de Oceanógrafo

Constanza Hernández Urbano

Valparaíso

2017

## **Comisión de titulación**

Profesor Guía: Dra. Marcela Cornejo D'Ottone

Profesor: Felipe Hurtado Ferreira

Profesor: Guido Plaza Pasten

### **AUTORIZACIÓN DE USO**

Al presentar este Trabajo de Titulación como último requisito para la obtención del título de Oceanógrafo, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de este documento sólo con fines académicos.

---

Constanza Hernández Urbano

## **DEDICATORIA**

Para Mercedes y Baltazar, mis padres

Los amo profundamente

## AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, quiero agradecer a mis padres Mercedes y Baltazar por demostrarme su amor y apoyo incondicional durante toda mi vida, sin ellos el camino hubiese sido más difícil y sin duda alguna a mi hermosa abuelita Audencia que desde el cielo sé que me manda toda su energía para que siga día a día. A mi hermano que, aunque no nos llevemos bien a veces siempre está para mí, y obviamente a mis hijos animales: Gordo, Marley, Bella, Rusio y el último integrante Alf, por darme tanto amor. También a José por ser parte de mi familia y quererme tal cual soy.

Agradecer a mi profesora guía Marcela Cornejo por acogerme, orientarme, apoyarme y en resumidas cuentas ser a todo terreno, pero principalmente por creer en mi cuando ni yo misma lo hacía, sin ella este trabajo no sería lo mismo, millón billón y trillón de gracias. También agradecer a los profesores de la comisión Felipe Hurtado, por su buen sentido del humor y orientación, y al profesor Guido Plaza, por sumarse a esta aventura. Además, agradecer los consejos y críticas de los profesores pertenecientes al curso de seminario de titulación. Además con un enorme cariño agradecer a Jaime Orellana, profesor y amigo, por convencerme y siempre darme ánimos.

Por otra parte, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis amigas Victoria y Daniela por siempre estar en los mejores y peores momentos y fundamentalmente por soportarme cuando ni yo misma puedo hacerlo, las adoro hoy y siempre. También a Andrea por el apoyo mutuo, las buenas conversaciones, la buena comida, permitirme jugar con Tritón y sobre todo la paciencia. A mis amigos de la universidad Tomás, Katherine, Javiera, Valerie, Nicole, Darinka, Constanza, Gabriela, Úrsula, Barbra, Sebastián, entre otros y al que no nombre o se me olvido también le agradezco desde el fondo de mi corazón.

Quiero además expresar mis agradecimientos a Francisco Gallardo por apoyarme y soportarme en terreno, y a Paola Reinoso por realizar los análisis correspondientes. Y a mis compañeros del Laboratorio de Oceanografía física, quienes siempre estuvieron dispuestos a ayudarme.

Finalmente, agradecer a todos ser de luz que siempre me ha apoyado de una u otra forma. Gracias a todos por estar y seguir conmigo las aventuras que se me crucen por la vida.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>AUTORIZACIÓN DE USO</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	ix
<b>RESUMEN</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE TRABAJO</b> .....	7
<b>3. OBJETIVO GENERAL</b> .....	7
<b>4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	7
<b>5. METODOLOGÍA</b> .....	8
5.2 Variabilidad natural de la bahía .....	8
5.3 Campañas de muestreo.....	9
5.4 Análisis de laboratorio. ....	11
5.5 Porcentaje de saturación de los gases (O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O y CH <sub>4</sub> ) .....	12
5.6 Consumo Aparente de Oxígeno (AOU) y Producción Aparente de Óxido Nitroso (▲N <sub>2</sub> O). 13	
5.7 Análisis estadístico.....	13
5.8 Análisis de surgencia.....	14
<b>6. RESULTADOS</b> .....	16
6.1 Caracterización de las propiedades físicas de bahía Flamenco .....	16
6.1.1 Cultivo total (8 de noviembre de 2016).....	16
6.1.2 Cultivo parcial (15 de octubre de 2017).....	16
6.2 Distribución de nutrientes y amonio en bahía Flamenco .....	23
6.2.1 Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) .....	23
6.2.2 Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> ).....	25
6.2.3 Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ).....	27

6.3 Distribución de GEI en bahía Flamenco .....	28
6.3.1 Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ).....	28
6.3.2 Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	30
6.3.3 Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O).....	32
6.4 Variabilidad natural de bahía Flamenco.....	34
6.5 Relaciones NO <sub>3</sub> /N <sub>2</sub> O, NO <sub>3</sub> /AOU, N <sub>2</sub> O/AOU.....	35
6.5.1 NO <sub>3</sub> /▲N <sub>2</sub> O.....	35
6.5.2 NO <sub>3</sub> /AOU .....	37
6.5.3 ▲N <sub>2</sub> O/AOU .....	37
6.6 Comparación de las estaciones EST1, EST-BJ y EST2 en el periodo con cultivo total y el periodo con cultivo parcial. ....	38
6.7 Análisis estadístico.....	41
6.7.1 Análisis estadístico entre periodo con cultivo total y periodo con cultivo parcial. ....	41
6.7.2 Análisis estadístico entre las estaciones EST1, EST BJ y EST 2 del periodo con cultivo total.....	41
6.7.3 Análisis estadístico entre las estaciones EST1, EST BJ y EST 2 del periodo con cultivo parcial. ....	41
6.8. Análisis de la surgencia.....	42
6.8.1 Noviembre, 2016.....	42
6.8.2 Octubre, 2017 .....	43
<b>7. DISCUSIÓN.....</b>	<b>44</b>
<b>8. CONCLUSIÓN.....</b>	<b>50</b>
<b>9. REFERENCIAS .....</b>	<b>52</b>
<b>10. ANEXOS .....</b>	<b>58</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Esquema del destino de la alimentación de los peces en los cultivos y sus consecuencias (Fuente: <a href="http://www.auiculturamarina.com">www.auiculturamarina.com</a> ).....	3
<b>Figura 2</b> Zona de estudio, la cual corresponde a bahía Flamenco (a), ubicada en la región de Atacama, Chile (b).....	8
<b>Figura 3</b> Posiciones geográficas de las estaciones CIMAR 21(26,9985°S-780,88°W), CIMAR 22 ((27,015°S-70,87°W), WOD_95 (26,5°S-70,72°W), WOD_93 (26,5°S-70,73°W) y EST1 (26,5687°S-70,6967°W).....	9
<b>Figura 4</b> Posiciones geográficas de las estaciones muestreadas en noviembre de 2016 (a) y en octubre de 2017 (b) en bahía Flamenco.....	10
<b>Figura 5</b> a) Posiciones de las transectas perpendiculares a la costa y b) Posición de la transecta paralela a la costa. ....	17
<b>Figura 6</b> Distribución vertical de la Temperatura, a) Transecta 1, b) Transecta 2, c) Transecta 3 y d) Transecta 4. ....	19
<b>Figura 7</b> Distribución vertical de la Salinidad, a) Transecta 1, b) Transecta 2, c) Transecta 3 y d) Transecta 4. ....	20
<b>Figura 8</b> Distribución vertical de Oxígeno disuelto, a) Transecta 1, b) Transecta 2, c) Transecta 3 y d) Transecta 4.....	21
<b>Figura 9</b> Diagrama T-S en la bahía Flamenco, octubre 2017.....	22
<b>Figura 10</b> Distribución de $\text{NO}_3^-$ en a)0 m (verde), b)5 m (purpura) y c)10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f)10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017. ....	24
<b>Figura 11</b> Distribución de $\text{PO}_4^{3-}$ en a)0 m (verde), b)5 m (purpura) y c)10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f)10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017. ....	26
<b>Figura 12</b> Distribución de $\text{NH}_4^+$ en a)0 m (verde), b)5 m (purpura) y c)10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017. ....	27
<b>Figura 13</b> Distribución de $\text{CO}_2$ en a)0 m (verde), b)5 m (purpura) y c)10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f)10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017. ....	29

<b>Figura 14</b> Distribución de CH <sub>4</sub> en a)0 m (verde), b)5 m (purpura) y c)10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f)10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017. ....	31
<b>Figura 15</b> Distribución de N <sub>2</sub> O en a)0 m (verde), b)5 m (purpura) y c)10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f)10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017. ....	33
<b>Figura 16</b> Comparación de nutrientes y oxígeno disuelto entre las estaciones CIMAR 21, CIMAR 22, WOD_95, WOD_93 y la EST1 de ambas campañas de muestreo. ....	34
<b>Figura 17</b> Relación NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /▲N <sub>2</sub> O para a) Periodo cultivo total, noviembre 2016 y b) Periodo cultivo parcial, octubre 2017. ....	35
<b>Figura 18</b> Relación NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /▲N <sub>2</sub> O para cada una de las estaciones muestreadas a) EST1, b) EST-BJ, c) EST2, d) EST3, e) EST4, f) EST5, g) EST6, h) EST7 y I) EST8 en el periodo de cultivo parcial, octubre 2017. ....	36
<b>Figura 19</b> Relación NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /AOU para a) Periodo cultivo total, noviembre 2016 y b) Periodo cultivo parcial, octubre 2017. ....	37
<b>Figura 20</b> Relación N <sub>2</sub> O/AOU para a) Periodo cultivo total, noviembre 2016 y b) periodo cultivo parcial, octubre 2017. ....	38
<b>Figura 21</b> Serie de tiempo para a) viento observado y b) índice de surgencia, noviembre 2016. ....	42
<b>Figura 22</b> Serie de tiempo para a) viento observado y b) índice de surgencia, octubre 2017. ....	43
<b>Figura 23</b> Imágenes de la TSM de los días previos y el día de muestreo para a) cultivo total (4-8 nov 2016) y b) cultivo parcial (11-15 oct 2017).....	45
<b>Figura 24</b> Representación esquemática del ciclo del nitrógeno, oxígeno, fósforo y carbono. Gruber et al., 2008. ....	58
<b>Figura 25</b> Modelo de los flujos ambientales de nitrógeno suministrados al cultivo de <i>Seriola lalandi</i> en la bahía Fitzgerald, Australia del Sur. Fernandes & Tanner, 2008.....	58

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Porcentajes del destino de la cantidad de nitrógeno ingresado al sistema y carga de nitrógeno por tonelada de <i>Seriola lalandi</i> en comparación con la familia de los salmónidos (Adaptado de Fernandes, Lauer, Chedire & Angove, 2007).....	5
<b>Tabla 2</b> Valores máximos, mínimos, promedios y desviaciones estándar de las variables físicas en la zona de muestreo. ....	16
<b>Tabla 3</b> Concentración de Clorofila-a observada en las estaciones EST 1, EST-BJ, EST2 y EST3. ....	18
<b>Tabla 4</b> Proporciones entre los muestreos durante el cultivo total y el cultivo parcial a 0 m de profundidad.....	39
<b>Tabla 5</b> Proporciones entre los muestreos durante el cultivo total y el cultivo parcial a 5 m de profundidad.....	39
<b>Tabla 6</b> Proporciones entre los muestreos durante el cultivo total y el cultivo parcial a 10 m de profundidad.....	40
<b>Tabla 7</b> Test de Mann-Whitney para las variables entre campañas de muestreo. ....	41
<b>Tabla 8</b> Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para las variables entre las estaciones de la campaña 1, noviembre 2016.....	41
<b>Tabla 9</b> Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para las variables entre las estaciones de la campaña 2, octubre 2017.....	42
<b>Tabla 10</b> Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el nitrato entre las estaciones de la campaña 1 y la campaña 2.....	59
<b>Tabla 11</b> Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el fosfato entre las estaciones de la campaña 1 y la campaña 2.....	59
<b>Tabla 12</b> Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el óxido nitroso entre las estaciones de la campaña 1 y la campaña 2.....	59
<b>Tabla 13</b> Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el oxígeno entre las estaciones de la campaña 1.....	59
<b>Tabla 14</b> Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el amonio entre las estaciones de la campaña 2.....	60

## RESUMEN

El rápido aumento de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, debido a la actividad humana no sólo ha cambiado los balances naturales de carbono y nitrógeno en su repartición entre la biósfera, atmósferas e hidrósfera, sino que también ha afectado el clima del planeta. En este sentido una de las actividades menos estudiadas ha sido la acuicultura, la cual libera nutrientes orgánicos e inorgánicos a la columna de agua. Actualmente esta actividad no solo se desarrolla en la zona de canales australes, sino que también se han implementado en océano abierto, los cuales son llamados cultivos offshore.

El presente estudio presenta el análisis del posible impacto que pueda tener un cultivo offshore piloto de *Seriola lalandi* sobre la biogeoquímica de la columna de agua en la bahía Flamenco (26°33'30''S y 70°40'47''W), la cual se ve afectada a diversos fenómenos físicos, tales como una zona de mínimo oxígeno, surgencia costera, entre otras. Para ello se realizaron 2 campañas de muestreo, la primera denominada cultivo total (8 de noviembre de 2016) y la segunda denominada cultivo parcial (15 de octubre de 2017), en las cuales se tomaron muestras para la medición nutrientes, gases de efecto invernadero y oxígeno disuelto, además de obtener mediciones de las variables físicas como temperatura, salinidad y densidad.

Los resultados observados muestran que las variables oceanográficas y biogeoquímicas son significativamente diferentes entre un año y otro, debido a que los efectos del fenómeno de surgencia se presentaron en el cultivo parcial. Entre estaciones y en ambas campañas no se encontraron diferencias significativas, pero si se logró ver una disminución de oxígeno disuelto y un aumento de las concentraciones de nitrato, fosfato, óxido nitroso, y dióxido de carbono asociado a la estación balsa jaula del periodo de cultivo total, pero no significativo.

Estos resultados sugieren que el cultivo offshore piloto no tiene un impacto significativo sobre la biogeoquímica de la columna de agua de bahía Flamenco.

## ABSTRACT

The fast increase of the atmospheric concentration of greenhouse gases, such as carbon dioxide, methane, and nitrous oxide, due to human activity not only has the natural balance of carbon and nitrogen changed in their distribution between the biosphere, atmospheres, and hydrosphere, but it has also affected the climate of the planet. In this sense one of the least studied activities has been the aquaculture which releases organic and inorganic nutrients to the water column., currently this activity is not only developed in the zone of austral channels, but also has been implemented in the open ocean, which are called offshore fish farming.

The present study presents the analysis of the possible impact that a pilot offshore fish farming of *Seriola lalandi* can have on the biogeochemistry of the water column in the Flamenco bay (26°33'30''S y 70°40'47''W), which is affected by various physical phenomena, such as a zone of minimum oxygen, coastal upwelling, among other. For this, 2 campaigns of sampling were made, the first one called total fish farming (November 8, 2016) and the second one called partial fish farming (October 15, 2017), in which samples were taken for the measurement of nutrients, greenhouse gases and dissolved oxygen, in addition measurements of physical variables such as temperature, salinity and density.

The observed results show the oceanographic and biogeochemical variables are significantly different from one year to the next, due to the fact that the effects of the upwelling phenomenon occurred in the partial fish farming. Between stations and in both campaigns no significant differences were found, but it was possible to see a decrease in dissolved oxygen and an increase in the concentrations of nitrate, phosphate, nitrous oxide, and carbon dioxide associated with the raft cage station during the total fish farming period, but not significant.

These results suggest that the pilot offshore farming does not have a significant impact on the biogeochemistry of the water column of the Flamenco bay.

## 1. INTRODUCCIÓN

El océano cumple un rol fundamental para el clima del planeta, regulando, entre otras cosas, las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Los GEI influyen en el control de la temperatura promedio del planeta, siendo el océano considerado como un sumidero de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), fuente de metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) hacia la atmósfera. El océano costero ha sido caracterizado por los intensos flujos biogeoquímicos que se presentan en él, los que son forzados por la interacción de la tierra y la atmósfera, cuya naturaleza depende de distintos factores, tales como, la morfología de la tierra, los patrones de circulación atmosféricos y oceánicos, pero principalmente por los intercambios de energía y materia (calor, agua,  $\text{CO}_2$ , etc.) en las interfaces (océano-atmósfera, océano-sedimento)(Torres et al., 2011). El intercambio océano-atmósfera se encuentra controlado directa e indirectamente por parámetros físicos y biogeoquímicos, tales como: la turbulencia, viento, surgencia, mezcla, temperatura, desnitrificación, nitrificación, remineralización de la materia orgánica y niveles de oxígeno (Cornejo et al., 2006).

Actualmente, la temperatura de la atmósfera y el océano ha incrementado, lo cual ha sido atribuido al aumento de las actividades antropogénicas que, bajo diferentes mecanismos, han aumentado las emisiones y secuestro natural de GEI desde la era preindustrial (IPCC, 2016). Las emisiones antropogénicas han sido resultado en gran medida del crecimiento económico y demográfico, dado que entre 1750 y 2011 las emisiones de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera acumuladas han sido de  $2040 \pm 310 \text{ GtCO}_2$ , donde el 40% aproximadamente ha permanecido en la atmósfera y el 60% restante ha sido almacenado en la tierra y el océano (IPCC, 2016).

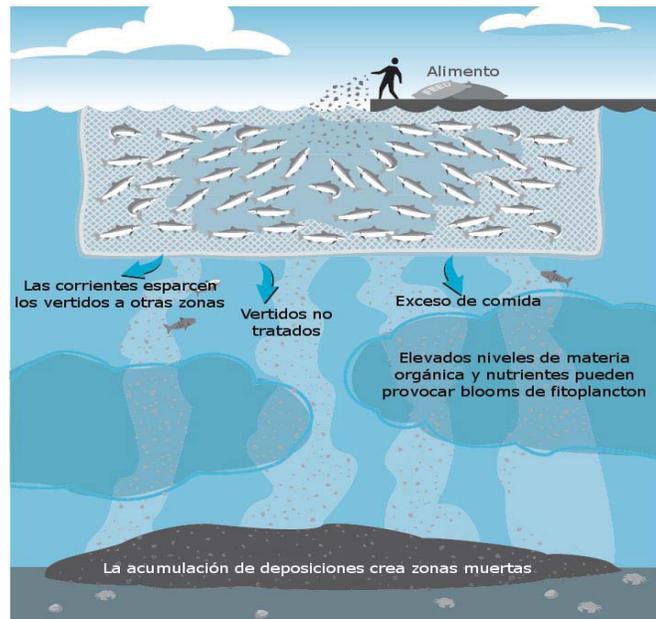
El  $\text{CO}_2$  es producto de procesos de respiración aeróbica y anaeróbica, mientras que la producción antropogénica de este se ve influenciada principalmente por la quema de combustibles fósiles y la deforestación (Woodwell et al., 1983). El  $\text{CH}_4$  es el hidrocarburo más abundante en la atmósfera, y su producción se debe a la actividad biológica en condiciones de anaerobia, acumulados como hidratos de gas (Wuebbles & Hayhoe, 2002) y

también por procesos de degradación de la materia orgánica en condiciones de anoxia (metanogénesis). La producción de  $\text{N}_2\text{O}$  se debe a procesos microbiológicos como subproducto durante la oxidación del amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en la nitrificación y además como producto intermedio durante la desnitrificación (Bange, 2006, Yamagishi et al., 2007). El  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  son 25 y 300 veces más efectivo como gas de efecto invernadero que el  $\text{CO}_2$  en la tropósfera, respectivamente (Manne & Richels, 2001; Naqvi et al., 2010). Adicionalmente, el  $\text{N}_2\text{O}$  está involucrado en la destrucción de la capa de ozono, contribuyendo indirectamente al incremento de la radiación.

La producción de estos gases tiene estrecha relación con las concentraciones de nutrientes y oxígeno disuelto (**Figura 24, Anexo**), debido que contribuyen en la actividad primaria y por ende aumentan los procesos de respiración, lo que tiene como consecuencia producción de  $\text{CO}_2$  principalmente y en menor medida de  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$ . El principal aporte de nutrientes a las aguas superficiales depende de procesos físicos, como la advección, turbulencia, escorrentía de ríos, surgencia costera y la deposición atmosférica (Libes, 1992). Particularmente la surgencia costera es un gran aporte de nutrientes hacia la superficie, debido al ascenso de aguas subsuperficiales con alto contenido de nutrientes (Barnes & Mann, 1998) lo que favorece a la producción primaria. Esta agua subsuperficial es conocida como masa de agua Ecuatorial Subsuperficial caracterizada por tener temperaturas bajas, mayor salinidad y bajos contenido de oxígeno disuelto (Silva, 1975). Y también por la excreción de desechos orgánicos por parte de los organismos que, por acción de las bacterias, se descomponen liberando así nutrientes que posteriormente pueden ser reutilizados por organismos fotosintetizadores para elaborar nuevas sustancias orgánicas (Cifuentes et al., 1997). Un excesivo aporte de nutrientes, tal como ocurre en algunas zonas costeras por las actividades antropogénicas, puede modificar el ciclo de los GEI. La acuicultura es una de estas actividades que puede afectar de manera directa la columna de agua.

La acuicultura es actualmente una alternativa de mercado para incrementar la oferta y demanda de productos del mar, dado al colapso de las pesquerías por la sobrepesca (Naylor et al., 2000, Goldberg & Naylor 2005). En Chile, cerca del 95% de la producción acuícola es de salmón (Orellana et al., 2014), ubicado en la zona de fiordos y canales australes del sur del país y el porcentaje restante corresponde a la producción de otras especies como seriolas, crustáceos, moluscos, etc.

Esta actividad conlleva a grandes problemas ambientales en los ecosistemas marinos locales y regionales. La alimentación de los peces (**Figura 1**) es principalmente a base de pellets, los que contienen los nutrientes que necesitan para desarrollarse (Nitrógeno, fósforo y carbono). Aproximadamente un 75% de estos se pierden como alimento no capturado, fecas no digeridas y otros productos de excreción (Soto & Norambuena, 2004), es decir, no es asimilado por el animal quedando de manera suspendida en la columna de agua, lo que posteriormente causa problemas de eutrofización y proliferación de algas o depositándose en el fondo marino, lo que significaría una contaminación del sedimento (Williams & Crutzen, 2010).



**Figura 1** Esquema del destino de la alimentación de los peces en los cultivos y sus consecuencias (Fuente: [www.auculturamarina.com](http://www.auculturamarina.com)).

La cantidad de materia orgánica resultante del cultivo tiene el potencial de producir CO<sub>2</sub> y en menor medida N<sub>2</sub>O, mediante los procesos de degradación de la materia orgánica. La cantidad de nitrógeno contenido en la materia orgánica representa cerca de un 3,2 % aproximadamente de las emisiones oceánicas de N<sub>2</sub>O. Si la industria de la acuicultura continúa creciendo, estas emisiones podrían aumentar a un 17% dentro de 20 años (Williams & Crutzen, 2010), llegando así a convertirse en una importante fuente de N<sub>2</sub>O y probablemente de otros GEI.

El desarrollo de nuevas especies de peces es una alta prioridad actualmente para la diversificación de la actividad acuícola en Chile, con el fin de expandir la producción a recursos de alto valor y diferentes zonas geográficas. Es por esto, que la acuicultura ha diversificado sus formas de producción y especies objetivo. Tal es el caso del cultivo de *Seriola lalandi*, una especie migratoria proveniente del océano Índico (También conocida como palometa, vidriola o pez rey de cola amarilla), la cual posee una rápida tasa de crecimiento. En un principio el cultivo se realizó en sistemas de recirculación de agua (RAS) (Orellana et al., 2014), pero hoy en día se están realizando cultivos off-shore pilotos, principalmente en las costas del norte de Chile.

La *Seriola lalandi* tiene altas tasas metabólicas, por lo que necesitan un mayor aporte de energía, es decir, una mayor alimentación (Kosmeyer & Dewar 2001; Clark, 2007). Sin embargo, la fracción asimilada de nitrógeno para el crecimiento (14-16%) es entre un tercio y la mitad del observado en los salmónidos (37-45%, **Tabla 1**). Además, cerca de un 10% de la alimentación no se consume, la que posteriormente se combina con pérdidas por excreción principalmente branquial y secundariamente urinaria, alcanzando entre 69 y 71% de aporte de nitrógeno, en forma de amonio, a la columna de agua (**Tabla 1**) (Fernandes & Tanner, 2008). Este aporte de nitrógeno podría tener un impacto biogeoquímico en la columna de agua

**Tabla 1** Porcentajes del destino de la cantidad de nitrógeno ingresado al sistema y carga de nitrógeno por tonelada de *Seriola lalandi* en comparación con la familia de los salmónidos (Adaptado de Fernandes, Lauer, Chedire & Angove, 2007)

Especie	Destino del nitrógeno en los inputs alimenticios (%)			Cargas de nitrógeno (Kg N / Ton de crecimiento)			Dieta
	Retención	desechos sólidos	Desechos solubles	Sólido	Soluble	Total	
<i>Seriola lalandi</i>	14-16	15-16	69-71	32-35	144-161	176-195	Pellets
Salmonidos	37-45	16-26	34-48	9-14	33-45	42-57	Pellets

El objetivo del presente Trabajo de Titulación es determinar el efecto del cultivo off-shore piloto de *Seriola lalandi* en la biogeoquímica de la columna de agua en la bahía Flamenco (26°33'30''S-70°40'47''W). Esta bahía se localiza en la zona norte de Chile, región de Atacama y recientemente se ha desarrollado la actividad acuícola de *Seriola lalandi* en un cultivo off-shore piloto. Esta producción, se ve afectada por distintos fenómenos físicos y químicos a los cuales está sometido el ambiente, tales como, una zona de mínimo oxígeno somera, surgencia costera, etc., pudiendo tener un impacto significativo sobre la producción de GEI y nutrientes en el ambiente.

#### *Antecedentes de bahía Flamenco*

En la bahía se han realizado distintos estudios correspondientes a diversos proyectos que se han querido realizar, los que han dado una idea de cómo se comporta la bahía de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas y meteorológicas. Los proyectos estudiados fueron: a) Puerto Desierto y b) Caracterización preliminar del sitio para la instalación de una balsa jaula.

El proyecto “Puerto Desierto” desarrolló estudios de vientos y corrientes, en cuanto a los vientos, este se realizó en un periodo comprendido entre el 11 de julio y 20 de octubre de 2011, se observó que la dirección predominante fue del tercer cuadrante, es decir, del SW (Anexo K\_estudio de vientos). Por otra parte, el estudio de corrientes se realizó por dos

metodologías, 1) Euleriana, entre el 14 de julio y el 18 de agosto del 2011), el que presentó que en la capa superficial y la capa intermedia de la columna de agua tuvieron una dirección dominante hacia el NW; y 2) Lagrangiana, la que corroboró que las corrientes se desplazan hacia el NW (Anexo M\_ estudio de corrientes).

La caracterización preliminar del sitio (CPS) efectuada para la instalación de una balsa jaula, la cual fue parte del proyecto denominado “Cultivo en etapas de engorda para la producción en cautiverio de *Seriola lalandi* en puerto Flamenco, desarrolló análisis de temperatura y oxígeno disuelto. La temperatura fluctuó entre 13,8 y 15,9 (°C), y el oxígeno disuelto entre 5,9 y 8,1 (mg/L) lo que equivale a 4,13 y 5,67 (mL/L).

## **2. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE TRABAJO**

La presencia del cultivo off-shore piloto de *Seriola lalandi* en bahía Flamenco, tiene un impacto en la biogeoquímica de la columna de agua, lo que se ve reflejado en un aumento de las concentraciones de nutrientes y gases de efecto invernadero.

## **3. OBJETIVO GENERAL**

Determinar el efecto del cultivo off-shore piloto de *Seriola lalandi* sobre las condiciones biogeoquímicas, concentraciones de nutrientes y gases de efecto invernadero, de la columna de agua en la bahía Flamenco.

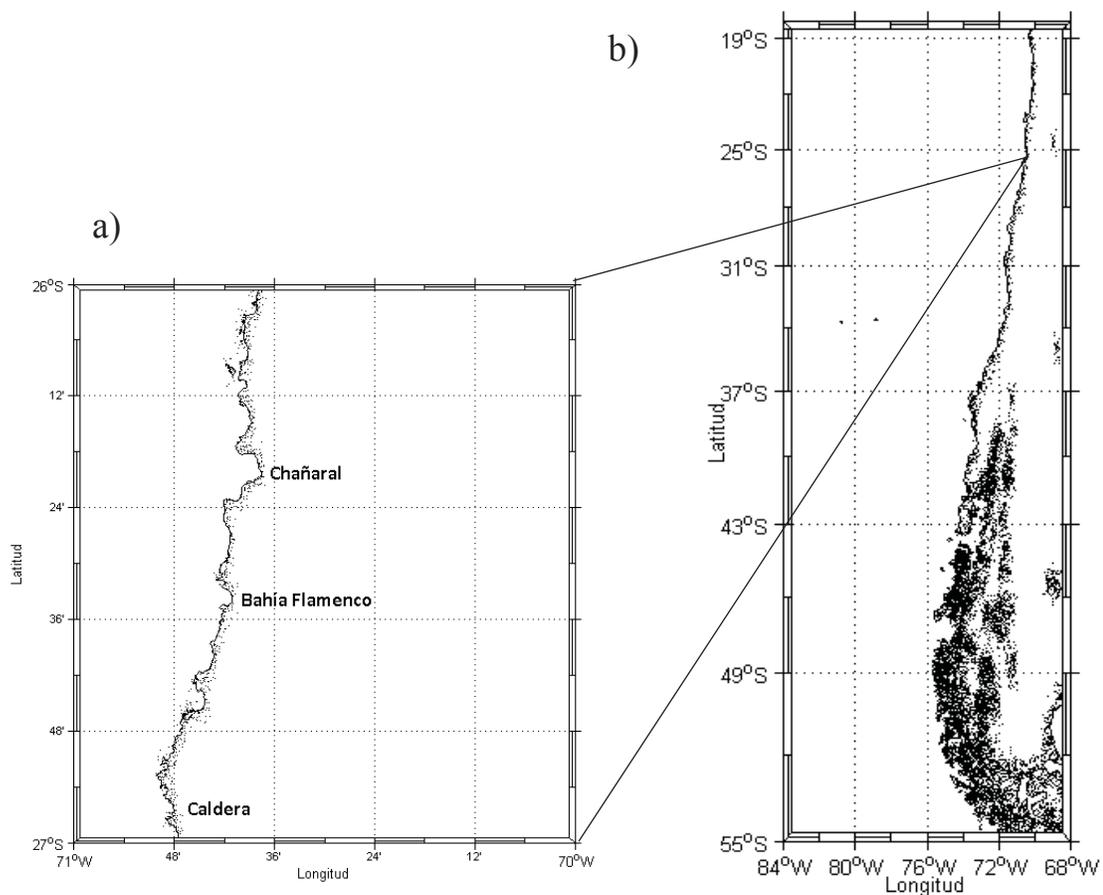
## **4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar las condiciones oceanográficas (temperatura, salinidad, densidad, clorofila, oxígeno disuelto superficial) de bahía Flamenco.
- Caracterizar las condiciones biogeoquímicas, nutrientes y gases de efecto invernadero, de la columna de agua de la bahía.
- Comparar las condiciones biogeoquímicas en un periodo con cultivo y otro sin cultivo de *Seriola lalandi*.
- Determinar condiciones de surgencia en la bahía Flamenco, mediante magnitud y dirección del viento.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a bahía Flamenco, ubicada a 56 km al norte de Caldera y 25 km al sur de Chañaral ( $26^{\circ}33'30''\text{S}$  y  $70^{\circ}40'47''\text{W}$ ) (**Figura 2**).

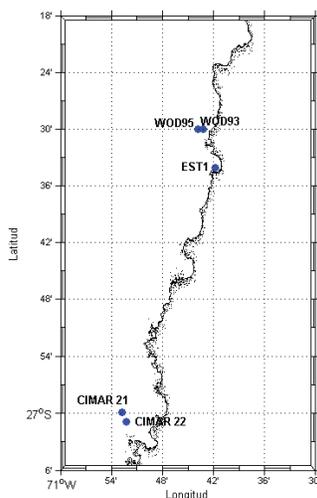


**Figura 2** Zona de estudio, la cual corresponde a bahía Flamenco (a), ubicada en la región de Atacama, Chile (b)

### 5.2 Variabilidad natural de la bahía

Para obtener una idea más amplia de cómo es el comportamiento de la bahía, se pudo caracterizar algunas variables como nutrientes y oxígeno disuelto mediante datos de embarques con estaciones de monitoreo cerca de la bahía, tales como la estación 1 de CIMAR 21 ( $26,9985^{\circ}\text{S}-70,88^{\circ}\text{W}$ ) y CIMAR 22 ( $27,015^{\circ}\text{S}-70,870^{\circ}\text{W}$ ), además de 2 estaciones

proporcionadas por el World Ocean Atlas, WOD\_95 (26,5°S-70,72°W) y WOD\_93 (26,5°S-70,73°W) (**Figura 3**), Posteriormente estas estaciones fueron comparadas con la estación 1 (26,5687°S-70,6967°W) del muestreo.



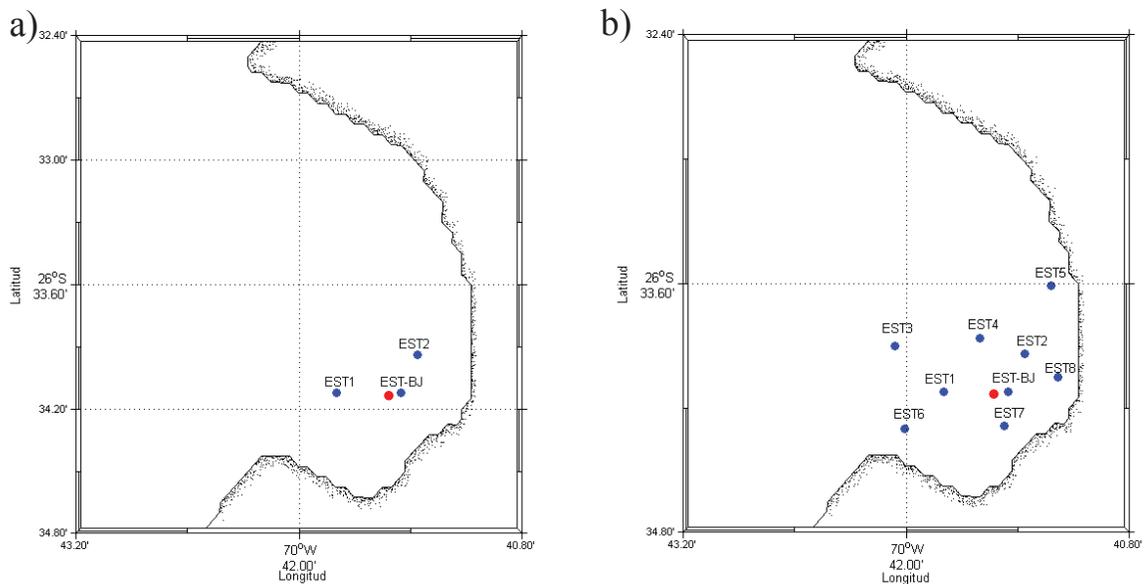
**Figura 3** Posiciones geográficas de las estaciones CIMAR 21(26,9985°S-780,88°W), CIMAR 22 ((27,015°S-70,87°W), WOD\_95 (26,5°S-70,72°W), WOD\_93 (26,5°S-70,73°W) y EST1 (26,5687°S-70,6967°W)

### 5.3 Campañas de muestreo.

El presente estudio contempló el análisis de las condiciones oceanográficas y biogeoquímicas durante dos campañas de muestreo, en bahía Flamenco (**Figura 2**) la cual presenta un cultivo off-shore piloto de *Seriola lalandi*

La primera campaña fue realizada el día 8 de noviembre de 2016, cuando la balsa jaula contenía aproximadamente 700 ejemplares de *Seriola lalandi*, llamado periodo con cultivo total. El diseño de muestreo constó de 3 estaciones denominadas EST1, EST-BJ y EST2 (**Figura 4 a**). Se colectaron muestras de agua para GEI, nutrientes y salinidad a las profundidades de 0, 5 y 10 metros en cada estación con una botella Niskin. La temperatura y oxígeno disuelto fueron medidos con un OxiGuard (Handy Polaris 2).

La segunda campaña se llevó a cabo el día 15 de octubre de 2017, cuando la balsa jaula contenía no más de 180 ejemplares de *Seriola lalandi*, por lo que este muestreo fue considerado como periodo con cultivo parcial. El diseño de muestreo contempló 9 estaciones distribuidas alrededor del cultivo denominadas EST3, EST4, EST5, EST6 y EST7 (**Figura 4 b**), se colectaron muestras de agua para GEI, nutrientes, clorofila-a, amonio y oxígeno disuelto a las profundidades de 0, 5 y 10 metros en cada estación con una botella Niskin. Además, se realizaron perfiles de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto con un CTD (SeaBird Model SB25).



**Figura 4** Posiciones geográficas de las estaciones muestreadas en noviembre de 2016 (a) y en octubre de 2017 (b) en bahía Flamenco, donde el punto rojo representa la posición de balsa jaula.

Las muestras de agua para la determinación GEI, fueron colectadas en triplicado con una manguera tygon en viales de 20 mL e inmediatamente se agregó a cada vial 50  $\mu$ L de cloruro de mercurio ( $\text{HgCl}_2$ ) para evitar la actividad biológica, con lo cual el gas se preserva dentro de la muestra. Luego cada vial se selló herméticamente hasta el análisis en laboratorio.

Las muestras de agua para la determinación de nutrientes se colectaron en triplicado desde las botellas, donde los tubos falcon fueron cebados al menos 3 veces con el agua de la

botella. Una vez realizado esto se filtraron 45 mL (GF/F, 0,45  $\mu\text{m}$ ) de agua de mar y posteriormente las muestras se congelaron ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) hasta su análisis en el laboratorio.

Las muestras de agua para la determinación de Clorofila se colectaron en botellas de policarbonato oscuras de 1 L. Se mantuvieron a  $4^{\circ}\text{C}$  y posteriormente en el laboratorio se filtraron 200 mL de agua (GF/F 0,45  $\mu\text{m}$ ). El filtro fue congelado ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) hasta el momento de su análisis.

Las muestras de agua para la determinación de amonio se colectaron en triplicado desde la botella Niskin y con manguera tygon en frascos duran schot, añadiendo 5 mL del reactivo orto-ftalaldehído (OPA)

Las muestras de agua para la determinación de oxígeno disuelto se colectaron en triplicado desde la botella Niskin y con manguera tygon evitando la formación de burbujas. Posteriormente, el oxígeno disuelto se fijó a bordo agregándole 1 mL de solución A ( $\text{MnCl}_2$ ) y luego 1 mL de solución B (KI-NaOH) sin provocar burbujas y sin tocar los bordes del matraz de muestreo para no dejar restos de reactivos en ellos (Carpenter, 1965).

#### *5.4 Análisis de laboratorio.*

##### *Gases de Efecto Invernadero*

La determinación de la concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  se realizó a través de la técnica de headspace (McAuliffe, 1971) y analizados por cromatografía gaseosa en un cromatógrafo de gases (Greenhouse GC-2014, Shimatzu) equipado con un Detector de Captura de Electrones (ECD) para la determinación de  $\text{N}_2\text{O}$  y de un detector de Ionización en Llama (FID), unido a un metanizador, para la determinación de  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$ .

##### *Nutrientes*

La determinación de nutrientes (fosfato, silicato y nitrato) se realizó mediante un análisis colorimétrico en un autoanalizador (Alpkem RFA/2) utilizando la metodología de Strickland and Parson, (1972) en el Laboratorio de Biogeoquímica Marina, PUCV. La concentración de nitrito se determinó mediante colorimetría en un espectrofotómetro (Spectronic Genesys S) de acuerdo a la metodología de Strickland and Parson (1972).

#### *Clorofila*

La determinación de clorofila se realizó de acuerdo al método propuesta por Holm-Hansen *et al.*, 1965, en un fluorómetro Turner 10<sup>a</sup> en el Laboratorio de Oceanografía y Bentos (LOBOS), de la PUCV.

#### *Amonio*

La determinación de amonio se realizó por la metodología fluorométrica (Holmes *et al.* 1999) en el Observatorio de Ecología Microbiana de la Universidad de Playa Ancha.

#### *Oxígeno disuelto*

La determinación de la concentración de oxígeno disuelto se hizo según el método de Winkler modificado por Carpenter (1965). en el Laboratorio de Oceanografía y Bentos (LOBOS), de la PUCV.

#### *5.5 Porcentaje de saturación de los gases (O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>)*

La concentración de saturación para oxígeno disuelto a cualquier temperatura y salinidad (NAEC) se pudo calcular con el algoritmo de Weiss (1970) y los gases de efecto invernadero se calcularon mediante la siguiente ecuación propuesta por Gruber & Sarmiento, 2002.

$$C_A = S_A * p_A^{moist}$$

Donde,

C<sub>A</sub>, es la concentración de saturación.

$S_A$ , es el parámetro de solubilidad

$p_A^{moist}$ , es la presión parcial en el aire húmedo y depende del gas.

Luego para calcular los porcentajes de saturación de los gases se utilizó la siguiente fórmula:

$$\%SAT = \frac{[Gas]_{obs}}{[Gas]_{sat}} * 100$$

### 5.6 Consumo Aparente de Oxígeno (AOU) y Producción Aparente de Óxido Nitroso ( $\blacktriangle N_2O$ )

El consumo aparente de oxígeno se define por la siguiente ecuación:

$$AOU = [O_2]_{SAT} - [O_2]_{OBS}$$

Donde,

Si:  $AOU < 0$  significa producción de oxígeno disuelto

Si  $AOU = 0$  significa equilibrio

Si  $AOU > 0$  significa consumo de oxígeno disuelto

La producción aparente de óxido nitroso se define por la siguiente ecuación:

$$\blacktriangle N_2O = [N_2O]_{SAT} - [N_2O]_{OBS}$$

Donde,

Si  $\blacktriangle N_2O < 0$  significa consumo de óxido nitroso

Si  $\blacktriangle N_2O = 0$  significa equilibrio

Si  $\blacktriangle N_2O > 0$  significa producción de óxido nitroso

### 5.7 Análisis estadístico

Para determinar si las concentraciones de GEI y nutrientes presentes en la primera campaña de muestreo son significativamente diferentes a las concentraciones presentes en la segunda campaña de muestreo, se realizó un análisis de basados en el test de U Mann

Whitney y el test de Kruskal Wallis (permanova univariada), utilizando el programa PAST versión 3.0 (Hammer et al., 2001).

### 5.8 Análisis de surgencia

Para calcular el índice de surgencia instantáneo (Bakun, 1973, 1975, 1987), se utilizaron registros de viento (dirección y magnitud) cada 3 horas, proporcionados por el Servicio Meteorológico de la Armada, correspondiente a observaciones efectuadas en la estación Caldera (27,067°S – 70,825°W), que se encuentra a 7 metros sobre el nivel del mar. Con dichos datos se prepararon series de tiempo, utilizando para el viento la componente norte-sur (meridional), por ser aquella la de mayor incidencia sobre los procesos de surgencia.

Este índice se basa en lo señalado por Ekman (1905) en cuanto a que el transporte de masa ( $M$ ) en dirección perpendicular al movimiento es directamente proporcional a la tensión del viento sobre la superficie del océano ( $\tau$ ) y es inversamente proporcional al parámetro de Coriolis ( $f$ ) que es constante para una latitud dada. La expresión para el transporte de Ekman tiene entonces la forma:

$$M_x = \frac{\tau_y}{f}$$

donde

$M_x$ : transporte de Ekman hacia el oeste

$f$ : parámetro de Coriolis

$\tau_y$ : coacción del viento sobre la superficie en la dirección norte-sur

siendo:

$$f = 2 \cdot \omega \cdot \text{sen}(L)$$

donde

$\omega$ : velocidad angular de la tierra

$L$ : Latitud del lugar

y,

$$\tau_y = \rho_a \cdot Cd_{10} \cdot |v| \cdot v$$

donde

$\rho_a$ : densidad del aire (1,24 Kg·m<sup>-3</sup>)

$Cd_{10}$ : coeficiente de arrastre del viento (0,0013 propuesto por Bakun & Parrish,1982)

$v$ : componente norte-sur de la velocidad del viento

$|v|$ : magnitud de la velocidad del viento (m·s<sup>-1</sup>)

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Caracterización de las propiedades físicas de bahía Flamenco

#### 6.1.1 Cultivo total (8 de noviembre de 2016)

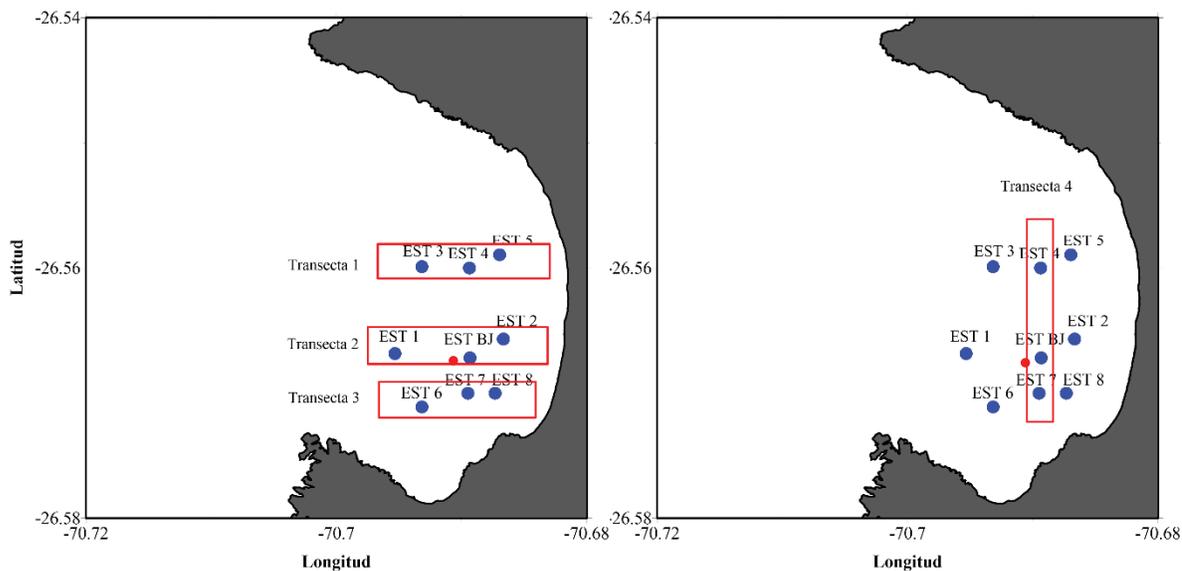
La distribución de temperatura en los primeros 10 m de profundidad de la columna de agua en la zona de muestreo, fluctuó entre 16,6 y 18,2°C, con promedios de 17,5°C, 17,4°C y 17,6°C en las estaciones EST1, EST-BJ y EST2 respectivamente. La salinidad fluctuó entre 35 y 36, donde la mayor salinidad se observó en la estación más cercana a la costa (EST2) y la menor salinidad en la estación más alejada de la costa (EST1). El contenido de oxígeno disuelto (O<sub>2</sub>) en la zona de muestro, fluctuó entre 5,81 y 7,7 mL L<sup>-1</sup>, observados en EST-BJ y EST2 respectivamente. Por último, la densidad en la zona de muestreo fluctuó entre 1025 y 1027 kg m<sup>-3</sup>, donde la menor densidad se observó en la EST1 de 1025 kg m<sup>-3</sup> y la mayor densidad se observó en la estación balsa jaula EST-BJ y EST2 (**Tabla 2**)

**Tabla 2** Valores máximos, mínimos, promedios y desviaciones estándar de las variables físicas en la zona de muestreo.

Estaciones	EST1				EST-BJ				EST2			
	Max	Min	Prom	Des. Est	Max	Min	Prom	Des. Est	Max	Min	Prom	Des. Est
Temperatura (°C)	17,90	16,90	17,47	0,51	17,60	17,10	17,37	0,25	18,20	17,00	17,60	0,60
Salinidad	36,00	35,00	35,33	0,58	36,00	36,00	36,00	0,00	37,00	36,00	36,33	0,58
Oxígeno (mL/L)	7,63	7,28	7,47	0,18	6,02	5,81	5,88	0,12	7,70	7,35	7,56	0,19
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1026	1025	1025,7	0,6	1027	1027	1027	0,0	1027	1027	1027	0,0

#### 6.1.2 Cultivo parcial (15 de octubre de 2017)

Debido a que el segundo muestro consideró una grilla que contempló 6 estaciones más que en el primer muestro, el análisis de los resultados de este se realizó dividiendo la zona en 3 transectas perpendiculares a la costa y una paralela a la costa. La transecta 1 corresponde a las estaciones 3, 4 y 5, la transecta 2 a las estaciones 1, BJ y 2, y por último la transecta 3 a las estaciones 6, 7 y 8. La transecta comprende las estaciones 4, BJ y 7 (**Figura 5**).



**Figura 5** a) Posiciones de las transectas perpendiculares a la costa y b) Posición de la transecta paralela a la costa, donde el punto rojo indica la posición de la balsa jaula.

### *Temperatura*

La temperatura en la zona de estudio (**Figura 6**) fluctuó entre 11,65 y 12,96 °C, donde las mayores temperaturas se encontraron asociadas a la capa superficial (primeros 5-10 metros de la columna de agua). A medida que aumentó la profundidad la temperatura disminuyó. Se observó una distribución homogénea en las transectas perpendiculares a la costa al igual que la transecta paralela a la costa.

### *Salinidad*

La salinidad (**Figura 7**), fluctuó entre 34,63 y 34,71, donde el límite inferior de salinidad estuvo asociado al primer metro de profundidad a lo largo de la transecta 2. En las transectas restantes (1 y 3) se observó que la menor salinidad fue de 34,65, isohalina que se profundiza en la transecta 3 desde la estación 6 hacia la 8. La mayor salinidad fue observada entre los 20 y 30 m de profundidad en las estaciones cercanas a la costa.

### *Oxígeno disuelto*

El contenido de oxígeno disuelto (O<sub>2</sub>) en la zona de estudio (**Figura 8**) fluctuó entre 1,83 y 4,46 mL L<sup>-1</sup> en la zona de estudio. La concentración de oxígeno disminuyó con la

profundidad. Además, se observó que las mayores concentraciones estuvieron asociadas a la estación balsa jaula (EST-BJ).

### *Clorofila*

La mayor concentración de clorofila estuvo asociada a la EST 1 a la profundidad de 5 m con un valor de 0,232 mg cl-a m<sup>-3</sup> y la menor concentración asociada a la EST 2 a la profundidad de 5 m con un valor de 0,0867 mg cl-a m<sup>-3</sup> (**Tabla 3**)

**Tabla 3** Concentración de Clorofila-a observada en las estaciones EST 1, EST-BJ, EST2 y EST3.

Estación	Profundidad	mg cl-a/m <sup>3</sup>
1	0	0,095
	5	0,232
	10	0,211
bj	0	0,170
	5	0,127
	10	0,155
2	0	0,087
	5	0,153
	10	0,223
6	0	0,148
	5	0,095
	10	0,175

### Diagrama T-S

Mediante el diagrama (**Figura 9**) T-S se observó que el agua presente en la zona de estudio se encuentra entre las isopícnas de 26,5 y 26 kg m<sup>-3</sup>, considerando la presencia de las masas ecuatorial subsuperficial (AESS) y subantártica. (ASAA), con porcentajes de dominancia de un 77% y un 23% respectivamente. Además, se observó una nula presencia de masa de agua subtropical (AST).

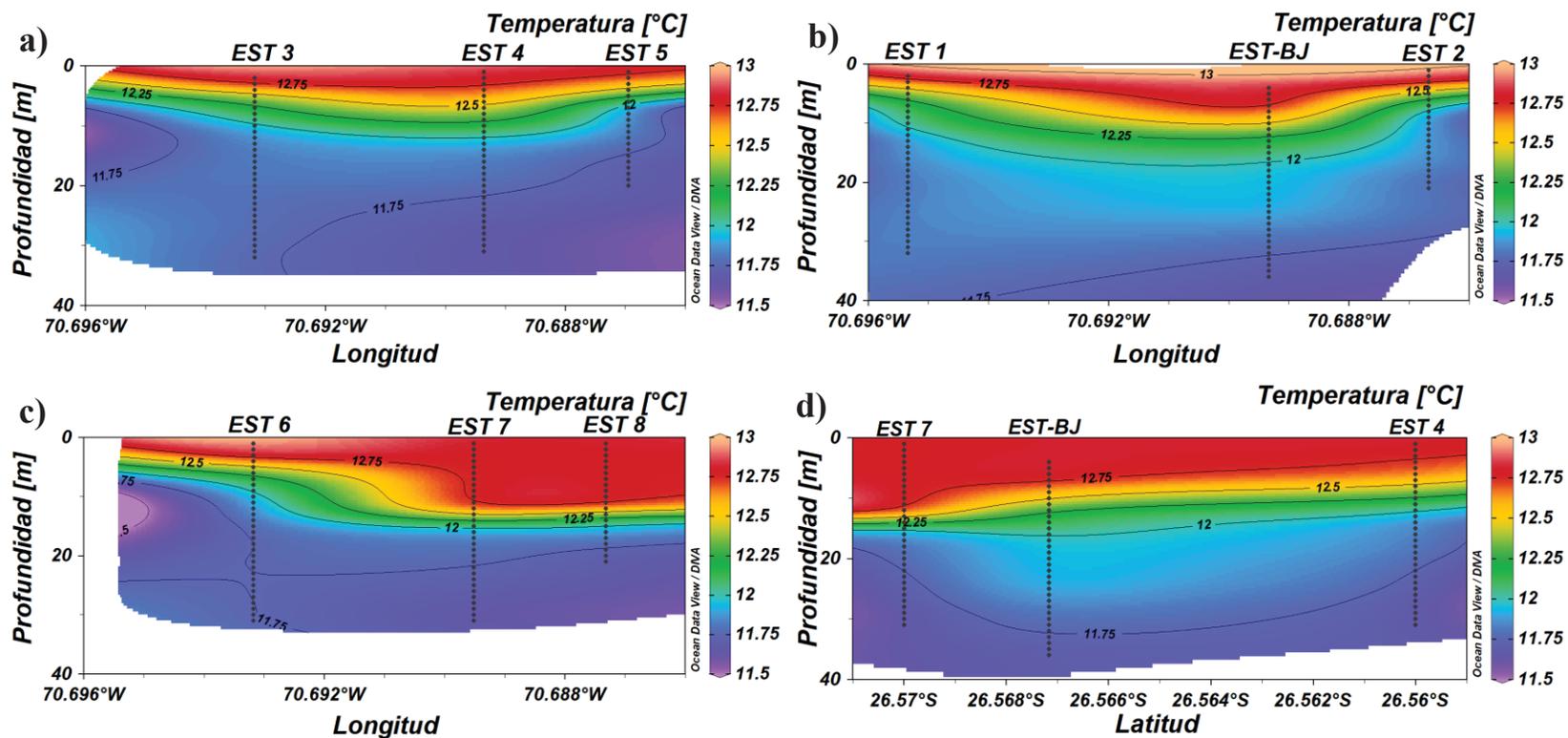


Figura 6 Distribución vertical de la Temperatura, a) Transecta 1, b) Transecta 2, c) Transecta 3 y d) Transecta 4.

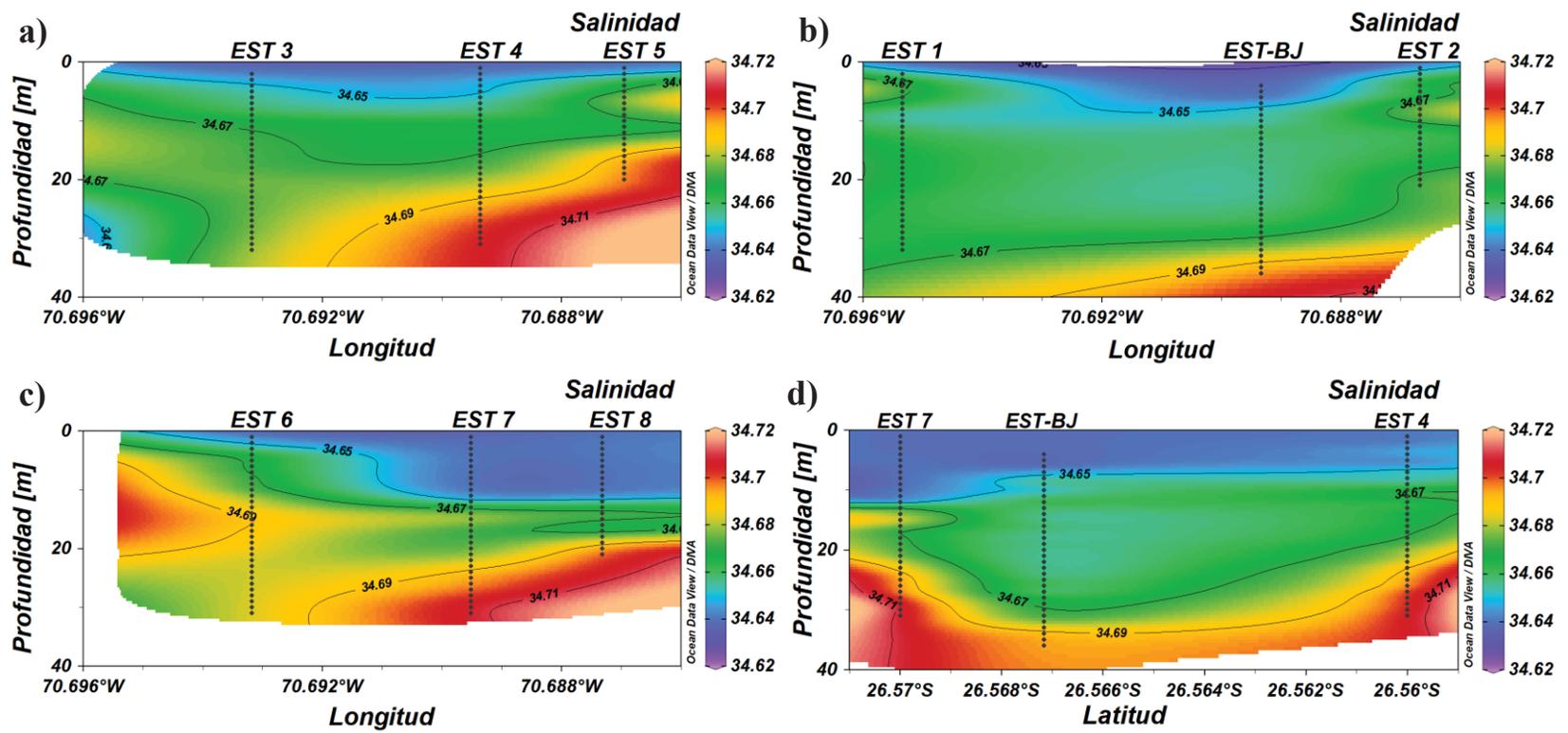


Figura 7 Distribución vertical de la Salinidad, a) Transecta 1, b) Transecta 2, c) Transecta 3 y d) Transecta 4.

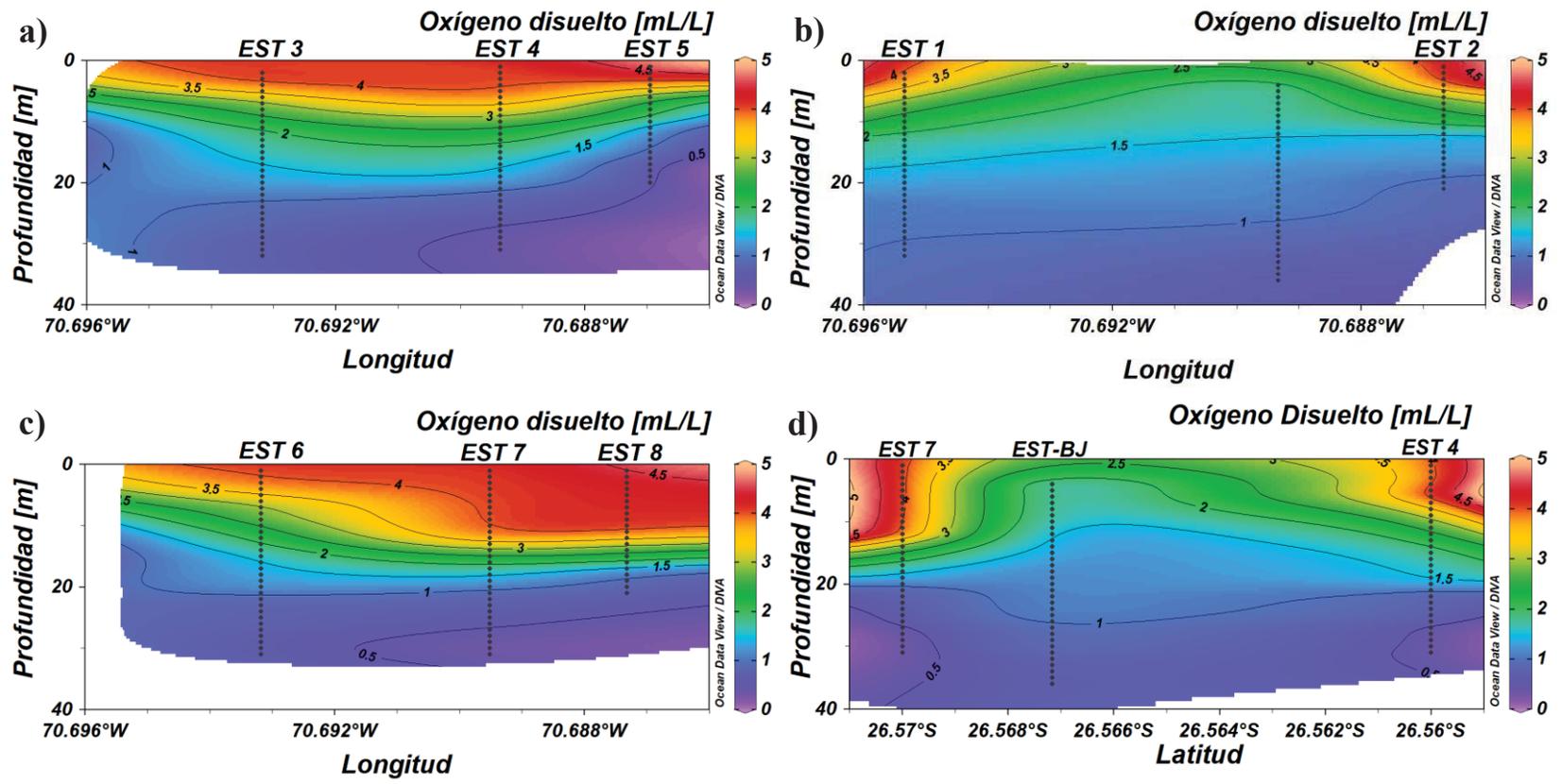


Figura 8 Distribución vertical de Oxígeno disuelto, a) Transecta 1, b) Transecta 2, c) Transecta 3 y d) Transecta 4.

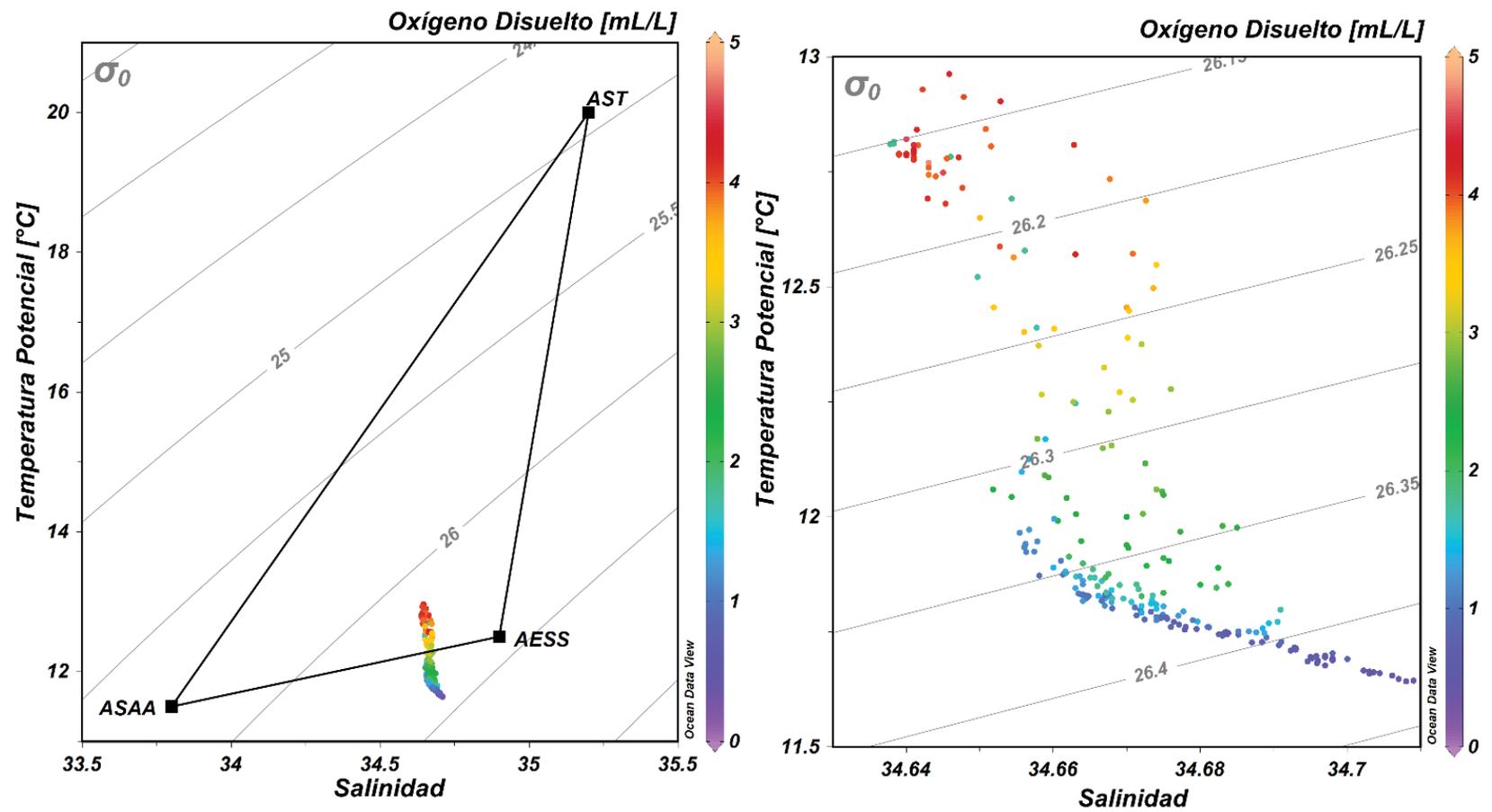


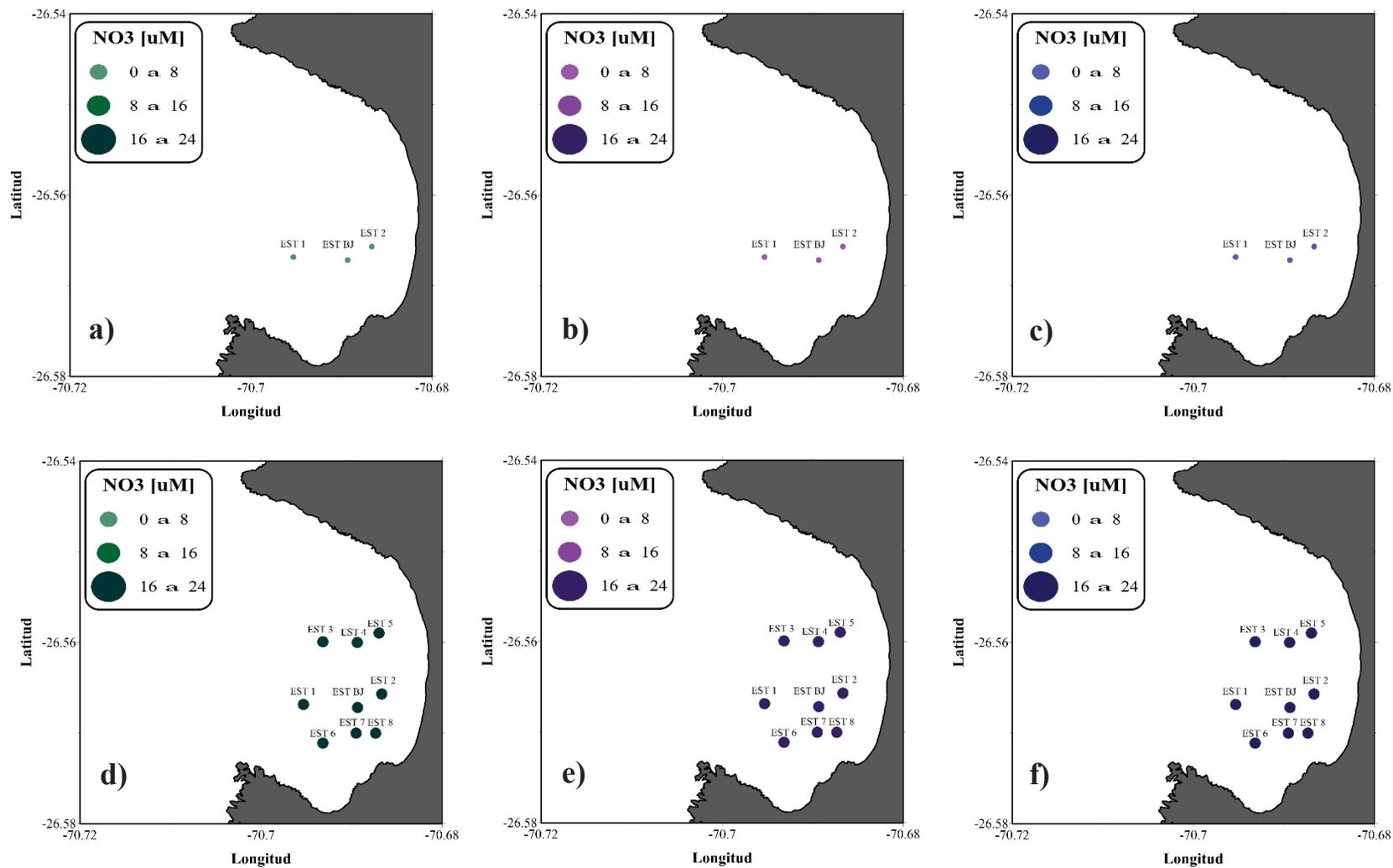
Figura 9 Diagrama T-S en la bahía Flamenco, octubre 2017

## 6.2 Distribución de nutrientes y amonio en bahía Flamenco

### 6.2.1 Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )

En general en noviembre de 2016, la concentración de  $\text{NO}_3^-$  observado en la **Figura 10 a, b y c**, fluctuó entre 0,97 y 4,97  $\mu\text{M}$  (60,14 y 308,14  $\text{mg L}^{-1}$ ), ambos límites registrados en la EST2 a 0 y 10 m, respectivamente. A 0 y 5 m las mayores concentraciones de nitrato se encontraron en la EST-BJ. Todas las estaciones mostraron un aumento de la concentración de nitrato con la profundidad, alcanzando el máximo en la EST2 a 10 m.

En octubre de 2017, la concentración de  $\text{NO}_3^-$  observado en la **Figura 10 d, e y f**, fluctuó entre 20,81 y 22,57  $\mu\text{M}$  (1251,16 y 1399,34  $\text{mg L}^{-1}$ ), donde la mayor concentración fue encontrada a 10 m en la EST5 y la menor concentración a 5 m en la EST6. En general observó que no hay gran diferencia de concentración entre las estaciones, pero si una diferencia con el muestreo anterior del mes de noviembre de 2016.

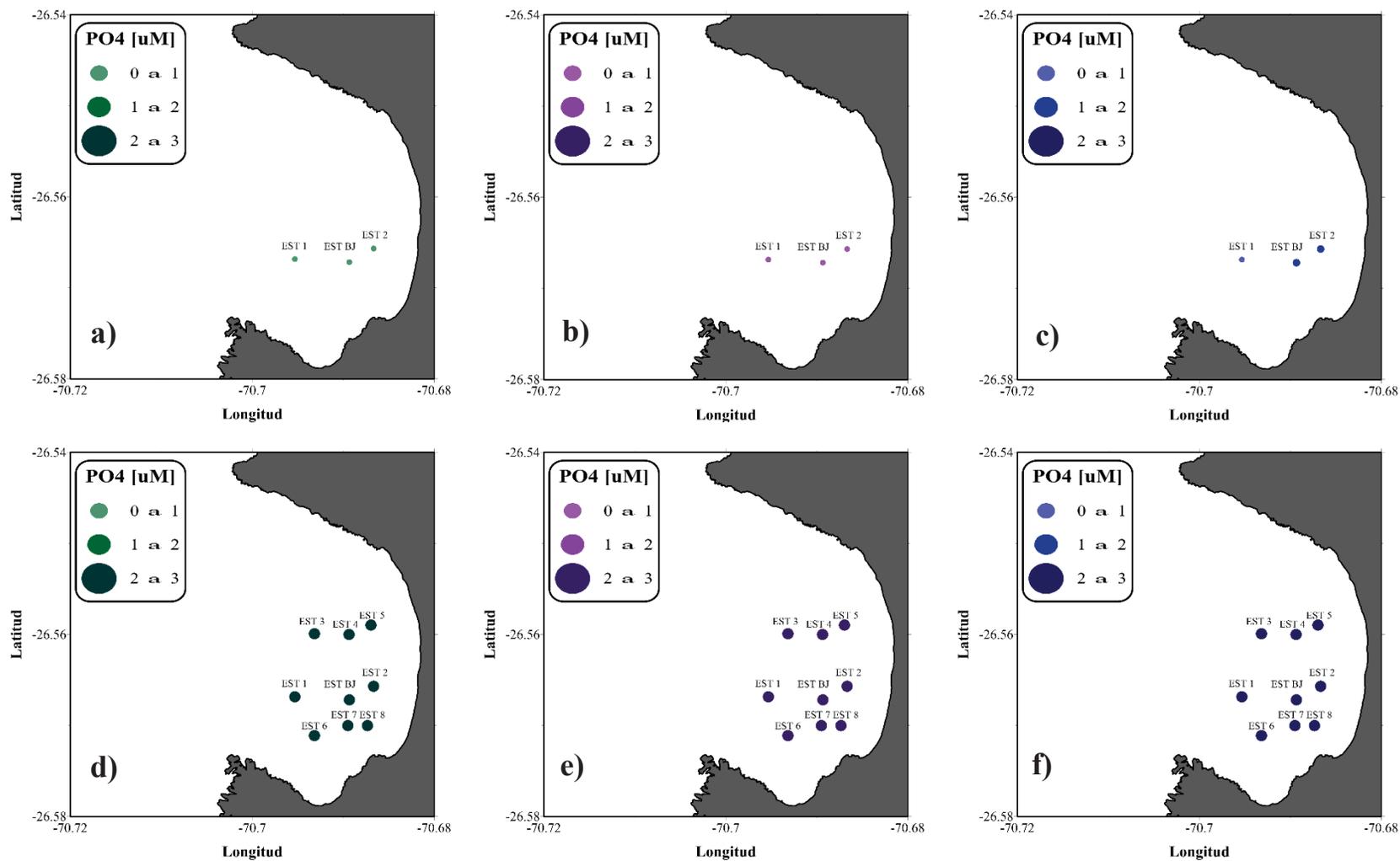


**Figura 10** Distribución de  $\text{NO}_3^-$  en a) 0 m (verde), b) 5 m (púrpura) y c) 10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f) 10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017.

### 6.2.2 Fosfato ( $PO_4^{3-}$ )

El contenido de  $PO_4^{3-}$  observado en noviembre de 2016 (**Figura 11 a, b y c**), fluctuó entre 0,57 y 1,23  $\mu M$  (54,15 y 116,85  $mg L^{-1}$ ). A 0 m la menor concentración fue de 0,66  $\mu M$  (62,7  $mg L^{-1}$ ) en la EST-BJ y la máxima concentración fue de 0,74  $\mu M$  (70,3  $mg L^{-1}$ ) en la estación EST2. A 5 m la menor fue de 0,57  $\mu M$  (54,15  $mg L^{-1}$ ) en la estación EST1 y la máxima fue de 0,87  $\mu M$  (82,65  $mg L^{-1}$ ) en la EST-BJ. Por último, a 10 m la mínima concentración fue de 0,93  $\mu M$  (88,36  $mg L^{-1}$ ) en la estación EST1 y la máxima fue de 1,23  $\mu M$  (116,85  $mg L^{-1}$ ) en la estación EST2. La estación BJ presentó un aumento de las concentraciones de fosfato en profundidad alcanzando un valor de 1,04  $\mu M$  a 10 m, no así en las otras estaciones.

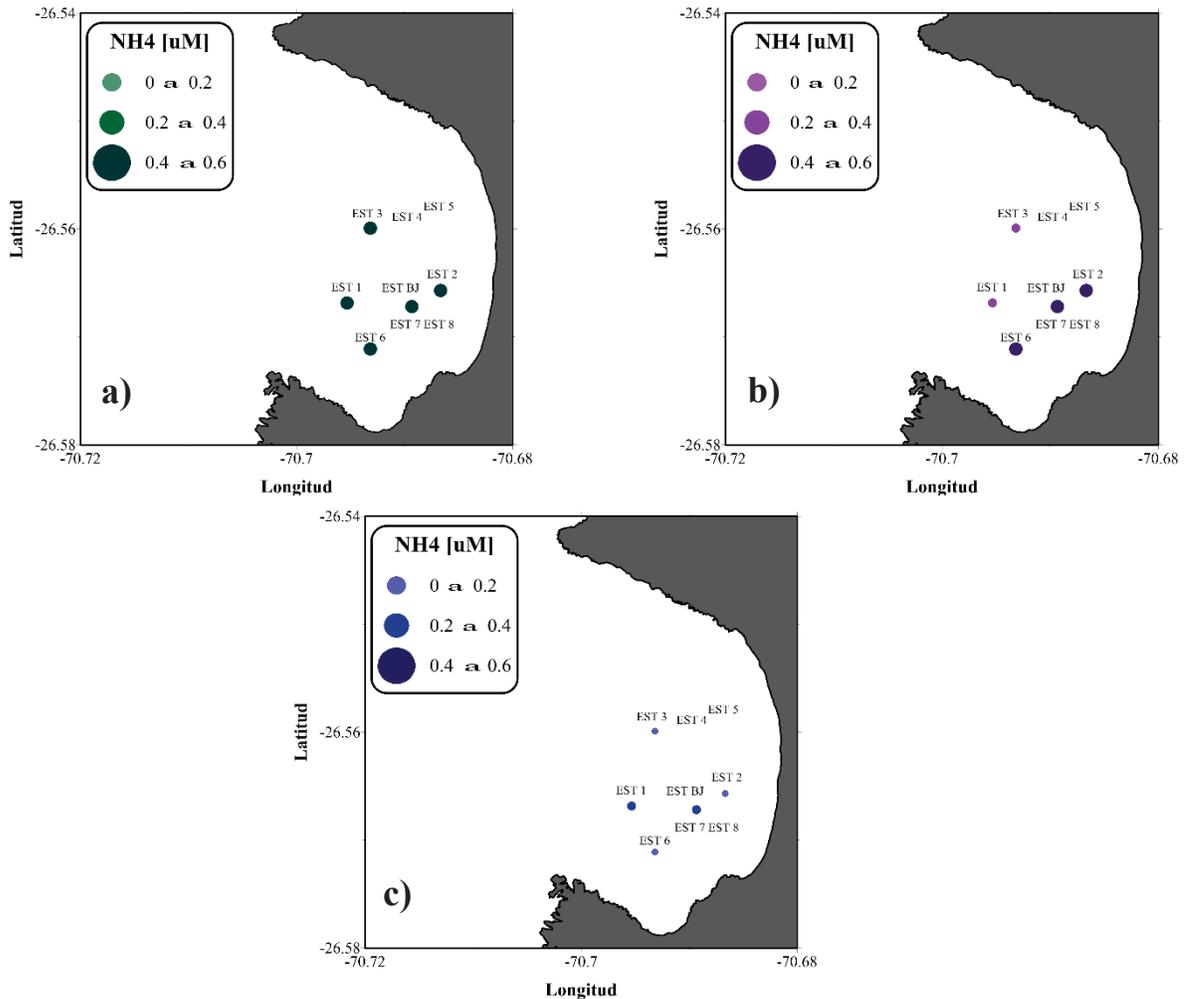
En el mes de octubre de 2017 (**Figura 11 d, e y f**), el contenido de  $PO_4^{3-}$  fluctuó entre 2,69 y 2,95  $\mu M$  (255,55 y 280,25  $mg L^{-1}$ ), siendo hasta aproximadamente 5 veces la observada en noviembre de 2016. La mayor concentración se observó a 10 m en la EST5 y la mínima concentración a 0 m de la EST1. Al igual que en las concentraciones de nitrato no se observó diferencia de concentraciones entre las estaciones muestreadas, pero sí un aumento con relación al mes de noviembre de 2016.



**Figura 11** Distribución de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> en a) 0 m (verde), b) 5 m (púrpura) y c) 10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f) 10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017.

### 6.2.3 Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )

Las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  el mes de octubre de 2017 (**Figura 12**), fluctuaron entre 0,11 y 0,53  $\mu\text{M}$  (1,98 y 9,54  $\text{mg L}^{-1}$ ). Las mayores concentraciones se encontraron a 0 m de profundidad en todas las estaciones muestreadas (EST1, EST-BJ, EST3, EST6), las que superaron los 0,4  $\mu\text{M}$  (7,2  $\text{mg L}^{-1}$ ). A 5 m se encontraron concentraciones entre los 0,2 y 0,6  $\mu\text{M}$  (3,6 y 10,8  $\text{mg L}^{-1}$ ), donde los menores valores se asociaron a las estaciones EST1 y EST3. Finalmente, a 10 m de profundidad se observaron las menores concentraciones de todas, las que fueron menores a 0,2  $\mu\text{M}$  (3,6  $\text{mg L}^{-1}$ ) asociadas a las estaciones EST2, EST 3 y EST6. En cuanto a la balsa jaula, en esta estación se observó que la concentración de amonio disminuyó con la profundidad, alcanzando un valor de 0,37  $\mu\text{M}$  (6,66  $\text{mg L}^{-1}$ ).



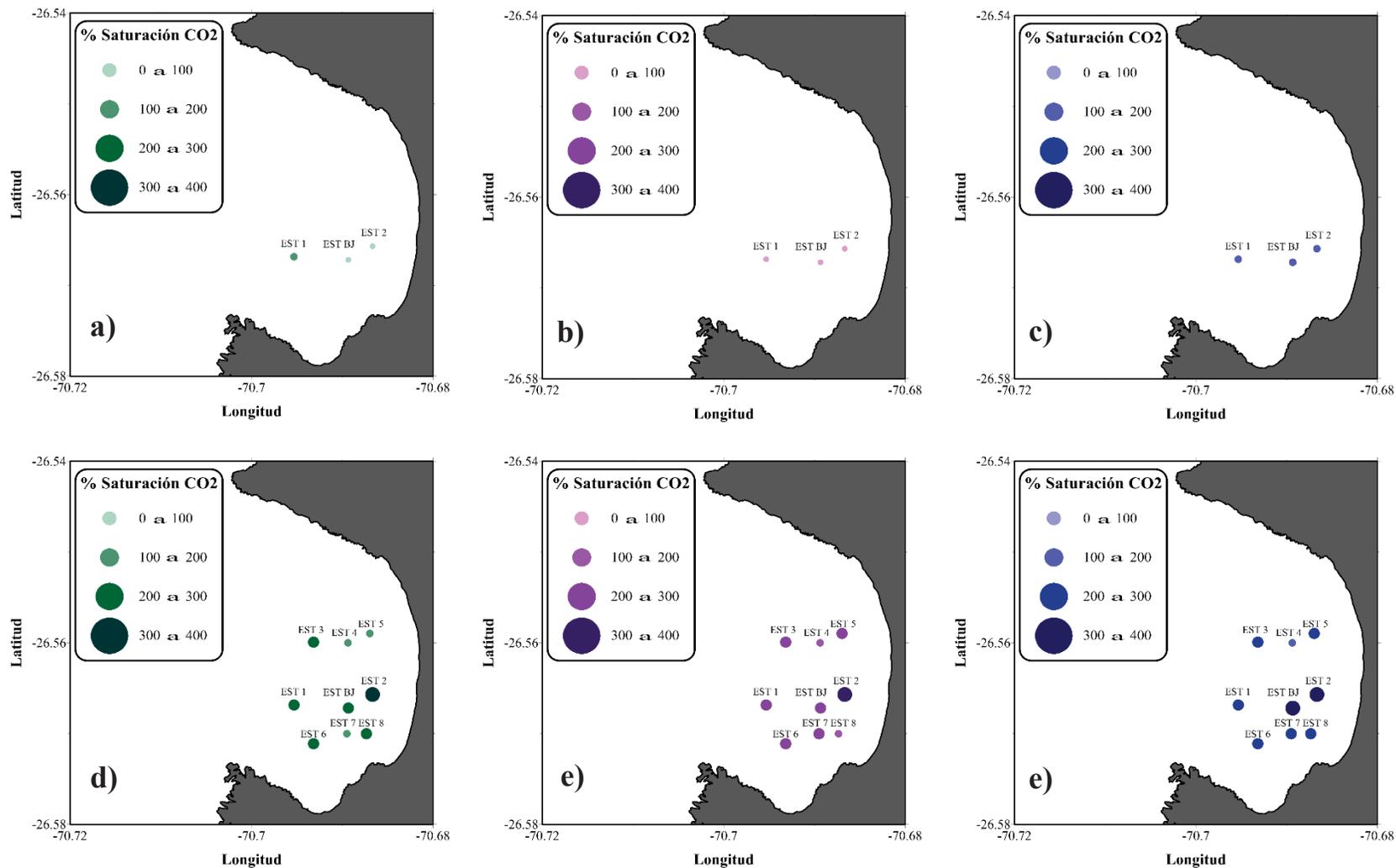
**Figura 12** Distribución de  $\text{NH}_4^+$  en a) 0 m (verde), b) 5 m (purpura) y c) 10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017.

### 6.3 Distribución de GEI en bahía Flamenco

#### 6.3.1 Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

La concentración de CO<sub>2</sub> observada en el mes de noviembre de 2016 (**Figura 13 a, b y c**), fluctuó entre 12,3 y 17,3  $\mu\text{M}$  (0,28 y 0,39  $\text{mL L}^{-1}$ ). A 0 m se presentó una mínima de 12,6  $\mu\text{M}$  (94% de saturación, EST2, 0,29  $\text{mL L}^{-1}$ ) y una máxima de 16,8  $\mu\text{M}$  (122 % de saturación, EST1, 0,38  $\text{mL L}^{-1}$ ). A 5 m de profundidad se registró un comportamiento similar que, a 0 m, donde la mínima fue de 12,3  $\mu\text{M}$  (92% de saturación, EST2, 0,28  $\text{mL L}^{-1}$ ) y una máxima de 13,8  $\mu\text{M}$  (99% de saturación, EST1, 0,31  $\text{mL L}^{-1}$ ). Tanto a 0 como a 5 m se observó que las concentraciones disminuyeron desde la estación más alejada de la costa hacia la estación más cercana a la costa. Por último, a 10 m de profundidad se observó un comportamiento inverso a las anteriores profundidades, donde la mínima concentración se registró en la EST1 (15,7  $\mu\text{M}$ , 111 % de saturación, 0,35  $\text{mL L}^{-1}$ ) y la máxima concentración en la EST2 (17,3  $\mu\text{M}$ , 122 % de saturación, 0,39  $\text{mL L}^{-1}$ ). A esta profundidad, la EST-BJ presentó un aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> en profundidad.

En el mes de octubre de 2017 (**Figura 13 d, e y f**), las concentraciones de CO<sub>2</sub> fueron relativamente similares en todas las profundidades de muestreo. Se observó que a medida que la profundidad aumentó las concentraciones también lo hicieron en todas las estaciones. Los mayores valores de % de saturación se observaron en la EST2 (0, 5 y 10 m) y en EST-BJ (10 m). Los menores valores de % de saturación se observaron en la EST4 (0, 5 y 10 m).

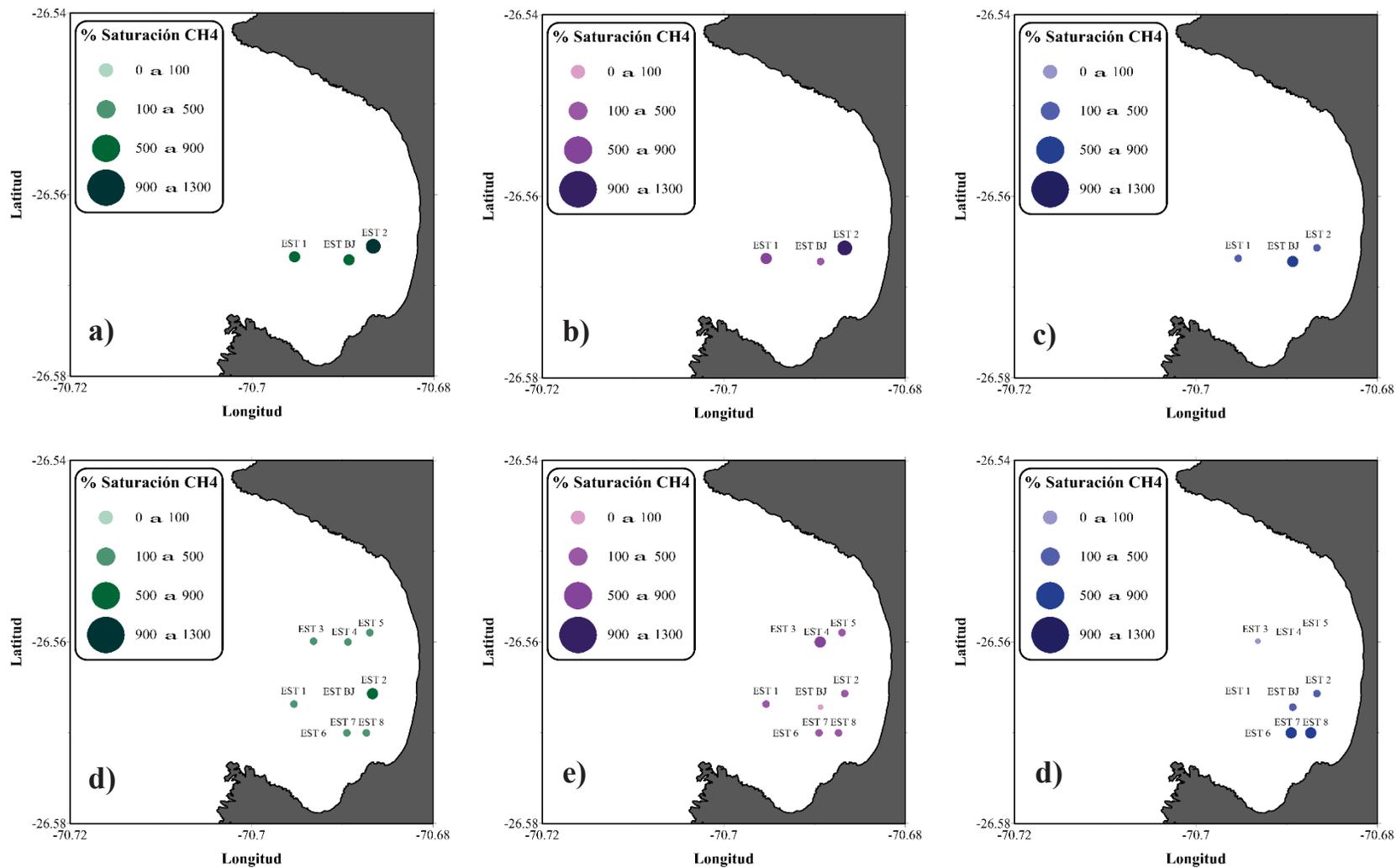


**Figura 13** Distribución de CO<sub>2</sub> en a) 0 m (verde), b) 5 m (púrpura) y c) 10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f) 10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017.

### 6.3.2 Metano ( $CH_4$ )

La concentración de  $CH_4$  observada en el mes de noviembre de 2016 (**Figura 14 a, b y c**), presentó gran variación en su contenido, la que fluctuó entre 5,8 y 27,5  $\mu\text{M}$  (0,13 y 0,62  $\text{mL L}^{-1}$ ) en la zona de estudio. A 0 m de profundidad se registró un aumento de las concentraciones desde la estación más alejada a la costa hacia la estación más cercana a la costa, con una mínima de 19,6  $\mu\text{M}$  (844% de saturación, EST1, 0,44  $\text{mL L}^{-1}$ ) y una máxima de 22,8 (992% de saturación, EST2, 0,51  $\text{mL L}^{-1}$ ). A 5 m de profundidad se presentó una mínima de 10,8  $\mu\text{M}$  (462% de saturación, EST- BJ, 0,24  $\text{mL L}^{-1}$ ) y una máxima de 27,5  $\mu\text{M}$  (1178% de saturación, EST2, 0,62  $\text{mL L}^{-1}$ ). Por último, a 10 m de profundidad se presentó una mínima de 5,8  $\mu\text{M}$  (246% de saturación, EST2, 0,13  $\text{mL L}^{-1}$ ) y una máxima de 19  $\mu\text{M}$  (816% de saturación, EST-BJ, 0,43  $\text{mL L}^{-1}$ ). La zona de estudio se encontró subsaturada de metano.

En el mes de octubre de 2017 (**Figura 14 d, e y f**), se observó que la zona de estudio estuvo sobresaturada de metano en todas las estaciones y a todas las profundidades. Las mayores saturaciones se observaron en la EST2 (0 m), EST 7 (10 m) y EST8 (10 m). La menor saturación observada estuvo en la EST-BJ (5 m) y en EST3 (10 m).

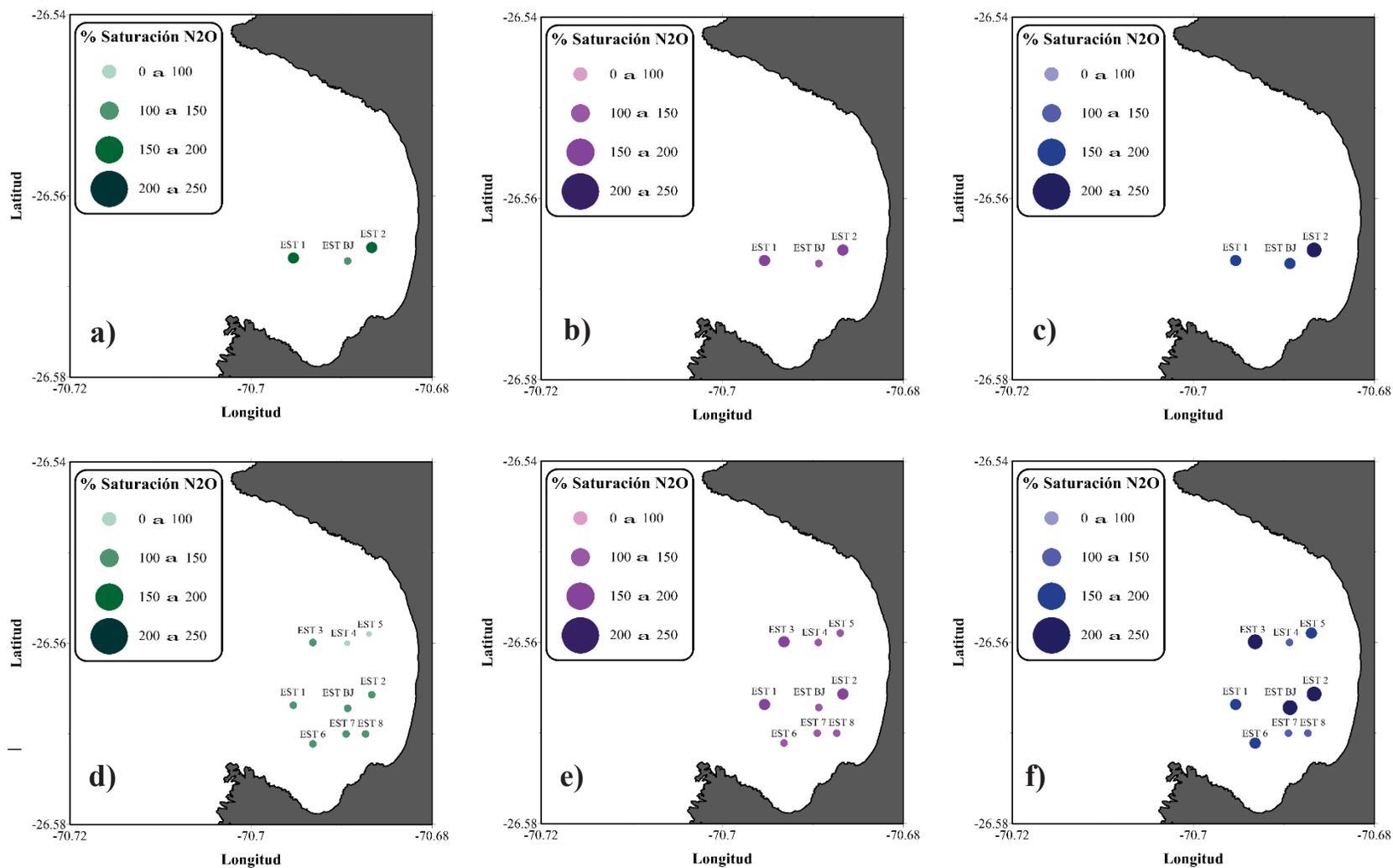


**Figura 14** Distribución de CH<sub>4</sub> en a) 0 m (verde), b) 5 m (púrpura) y c) 10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f) 10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017.

### 6.3.3 Óxido nitroso ( $N_2O$ )

La concentración de  $N_2O$  en noviembre de 2016 (**Figura 15 a, b y c**), fluctuó entre 11,9 y 18,1 nM (0,00026 y 0,0004 mL L<sup>-1</sup>) en la zona de estudio, valores que se encuentran sobre la concentración de saturación. A 0 m se presentó una mínima de 12,1 nM (151% de saturación, EST2, 0,00027 mL L<sup>-1</sup>) y una máxima de 13,2 nM (160% de saturación, EST1, 0,00029 mL L<sup>-1</sup>). A 5 m se presentó una mínima de 11,9 nM (144% de saturación, EST-BJ, 0,00026 mL L<sup>-1</sup>) y una máxima de 14 nM (171% de saturación, EST2, 0,00031 mL L<sup>-1</sup>). Por último, a 10 m se presentó una mínima de 14,6 nM (173% de saturación, EST1, 0,00032 mL L<sup>-1</sup>), la cual aumentó al pasar por la balsa jaula (EST-BJ) y hacia la EST2 (18,1 nM, 216% de saturación, 0,0004 mL L<sup>-1</sup>).

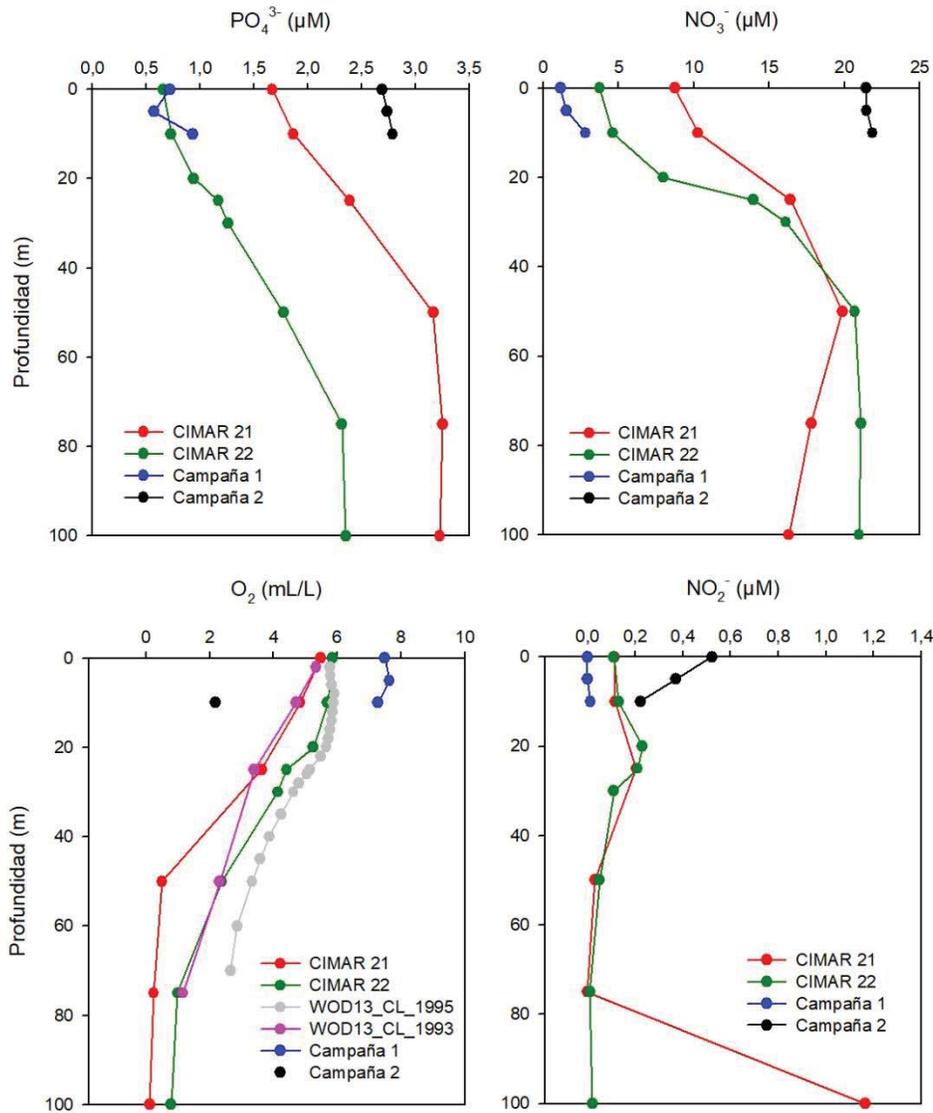
En el mes de octubre de 2017 (**Figura 15 d, e y f**), las concentraciones fluctuaron entre 10,08 y 22,93 nM (0,00022 y 0,00051 mL L<sup>-1</sup>), límites observados en EST8 (10m) y EST2 (10m). Los mayores porcentajes de saturación estuvieron asociados a la profundidad de 5 y 10 m y en las estaciones EST1, EST2, EST3 y EST-BJ, EST2, EST3 respectivamente. En cuanto a los menores % de saturación, estos se observaron a 0m en las estaciones EST4 y EST5.



**Figura 15** Distribución de N<sub>2</sub>O en a) 0 m (verde), b) 5 m (púrpura) y c) 10 m (azul) del cultivo total, noviembre 2016. d) 0 m (verde), e) 5 m (púrpura) y f) 10 m (azul) del cultivo parcial, octubre 2017.

#### 6.4 Variabilidad natural de bahía Flamenco

La **Figura 16**, presenta la comparación entre de fosfato, nitrato, oxígeno disuelto y nitrito de las estaciones del CIMAR 21, CIMAR 22, WOD\_93 y WOD\_95 con la estación EST1 (considerada como control) de ambas campañas de muestreo. Esta estación en noviembre de 2016 presentó concentraciones de nutrientes y de oxígeno disuelto que se encuentran dentro de los rangos observados en muestreos anteriores. En cambio, en octubre de 2017, estas concentraciones fueron diferentes que lo encontrado en muestreos anteriores.

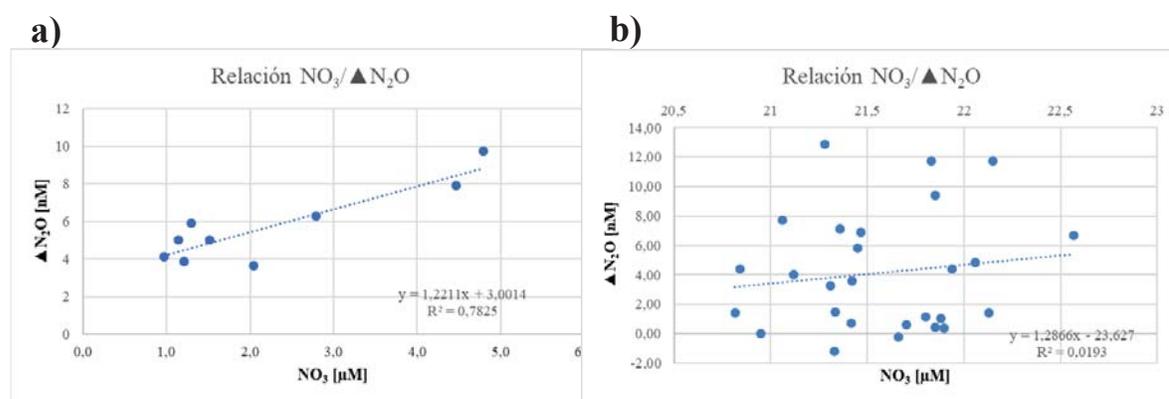


**Figura 16** Comparación de nutrientes y oxígeno disuelto entre las estaciones CIMAR 21, CIMAR 22, WOD\_95, WOD\_93 y la EST1 de ambas campañas de muestreo.

## 6.5 Relaciones $NO_3^-/\Delta N_2O$ , $NO_3^-/AOU$ , $\Delta N_2O/AOU$ .

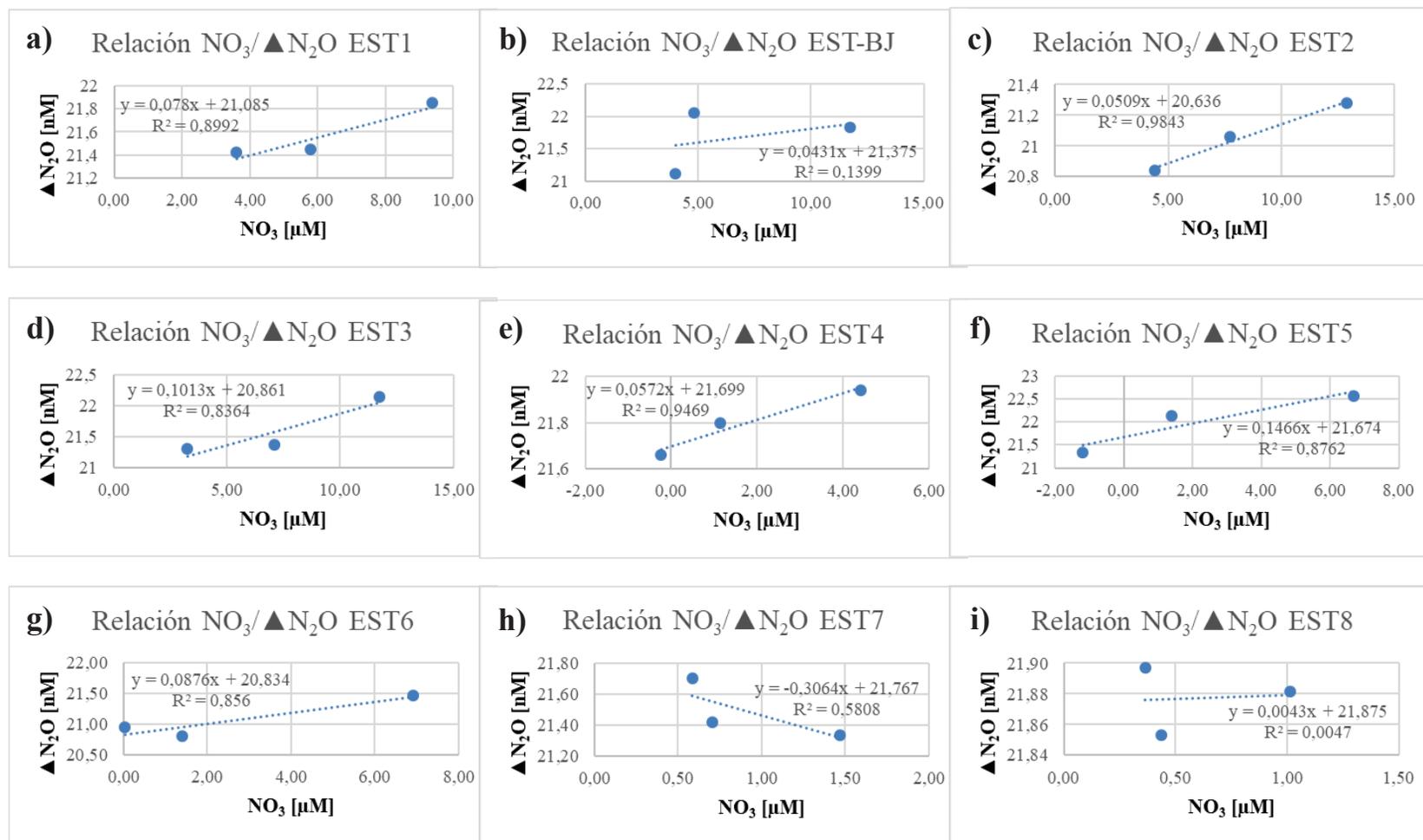
### 6.5.1 $NO_3^-/\Delta N_2O$

En la **Figura 17**, se observa la relación  $NO_3^-/\Delta N_2O$ , un proxie para determinar la posible influencia de la nitrificación en la producción de  $N_2O$ . En el mes de noviembre de 2017 (**Figura 17 a**), se observó una relación directamente proporcional entre ambas variables ( $R^2= 0,78$ ). En el mes de octubre de 2017 (**Figura 17 b**) se observó que hay una falta de correlación entre ambas variables ( $R^2= 0,0193$ ).



**Figura 17** Relación  $NO_3^-/\Delta N_2O$  para a) Periodo cultivo total, noviembre 2016 y b) Periodo cultivo parcial, octubre 2017.

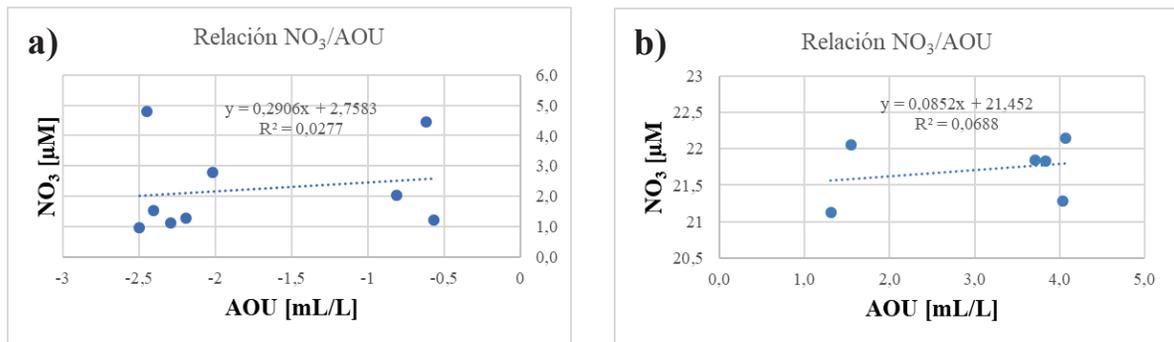
Analizando por separado las estaciones de la campaña de octubre de 2017 (**Figura 18**), se obtuvo que EST1 ( $R^2= 0,8992$ ), EST2 ( $R^2= 0,9843$ ), EST3 ( $R^2= 0,8364$ ), EST4 ( $R^2= 0,9469$ ), EST5 ( $R^2= 0,8762$ ) y EST6 ( $R^2= 0,856$ ) presentaron una relación directamente proporcional y significativa entre ambas variables. Las estaciones EST-BJ, EST7 y EST8 no presentaron una buena correlación entre las variables ( $R^2= 0,1399$ ;  $0,5880$ ,  $0,0047$ ; respectivamente).



**Figura 18** Relación NO<sub>3</sub>/▲N<sub>2</sub>O para cada una de las estaciones muestreadas a) EST1, b) EST-BJ, c) EST2, d) EST3, e) EST4, f) EST5, g) EST6, h) EST7 y i) EST8 en el periodo de cultivo parcial, octubre 2017.

### 6.5.2 $\text{NO}_3^-/\text{AOU}$

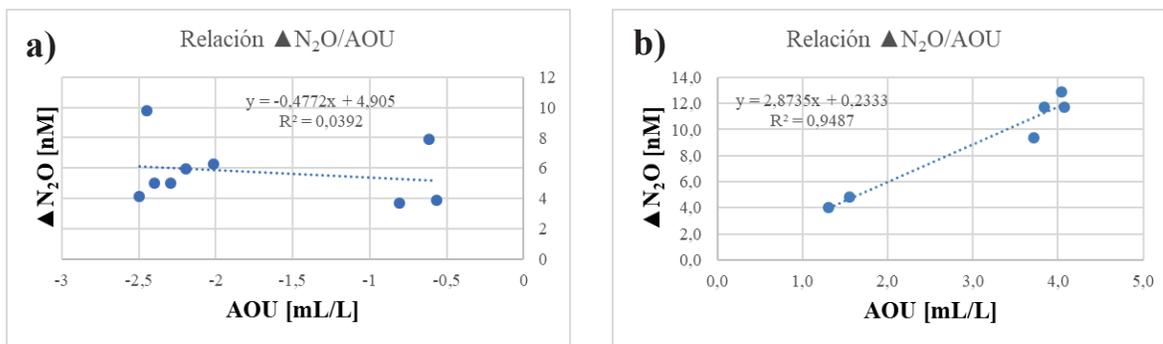
En **Figura 19** se observa la relación entre la concentración de  $\text{NO}_3^-$  y el AOU. En ambos muestreos no se presenta una relación significativa entre ambas variables. Además, los rangos de concentración de ambas variables fueron diferentes entre campañas. Mientras que en noviembre de 2016 las concentraciones de oxígeno muestran una producción en todas las profundidades muestreadas (i.e., AOU negativos) y bajas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  (**Figura 19 a**). En octubre de 2017 las concentraciones de oxígeno fueron menores al equilibrio, indicando un consumo de oxígeno (i.e., AOU positivos) y altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  (**Figura 19 b**).



**Figura 19** Relación  $\text{NO}_3^-/\text{AOU}$  para a) Periodo cultivo total, noviembre 2016 y b) Periodo cultivo parcial, octubre 2017

### 6.5.3 $\blacktriangle \text{N}_2\text{O}/\text{AOU}$

En la **Figura 20**, se observa la relación entre  $\blacktriangle \text{N}_2\text{O}$  y AOU. En el mes de noviembre de 2016 (**Figura 20 a**), no se observa una relación significativa entre ambas variables ( $R^2 = 0,0392$ ). En cambio, en el mes de octubre de 2017 (**Figura 20 b**) se observa una relación significativa ( $R^2 = 0,9487$ ) y directamente proporcional, lo que indica que se está produciendo  $\text{N}_2\text{O}$  y consumiendo  $\text{O}_2$ .



**Figura 20** Relación  $N_2O/AOU$  para a) Periodo cultivo total, noviembre 2016 y b) periodo cultivo parcial, octubre 2017.

### 6.6 Comparación de las estaciones EST1, EST-BJ y EST2 en el periodo con cultivo total y el periodo con cultivo parcial.

Con el objetivo de comparar la importancia de la Balsa Jaula en cada uno de los muestreos, considerando un muestreo con alta carga de peces en el cultivo (cultivo total) y otro con baja carga (cultivo parcial) se realizó una comparación entre las estaciones de la transecta 2, estaciones que se repitieron en ambos muestreos.

En la comparación a 0 m (**Tabla 4**) se observó que entre la EST-BJ y EST1, en el cultivo total las proporciones de  $N_2O$  fueron menores (i.e., mayores concentraciones en EST1) que las del cultivo parcial, estas se encontraron relativamente iguales (i.e., una relación aproximada de 1:1). En cambio, en nutrientes como el fosfato se observó que, en el cultivo total la balsa jaula se encontró con un  $\sim 40\%$  menos que en la EST1, no así en el cultivo parcial que mantuvo una relación aproximada de 1:1. En cuanto al nitrato las proporciones fueron relativamente similares siendo mayor en el cultivo total. Las proporciones entre EST-BJ y EST2, en cuanto al  $N_2O$  se mantuvieron relativamente similares, siendo mayor en el cultivo total y con una relación 1:1. El nitrato tuvo mayor proporción en el cultivo total, indicando que la balsa jaula fue un  $\sim 24\%$  mayor que la EST1, al contrario del fosfato que fue un  $\sim 10\%$  menor en la balsa jaula con respecto a la EST1, en

cambio en el cultivo parcial estas proporciones se mantuvieron con una relación 1:1 aproximadamente.

**Tabla 4** Proporciones entre los muestreos durante el cultivo total y el cultivo parcial a 0 m de profundidad.

<b>Variable</b>	<b>(EST BJ / EST1 ) * 100 % (0m)</b>		<b>(EST BJ / EST2 ) * 100 % (0m)</b>	
<b>Gases</b>	Cultivo total	Cultivo parcial	Cultivo total	Cultivo parcial
N <sub>2</sub> O [nM]	92,42	103,00	100,83	97,65
%Sat N <sub>2</sub> O	91,25	102,92	96,69	97,24
O <sub>2</sub> [mL L <sup>-1</sup> ]	77,57	-	76,15	-
<b>Nutrientes</b>				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [µM]	106,14	98,60	124,74	101,34
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> [µM]	57,89	101,49	89,19	100,74

A 5 m (**Tabla 5**), se observó que la EST-BJ la proporción de N<sub>2</sub>O fue menor al 100% con respecto a EST1 y EST2. En cuanto a los nutrientes, se observó que hubo un comportamiento inverso al del óxido nitroso, teniendo proporciones mayores a 100% en el cultivo total indicando que las mayores concentraciones estuvieron en la balsa jaula, en cambio en el cultivo parcial se encontraron relativamente similares entre las proporciones EST-BJ/EST1 y EST-BJ/EST2.

**Tabla 5** Proporciones entre los muestreos durante el cultivo total y el cultivo parcial a 5 m de profundidad.

<b>Variable</b>	<b>(EST BJ / EST1 ) * 100 % (5m)</b>		<b>(EST BJ / EST2 ) * 100 % (5m)</b>	
<b>Gases</b>	Cultivo total	Cultivo parcial	Cultivo total	Cultivo parcial
N <sub>2</sub> O [nM]	90,15	92,91	85,00	82,80
%Sat N <sub>2</sub> O	90,00	94,30	84,21	83,71
O <sub>2</sub> [mL L <sup>-1</sup> ]	78,90	-	81,90	-
<b>Nutrientes</b>				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [µM]	134,21	102,84	158,14	104,75
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> [µM]	152,63	99,27	135,94	98,19

A 10 m (**Tabla 6**), se observó que entre la EST-BJ y EST1, las proporciones de N<sub>2</sub>O fueron mayores al 100% en ambos periodos indicando mayores concentraciones en la balsa

jaula que en la EST1, comportamiento que no se observó para el oxígeno donde las proporciones fueron menores al 100% en ambos periodos, pero se presentó una mayor diferencia de O<sub>2</sub> en el cultivo total que en el cultivo parcial. En cuanto a los nutrientes se observó que en el cultivo total las proporciones fueron mayores al 100% (i.e., mayor concentración de nutrientes en EST-BJ), no así en el cultivo parcial que se presentaron cerca del 100% indicando una relación aproximada de 1:1.

Entre EST-BJ y EST2, se observó que en ambos periodos las proporciones de N<sub>2</sub>O y O<sub>2</sub> fueron menores al 100% indicando mayores concentraciones en EST2. En cuanto a los nutrientes, el nitrato la mayor proporción se presentó en el cultivo parcial pero cercana al 100% indicando aproximadamente una relación 1:1 al igual que en el cultivo total pero con menos aproximación, por otro lado el fosfato presentó valores bajo el 100% indicando mayor concentración en EST2 en ambos periodos, pero en el cultivo parcial esta diferencia fue menor que en el cultivo total.

**Tabla 6** Proporciones entre los muestreos durante el cultivo total y el cultivo parcial a 10 m de profundidad.

<b>Variable</b>	<b>(EST BJ / EST1 ) * 100 % (10m)</b>		<b>(EST BJ / EST2 ) * 100 % (10m)</b>	
	<b>Cultivo total</b>	<b>Cultivo parcial</b>	<b>Cultivo total</b>	<b>Cultivo parcial</b>
<b>Gases</b>				
N <sub>2</sub> O [nM]	110,27	111,36	88,95	94,03
%Sat N <sub>2</sub> O	113,29	112,89	90,74	96,05
O <sub>2</sub> [mL L <sup>-1</sup> ]	79,81	91,74	75,45	69,69
<b>Nutrientes</b>				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [μM]	159,86	99,91	93,11	102,58
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> [μM]	111,83	98,57	84,55	97,17

## 6.7 Análisis estadístico

### 6.7.1 Análisis estadístico entre periodo con cultivo total y periodo con cultivo parcial.

El test de Mann-Whitney (**Tabla 7**) arrojó que entre periodos se observó que las variables, como el contenido de  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{O}_2$ , presentan diferencias significativas en sus concentraciones, en cambio al contenido de  $\text{N}_2\text{O}$  no presenta diferencias significativas en ambos periodos de muestreo.

**Tabla 7** Test de Mann-Whitney para las variables entre campañas de muestreo.

Test de Mann-Whitney	VARIABLES					
	$\text{NO}_3$	$\text{PO}_4^{-3}$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{O}_2$
Mann-Whitn U	0	0	106	0	31	0
z	-4,4211	-4,4262	-0,548	-4,4208	-2,6564	-3,1286
p	9,82E-02	9,59E-06	0,5833	9,83E-06	0,0078989	0,0017561

### 6.7.2 Análisis estadístico entre las estaciones EST1, EST BJ y EST 2 del periodo con cultivo total.

El test de Kruskal-Wallis (**Tabla 8**) presentó que las variables de las estaciones del muestreo de noviembre de 2016 no tuvieron diferencias significativas entre sí.

**Tabla 8** Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para las variables entre las estaciones de la campaña 1, noviembre 2016

Test de Kruskal- Wallis	VARIABLES					
	$\text{NO}_3$	$\text{PO}_4^{-3}$	$\text{N}_2\text{O}$	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{O}_2$
H (chi2)	0,2667	0,6222	0,6222	1,156	0,8	5,756
Hc	0,2267	0,6222	0,6222	1,156	0,8	5,853
p	0,8752	0,7326	0,7326	0,5611	0,6703	0,05358

### 6.7.3 Análisis estadístico entre las estaciones EST1, EST BJ y EST 2 del periodo con cultivo parcial.

El test de Kruskal-Wallis (**Tabla 9**) presentó que las estaciones no tuvieron diferencias significativas en las variables muestreadas en la campaña de octubre de 2017, exceptuando el dióxido de carbono, que obtuvo una diferencia significativa entre las estaciones.

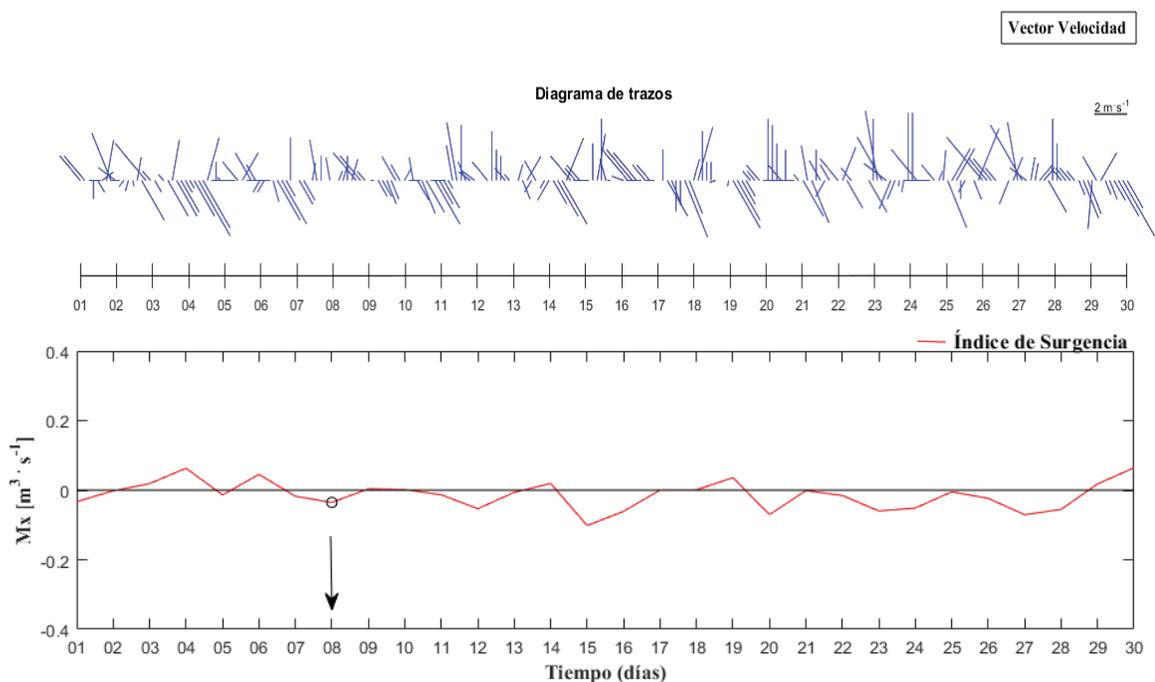
**Tabla 9** Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para las variables entre las estaciones de la campaña 2, octubre 2017.

Test de Kruskal- Wallis	VARIABLES						
	NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	NH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>
H (chi2)	4,267	0,6222	0,6222	3,467	3,929	0,8	-
Hc	4,267	0,6222	0,6222	3,467	3,929	0,8	-
p	0,1184	0,7326	0,7326	0,1767	0,1403	0,6703	-

## 6.8. Análisis de la surgencia

### 6.8.1 Noviembre, 2016

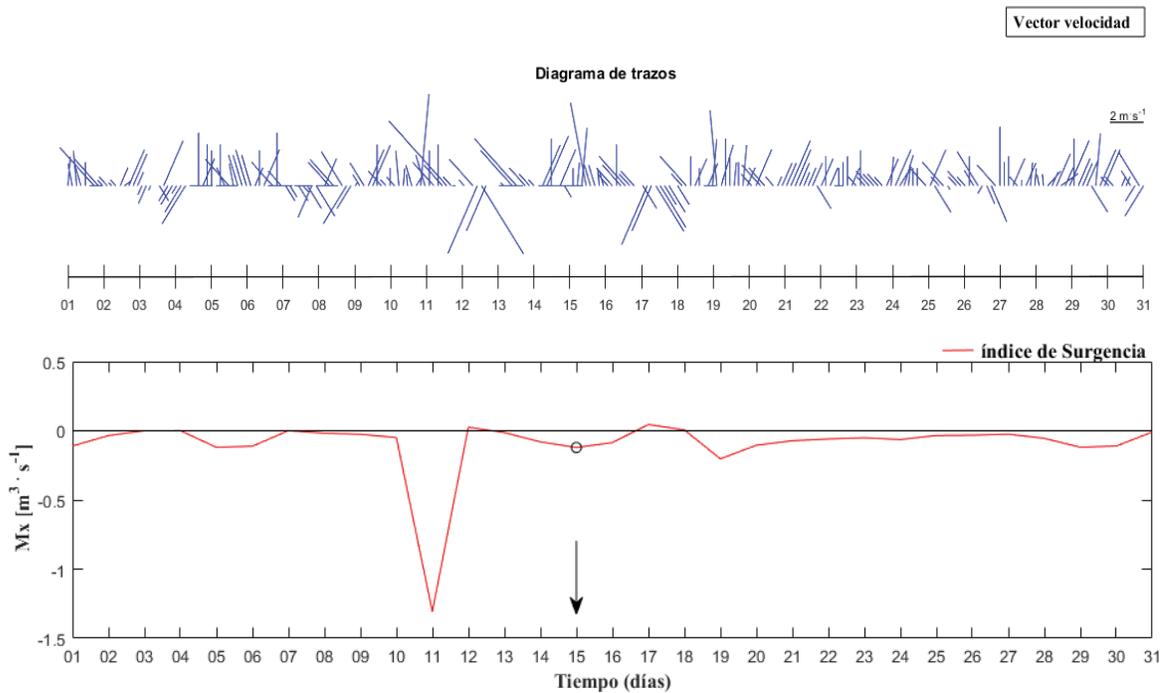
El análisis de vientos durante el mes de noviembre (**Figura 21**) indicó que los primeros 15 días del mes hubo vientos de baja intensidad, provenientes de SE, NW y NE con velocidades de aproximadamente  $2 \text{ m s}^{-1}$ . El día de muestreo (8 noviembre) se presentó viento S con velocidades menores a  $2 \text{ m s}^{-1}$ , lo que provocó un índice de surgencia negativo ( $-0,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) indicando que hubo una leve surgencia costera el día de muestreo.



**Figura 21** Serie de tiempo para a) viento observado y b) índice de surgencia, noviembre 2016.

### 6.8.2 Octubre, 2017

El análisis de vientos durante el mes de octubre de 2017 (**Figura 22**) indicó que se presentaron vientos de intensidad del orden de 2 a 4 m s<sup>-1</sup>, principalmente con direcciones provenientes del S y de menor frecuencia de NW y NE. Entre los días 9 y 12 se observó un índice de surgencia negativo (-1.7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) indicando un evento de surgencia. En tanto que para el día de muestreo (15 de octubre), los vientos fueron principalmente del S con velocidades de 4 ms<sup>-1</sup>, lo que provocó un índice de surgencia negativo pero menor orden de magnitud que los días previos (-0,1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>), indicando una leve surgencia.



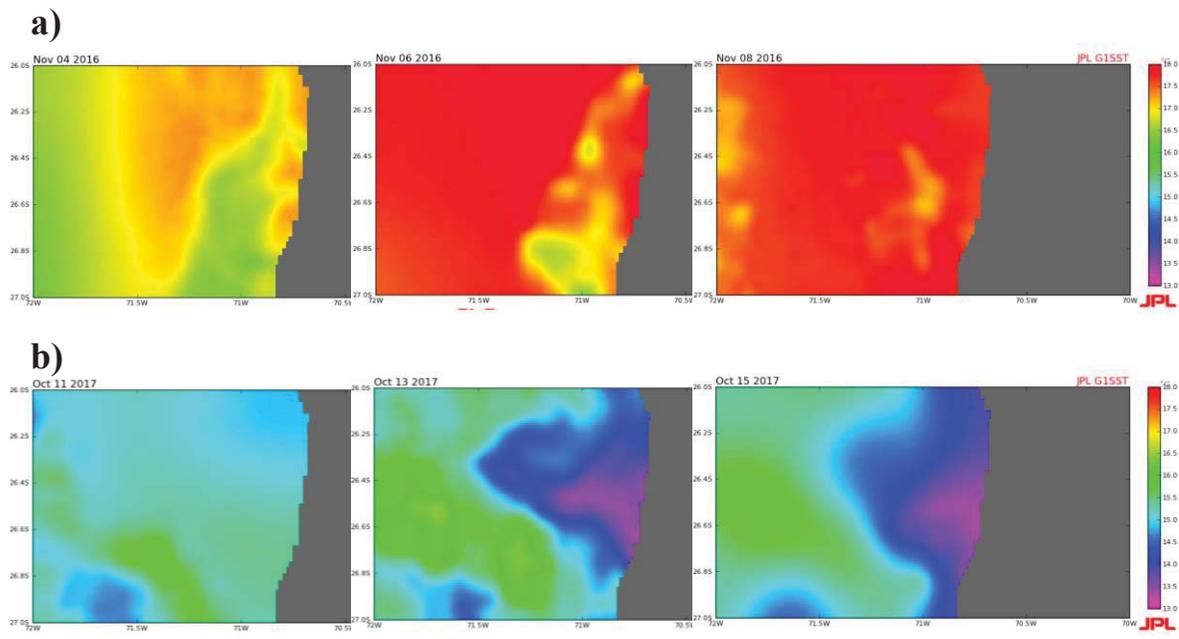
**Figura 22** Serie de tiempo para a) viento observado y b) índice de surgencia, octubre 2017.

## 7. DISCUSIÓN

La acuicultura, actualmente, ha registrado un crecimiento significativo y rápido entre los sectores productivos y se ha convertido en una industria globalmente sólida y vital. Sin embargo, se ha demostrado que a veces tiene el potencial de causar impactos ambientales (FAO, 2017). Los cultivos oceánicos tienen la ventaja de que se localizan en sectores abiertos en donde la circulación ayuda a dispersar los productos de la actividad. Sin embargo, existen variables medioambientales que en este tipo de cultivo son más difíciles de manejar tal como las que presenta el sistema de cultivo de este estudio en bahía Flamenco (e.g., presencia y variabilidad vertical de la ZMO, procesos e surgencia, tormentas, etc).

En el presente estudio, en los dos muestreos contemplados (8 de noviembre de 2016 y 15 de octubre de 2017) se observó parte de esta variabilidad ambiental física y biogeoquímica las cuales presentaron diferencias estadísticamente significativas

En noviembre de 2016 (i.e., cultivo total), las aguas superficiales presentaron anomalías positivas de temperatura respecto del promedio histórico (16°C, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA), mientras que lo contrario se observó en octubre de 2017 (i.e., cultivo parcial) donde se observaron anomalías negativas en la TSM (15,1°C). El Pacífico Sur oriental, por una parte, presentó fuertes anomalías positivas de TSM en el segundo semestre de 2016 (hasta 4°C) las que se vieron reflejadas durante la campaña de noviembre (**Figura 23 a**). Las bajas temperaturas del día de muestreo de octubre de 2017, localmente se pueden ver asociada a un evento de surgencia. Estos eventos son frecuentes a lo largo de todo el año en el norte de Chile, pero presentan mayor intensidad en primavera-verano (Montecino *et al.*, 2006), Las imágenes satelitales de TSM muestran este proceso (**Figura 23 b**) donde se observa el ascenso de agua más fría entre los días 11 y 15 de octubre. Estos eventos de surgencia transportan agua de la capa subsuperficial rica en nutrientes, pero pobres en oxígeno, hacia a la superficie. En este contexto el cultivo de seriola de la zona de estudio está eventualmente sometido a masas de agua con estas características.



**Figura 23** Imágenes de la TSM de los días previos y el día de muestreo para a) cultivo total (4-8 nov 2016) y b) cultivo parcial (11-15 oct 2017)

Bajo esta consideración, ambos muestreos en bahía Flamenco incluyeron estaciones que podrían haber sido influenciadas por el cultivo. Sin embargo, la comparación de las estaciones más alejadas de la costa (EST1, considerada en este trabajo como estación control) con las condiciones biogeoquímicas observadas en otras campañas oceanográficas anteriores en estaciones cercanas a la bahía (i.e., CIMAR 21, CIMAR 22, WOD\_93 y WOD\_95, **Figura 3**), corroboró que todas ellas presentaron condiciones biogeoquímicas similares. Esto permitió considerar las condiciones biogeoquímicas observadas en las estaciones control de bahía Flamenco como condiciones biogeoquímicas naturales con una variabilidad temporal propia.

Las altas concentraciones de nutrientes observadas en la EST1 de la campaña de octubre de 2017 dan cuenta de esta variabilidad, en donde un evento de surgencia se caracterizó por presentar altas concentraciones de nutrientes en la capa superficial ( $\text{NO}_3^-$  y

$\text{PO}_4^{3-}$ , **Figura 16**). Esta fertilización de la zona fótica de la columna de agua estimula la producción primaria (Freon *et al.*, 2009). En EST1 de noviembre de 2016, en cambio, las bajas concentraciones de nutrientes estuvieron relacionadas a períodos sin un evento de surgencia.

Estas diferencias biogeoquímicas entre una campaña y otra podrían permitir observar con mayor claridad o enmascarar algún impacto de la actividad asociada al cultivo (i.e., alimentación, respiración de peces, excreción, etc). Además, se debe considerar que la primera de estas campañas correspondió a un período de alta carga de individuos de seriola en el sistema de cultivo (~700 individuos), mientras que la segunda campaña, la carga del cultivo fue considerablemente menor (~182 individuos).

Durante el cultivo total (CT) en noviembre de 2016, la estación realizada en la balsa jaula (EST-BJ) presentó concentraciones de oxígenos menores que en las demás estaciones. La menor concentración de oxígeno tendría origen en su utilización para la degradación de compuestos orgánicos. Estos compuestos orgánicos provendrían de mayor aporte de materia orgánica, tanto a través de la comida que no es consumida por los peces como por las fecas de los peces, y en el aporte de compuestos nitrogenados (excreción de amonio) (**Figura 25 Anexo**). Las concentraciones de nutrientes en EST-BJ también dan cuenta de este aporte del cultivo (**Tabla 6**) donde existió un aumento de 60% de nitrato y 12 % de fosfato respecto de la misma profundidad en la estación control. Estas concentraciones aumentaron en un 7 y 16% en nitrato y fosfato respectivamente hacia la costa (EST2), lo cual sugiere una alta actividad de remineralización asociada a los productos del cultivo (Fernandes & Tanner, 2008.). El producto de estos procesos de respiración en ambientes óxicos, como es el caso de la zona de estudio, es  $\text{CO}_2$ . Los resultados muestran que la distribución espacial de  $\text{CO}_2$  (% de saturación de  $\text{CO}_2 > 100\%$ ) aumentó desde la estación control hacia la costa, pasando por EST-BJ, concordando con los resultados obtenidos anteriormente.

Uno de los productos de la remineralización de la materia orgánica y que también es

excretado por los peces, es el amonio, compuesto lábil y rápidamente utilizado tanto por organismos fotosintéticos quienes lo asimilan como fuente de nitrógeno, como por los organismos quimiosintetizadores como las bacterias y arqueas nitrificantes, quienes lo utilizan como dador de electrones. Estos últimos, bacterias y arqueas, oxidan el amonio transformándolo en nitrito y luego en nitrato. Este último compuesto es el que aumentó en el cultivo. Pero la nitrificación produce además de nitrato, cantidades traza del gas de efecto invernadero  $N_2O$  (Oudot *et al.*, 1990), por lo que un aumento en las tasas de nitrificación debieran verse reflejadas en una mayor acumulación de  $N_2O$ , tal como se observó en la zona de estudio (**Figura 15 a, b y c, Tabla 6**). Las relaciones entre  $\Delta N_2O$  y  $NO_3^-$ , AOU y  $\Delta N_2O$  y entre AOU y  $NO_3^-$  son utilizadas como aproximación para determinar la producción de  $N_2O$  por nitrificación (Yoshimari, 1976; Oudot *et al.*, 1990; Elkins *et al.*, 1978; Cline *et al.*, 1987), en este periodo se presentó una relación lineal positiva y significativa ( $R^2=0,7825$ ) entre  $\Delta N_2O$  y  $NO_3^-$  i.e., ambas variables aumentaron (**Figura 18 a**) la cual sería la única aproximación a lo mencionado anteriormente debido a que ni la relación entre AOU y  $\Delta N_2O$  y la relación entre AOU y  $NO_3^-$  presentaron una relación lineal y significativa entre ellas (**Figura 19 a, Figura 20 a**). Además, se observaron sobresaturaciones de  $CH_4$  en toda la extensión del muestreo alcanzando sobresaturaciones sobre los 1000%. La superficie del océano actúa como una fuente neta de  $CH_4$  atmosférico, aunque su liberación es menor en comparación a las fuentes terrestres (Cicerone & Oremland, 1988).

Si bien el aumento de  $CO_2$  y  $N_2O$  solo consideró un 10 y 20% respectivamente, en referencia a la estación control, las sobresaturaciones significan que eventualmente el exceso de ambos gases será transferido a la atmósfera donde forman parte de los inventarios globales de gases de efecto invernadero, contribuyendo al aumento de la temperatura (IPCC, 2013). Estos procesos se ven reflejados en las tres estaciones muestreadas puesto que la distancia entre las estaciones no fue la suficiente (~100 m) para que no interactuaran entre sí por las corrientes marinas, y esta podría ser una de las razones de que no se presenten diferencias significativas entre las estaciones y sus variables (**Tabla 10, 11, 12, 13, 14**).

Durante el cultivo parcial (CP) las estaciones muestreadas presentaron concentraciones similares en cuanto al contenido de O<sub>2</sub> y nutrientes (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>). Por una parte, las concentraciones de oxígeno fueron menores a los registrados en el CT, mientras que el contenido de nutrientes fue considerablemente mayor (hasta 5 y veces lo observado para nitrato y fosfato en noviembre de 2016). Estas diferencias estarían asociadas al evento de surgencia ocurrido cerca de la fecha de muestreo, debido a que el ascenso de aguas subsuperficiales con alto contenido de nutrientes y bajo contenido de O<sub>2</sub>. Esta fertilización de la capa superficial gatilla los afloramientos costeros (Graco *et al.*, 2007) y la alta productividad de la región. Sin embargo las concentraciones de clorofila-a fueron bajas (~0,161 mg cl-a m<sup>-3</sup> en promedio, **Tabla 3**) lo que según Small & Menzies (1981) caracterizan como agua “limpia” de fitoplancton ([cl-a] < 1 mg cl-a m<sup>-3</sup>). Esto característico de una surgencia activa, en la cual se produce un periodo de retardo que se asocia al tiempo que necesitan estos organismos para que ocurra el consumo de los nutrientes transportados por las aguas recientemente afloradas (Ahumada, 1989). Esto permite inferir que los procesos de la capa superficial que aumentan las concentraciones de oxígeno y clorofila-a (i.e., fotosíntesis e intercambio océano-atmósfera) no han tenido el tiempo suficiente para ocurrir (Ahumada, 1989). Esta sería la razón de que las concentraciones de nutrientes fueron homogéneas entre las estaciones y en profundidad, generando una zona con concentraciones relativamente similares en el área de estudio con una relación aproximada de 1:1 (**Tabla 4**, **Tabla 5**, **Tabla 6**). Así, este cultivo con una carga de individuos baja en un periodo en donde existe surgencia activa, no modifica las condiciones biogeoquímicas (en este caso nutrientes y oxígeno).

En cuanto a los GEI, el CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> solo algunas estaciones contaron con mediciones por lo que la comparación no fue posible. Sin embargo, las estaciones con la que se cuentan datos presentaron sobresaturación de estos gases, lo cual, al igual que para las otras variables biogeoquímicas, respondería al transporte de aguas subsuperficiales con alto contenido de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (Bakun *et al.*, 2010). En el caso del N<sub>2</sub>O las concentraciones aumentaron desde la estación control hacia la EST2 en todas las profundidades muestreadas (**Tabla 4**, **Tabla 5**, **Tabla 6**). En este periodo la relación entre ▲N<sub>2</sub>O y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y entre AOU y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no presentó

una relación lineal y significativa entre ellas, pero la relación entre AOU y  $\Delta N_2O$  sí presentó una relación lineal y significativa ( $R^2= 0,9487$ ). Esta falta de correlación entre las variables se debería a que el origen del  $N_2O$  provendría de las aguas subsuperficiales en donde las bajas concentraciones de oxígeno favorecen la ocurrencia de otros procesos de remineralización de la materia orgánica de forma anaeróbica como la desnitrificación. La ocurrencia de desnitrificación y con ello la utilización del  $NO_3^-$  y la producción de  $N_2O$  no se relacionan con las concentraciones de oxígeno. Este mecanismo entonces genera déficit de nitrato y aumento de  $N_2O$ . Bajo este escenario las relaciones que permiten sugerir a la nitrificación como proceso responsable de las concentraciones de  $N_2O$  son bajas o no existen.

Finalmente, todo lo presentado sugiere que la hipótesis planteada en el presente trabajo de titulación sea rechazada, debido a que, si bien existe un impacto asociado a la balsa jaula durante un ambiente no sometido a surgencia activa, este no es estadísticamente significativo. Es por esto que se recomienda realizar un estudio con mayor frecuencia temporal en la zona y así determinar un posible impacto de un cultivo offshore de *Seriola lalandi* sobre la biogeoquímica de la columna de agua.

## 8. CONCLUSIÓN

Las condiciones oceanográficas, tales como temperatura y oxígeno disuelto fluctuaron entre 16 y 18°C y 5,81 y 7,7 mL L<sup>-1</sup> respectivamente para noviembre de 2016, mientras que para octubre de 2017 estas variables fluctuaron entre 11,65 y 12,96°C y 1,83 y 4,46 mL L<sup>-1</sup> respectivamente.

Las condiciones biogeoquímicas, tales como las concentraciones de nitrato, fosfato, óxido nitroso, dióxido de carbono y metano fluctuaron entre 0,97 y 4,49 μM, 0,57 y 1,23 μM, 12,3 y 17,3 μM, 5,8 y 27,5 μM, 11,9 y 18,1 nM respectivamente para noviembre de 2016. En cambio, las variables de nitrato, fosfato y óxido nitroso fluctuaron entre 20,81 y 22,57 μM, 2,69 y 2,95 μM y 10,08 y 22,93 nM respectivamente para octubre de 2017.

Los principales cambios en las condiciones oceanográficas (T°C, S, O<sub>2</sub>) y biogeoquímicas (nutrientes y gases de efecto invernadero) estuvieron asociados al régimen de vientos del S y SW, es decir a la surgencia costera que se presentó en uno de los dos periodos (octubre de 2017) provocando una diferencia significativa entre ambos periodos de muestreo.

La presencia de un cultivo de seriola con una carga de aproximadamente 700 individuos genera condiciones biogeoquímicas asociadas a una mayor carga de materia orgánica (i.e., disminución de oxígeno, aumento de nutrientes inorgánicos, aumento de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, etc), pero en este estudio no se presentaron de manera significativa. Si bien el pez en cuestión es un depredador pelágico de grandes tasas metabólicas por lo que se liberan rápidamente materia orgánica al ambiente marino, la falta de respuesta estadísticamente significativa en este estudio refleja los bajos niveles de producción en bahía Flamenco en conjunto con su naturaleza relativamente abierta y expuesta de mayor manera a las corrientes.

Por lo tanto, debido a la falta de información que existe aún sobre esta bahía y también la de un muestreo más completo, se hace difícil establecer un posible impacto o un impacto significativo del cultivo de *Seriola lalandi* sobre las condiciones biogeoquímicas de la columna de agua de bahía Flamenco, pero aun así debe considerarse como una alerta temprana de lo que puede suceder si esta actividad continúa creciendo, por lo que la hipótesis de este trabajo de titulación es rechazada.

Se propone realizar un estudio de las condiciones oceanográficas y biogeoquímicas con mayor frecuencia temporal (semanal o mensual), en donde se abarque una profundidad continua, además de un estudio de sedimentos y corrientes en la zona de estudio. Esto tiene por objetivo abordar de manera más completa si los cultivos offshore generan impacto significativo sobre la columna de agua y sedimentos en la zona que se desee analizar.

## 9. REFERENCIAS

Acuicultura Marina. 2017. La (necesaria) planificación espacial de la acuicultura en mar abierto para la sostenibilidad futura. [<http://www.acuiculturamarina.com>]. Revisado: 27 junio 2016

Ahumada R. 1989. Producción y destino de la biomasa fitoplanctónica en un sistema de bahías en Chile central: Una hipótesis. *Biología Pesquera* 18: 53-66.

Bange, H. W. 2006. Nitrous oxide and methane in European coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 70(3), 361-374 pp.

Bakun, A. 1973. Daily and weekly upwelling indices west coast of North America, 1967-73. U.S. Commer. NOAA Tech. Rep. NMFS-SSRS-693, 113 pp.

Bakun, A. 1975. Daily and weekly upwelling indices, West Coast of North America, 1967-1973. U.S. Department of Commerce, NOAA Technical Reports, NMFS-SSRF, 693, 113 pp.

Bakun, A., Parrish, R. 1982. Turbulence, transport, and pelagic fish in the California and Peru Current System. *CalCOFI. Rep.*, XXIII, 99-112 pp.

Bakun, A. 1987. Monthly variability in the ocean habitat off Perú as deduced from maritime observations, 1953 to 1984. The Peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: three decades of changes. En: D. P. y. I. Tsukayama (ed.). *The Peruvian anchoveta and its upwelling ecosystem: three decades of changes ICLARM Studies and Reviews*, 15: 46-74 pp.

Bakun, A., Field, D. B., Redondo-Rodriguez, A. and Weeks, S. J. (2010), Greenhouse gas, upwelling-favorable winds, and the future of coastal ocean upwelling ecosystems. *Global Change Biology*, 16: 1213–1228 pp.

Barnes, R.S.K. & K. Mann. 1998. Fundamentals of aquatic ecology. 2nd edición. Blackwell Science, Oxford. 217 pp.

Carpenter, J. H. 1965. The Chesapeake Bay Institute technique for the Winkler dissolved oxygen method. *Limnol. Oceanogr.*, 10: 141-143 pp.

Cifuentes J., Torres M., Frías M. 1997. El océano y sus recursos II. Las ciencias del mar: oceanografía geológica y oceanografía química. Segunda Edición. Fondo De Cultura 17 Económica USA. México. 197 pp.

Clark T., 2007. Energy expenditure of the yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) at different swimming speeds: developing a bioenergetics model for Australian aquaculture. In: Innovative Solutions for Aquaculture: Spatial Impacts and Carrying Capacity—Further Developing, Refining, and Validating Existing Models of Environmental Effects of Finfish Farming (Final Report). SARDI Aquatic Sciences, Adelaide, Australia. 34-51 pp.

Cline J. D., D. P. Wisegarver., K. Kelly-Hansen. 1987. Nitrous oxide and vertical mixing in the equatorial Pacific during the' 1982-1983 El Niño. *Deep-sea Research*, 34, 857-873.

Cornejo M., Farías L., Paulmier A. 2006. Temporal variability in N<sub>2</sub>O water content and its air-sea exchange in an upwelling area off central Chile (36°S). *Mar. Chem.* 101, 85 – 94 pp.

Cicerone, R.J., Oremland, R.S., 1988. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemical Cycles* 2, 299–327 pp.

Del, I., Intergubernamental, G. 2014. Informe de síntesis. Oceanográfico, C., & Chile, N. (2008). *Ciencia y Tecnología del Mar*. 45-73 pp.

Ekman, W. 1905. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik. Band 2. N° 11.

Elkins J. W., S. C. Wofsy, M. B. McElroy, C. E. Kolb and W. A. Kaplan (1978) Aquatic sources and sinks for nitrous oxide. Nature, 275, 602-606.

FAO. 2017. Aquaculture development. Technical guidelines for responsible fisheries.

Fernandes, M., and J. Tanner. Modelling of nitrogen loads from the farming of yellowtail kingfish *Seriola lalandi* (Valenciennes 1833). Aquacult. Res., **39**: 1328–1338 (2008).

Freon, P., Barange, M., Aristegui, J., 2009. Eastern boundary upwelling ecosystems: integrative and comparative approaches. Prog. Oceanogr. 83, 1–14 pp.

Golburg R., Naylor R. L. 2005. Future seascapes fishing and fish farming. Frontiers in Ecology and Environment 3: 21-28 pp.

Graco, Michelle et al. 2007. "Nutrients, Oxygen and Biogeochemical Processes in the Humboldt Upwelling Current System off Peru Nutrientes, Oxígeno Y Procesos Biogeoquímicos En El Sistema de Surgencias de La Corriente de Humboldt Frente a Perú." Rev. peru. biol 14(August): 117–28.

Gruber, N., and Sarmiento, J. L. (2002). Large-scale biogeochemical/physical interactions in elemental cycles. In "THE SEA: Biological–Physical Interactions in the Oceans" (Robinson, A. R., McCarthy, J. J., and Rothschild, B. J. eds.), Vol. 12, Wiley, New York. 337–399 pp.

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontol. Electron., 4:1–9.

Holm-Hansen, O., Lorenzen, C.J., Holmes, R.W. & Strickland, J.D.H. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. J. Cons. Int. Explor. Mer, 30: 3–15.

Holmes, R. M., A. Aminot, R. K erouel, B. A. Hooker & B. J. Peterson. 1999. A simple and precise method for measuring ammonium in marine and freshwater ecosystems. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56:1801–1808.

Korsmeyer K. E., Dewar H. 2001. Tuna metabolism and energetics. In: *Tuna: Physiology, Ecology and Evolution* (ed. By B.A.Block & E.D.Stevens). Academic Press, San Diego, CA, USA. 35-78 pp.

Libes, S. 1992. An introduction to marine biogeochemistry. J Wiley and Sons, Inc., eds. New York. 774 pp.

McAuliffe C., GC determination of solutes by multiple phase equilibration. *Chem. Technol.*, 1, 46-51 pp.

Manne A. S., Richels R. G. 2001. An alternative approach to establishing tradeoffs among greenhouse gases. *Nature*, 410. 675-667 pp.

Navqui, S. W. A., Bange, H. W., Farías, L., Monteiro, P. M. S., Scraton, M. I., Zhang, J. 2010. Marine hypoxia/anoxia as a source of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O. *Biogeosciences*. 2159-2190 pp.

Naylor R. L., Goldburg R. J., Primavera J. H., Kautsky N., Troell M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 45: 1017-1029 pp.

Oudot, C., Chantal. A., Y. Montiel. 1990. Nitrous oxide production in the tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.*, 37 (2): 183-202 pp.

SEIA. 2007. Ficha del proyecto: Cultivo en etapas de engorda para la producción en cautiverio de *Seriola lalandi* en puerto Flamenco. Página web [[http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id\\_expediente=1685560](http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id_expediente=1685560)]. Revisado agosto de 2017.

SEIA. 2015. Ficha del proyecto: Puerto desierto. Página web [[http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id\\_expediente=7314013](http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id_expediente=7314013)]. Revisado agosto de 2017.

Servicio Hidrográfico y oceanográfico de la Armada (SHOA). Temperatura superficial del mar. Página web [<http://www.shoa.cl/nuestros-servicios/tsm>]. Revisado noviembre de 2017.

Silva, N. & D. Konow. 1975. Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico Sudoriental. Expedición Krill. Crucero 3-4 Julio-Agosto 1974. Rev.Com. Perm. Pacífico Sur, 3: 63-75 pp.

Small, L. & D. Menzies. 1981. Patterns of primary production and biomass in a coastal upwelling region. Deep-Sea Research 28:123-149 pp.

Soto D., Norambuena F. 2004. Evaluation of salmon farming effects on marine systems in the inner seas of southern Chile: a large-scale mensurative experiment. Journal of Applied Ichthyology 20: 493-501 pp.

Strickland J.D.H. & T.R. Parsons (1972). A Practical Handbook of Seawater Analysis. Fisheries Research Board of Canada. Bulletin 167 (Second Edition). 310 pp.

Torres R., Pantoja S., Harada N., Gonzalez H. E., Daneri G., Frangopolus M., Fukasawa M. 2011. Air-sea CO<sub>2</sub> fluxes along the coast of Chile: From CO<sub>2</sub> outgassing in central northern upwelling waters to CO<sub>2</sub> uptake in southern Patagonian fjords. Journal of Geophysical Research: Oceans, 116(9), 1-17 pp.

Weiss R. F. (1970) The solubility of nitrogen, oxygen and argon in water and sea water. Deep-sea Research, 17, 721-735.

Winkler, L.S. 1888. The determination of Dissolved Oxygen Ber. Deutsch Chem. Gesellschaft., 21, 2843 pp.

Williams J. & Crutzen P. J. 2010. Nitrous oxide from aquaculture. *Nature Geosci.* 3, 143 pp.

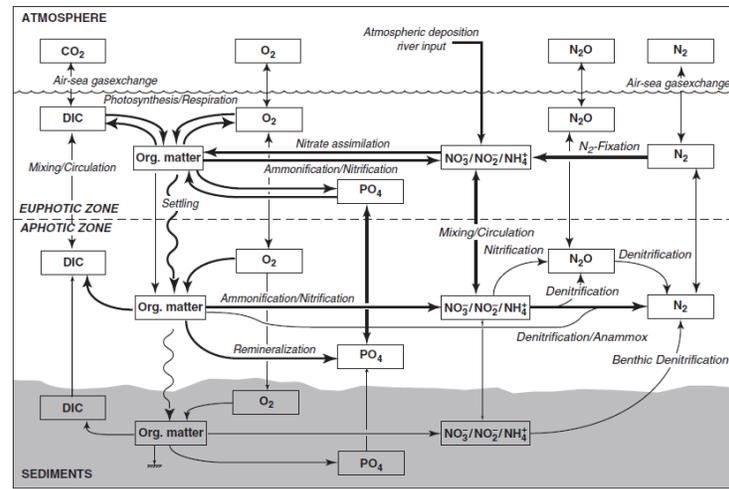
Woodwell G. M., Hobbie J. E., Houghton R.A., Melillo J.M., Moore B., Peterson B.J., Shaver G. R., 1983. Global Deforestation: Contribution to Atmospheric Carbon Dioxide. *Science* 222: 1081 – 1086 pp.

Wuebbles D.J., Hayhoe, K., 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews* 57, 177–210 pp.

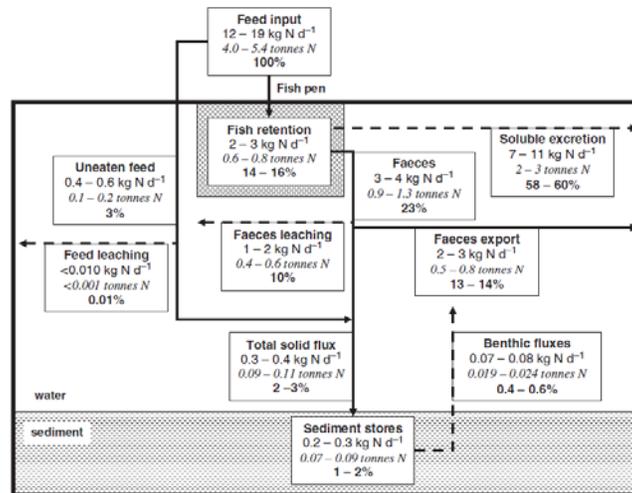
Yamagishi, H., Wetsley M. B., Popp B. N., Toyoda S., Yoshida N., Watanabe S., Yamanaka Y. 2007. Role of nitrification and denitrification on the nitrous oxide cycle in the eastern tropical North Pacific and Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 112 (G2), 1-15 pp.

Yoshinari T. (1976) Nitrous oxide in the sea. *Marine Chemistry*, 4,189-202.

## 10. ANEXOS



**Figura 24** Representación esquemática del ciclo del nitrógeno, oxígeno, fósforo y carbono. Gruber *et al.*, 2008.



**Figura 25** Modelo de los flujos ambientales de nitrógeno suministrados al cultivo de *Seriola lalandi* en la bahía Fitzgerlad, Australia del Sur. Fernandes & Tanner, 2008.

**Tabla 10** Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el nitrato entre las estaciones de la campaña 1 y la campaña 2.

nitrato campaña 1				nitrato campaña 2			
	est1	est bj	est2		est1	est bj	est2
est1		0,6547	1	est1		1	0,07364
est bj	0,6547		0,6547	est bj	1		0,07364
est2	1	0,6547		est2	0,07364	0,07364	

**Tabla 11** Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el fosfato entre las estaciones de la campaña 1 y la campaña 2.

fosfato campaña 1				fosfato campaña 2			
	est1	est bj	est2		est1	est bj	est2
est1		0,4561	0,551	est1		0,8815	0,551
est bj	0,4561		0,8815	est bj	0,8815		0,4561
est2	0,551	0,8815		est2	0,551	0,4561	

**Tabla 12** Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el óxido nitroso entre las estaciones de la campaña 1 y la campaña 2.

óxido nitroso campaña 1				óxido nitroso campaña 2			
	est1	est bj	est2		est1	est bj	est2
est1		0,8815	0,551	est1		0,8815	0,4561
est bj	0,8815		0,4561	est bj	0,8815		0,551
est2	0,551	0,4561		est2	0,4561	0,551	

**Tabla 13** Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el oxígeno entre las estaciones de la campaña 1.

oxígeno campaña 1			
	est1	est bj	est2
est1		0,08385	0,5476
est bj	0,08385		0,0198
est2	0,5476	0,0198	

**Tabla 14** Permanova (Test de Kruskal-Wallis) para el amonio entre las estaciones de la campaña 2

Amonio campaña 2			
	est1	est bj	est2
est1		0,6547	0,6547
est bj	0,6547		0,3711
est2	0,6547	0,3711	