

UNIVERSIDAD DE MAGALLANES  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS Y RECURSOS NATURALES  
BIOLOGÍA MARINA



DINÁMICA DEL FLUJO DE NUTRIENTES EN UN ÁREA MARINA  
PROGLACIAL (SENO GALLEGOS, CORDILLERA DARWIN)

Katherine Andrea Barría Quintana

Director de Tesis: Dr. Américo Montiel San Martín

Co-Director de Tesis: Dr. Julio Salcedo Castro

2016

Dinámica del flujo de nutrientes en un área marina proglacial

(Seno Gallegos, Cordillera Darwin)

Katherine Andrea Barría Quintana

Departamento de Ciencias y Recursos Naturales

Fecha: diciembre, 2016

M. Sc. Víctor Díaz Huentelican

Decano Facultad de Ciencias

Dr. Cristian Aldea Venegas.

Jefe de Carrera Biología Marina

Aprobado Comisión de Calificación

Dr. Américo Montiel San Martín.

Director de Tesis

Dr. Julio Salcedo Castro.

Co-Director de Tesis

M. Sc. Bibiana Jara Vergara

Lic. Osvaldo Vásquez Jaime

Tesis entregada como requerimiento para obtener el Título  
de Bióloga Marina en la Facultad de Ciencias

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por darme la oportunidad de estudiar y amarme. A mis hermanos Roderich y Luis que siempre los sentí presente. A Pablo, gracias amor.

A mis directores de tesis, doctores: Américo Montiel y Julio Salcedo, por el apoyo en todo momento, que sin duda fueron necesarios para llevar a cabo esta tesis. Dr. Montiel gracias por confiar en mí, por la paciencia y sobre todo por incentivar me a seguir adelante. Dr. Salcedo gracias por acogerme en su lugar de trabajo (CEA de la UPLA en Viña del Mar), por enseñarme a utilizar programas para la realización de la presente tesis, siempre lo sentí muy cercano, gracias.

Al proyecto FONDECYT iniciación (11090208; IP Dr. Américo Montiel), el cual financió este estudio. Además, se agradece a las instituciones Universidad de Magallanes por la facilitación de laboratorios para los respectivos análisis; e Instituto de Fomento Pesquero, particularmente a la Dra. Pizarro por la facilitación del reactivo de color para la realización de los análisis.

No puedo dejar de mencionar, por la importancia que tuvieron en el desarrollo de esta tesis y carrera a: los profesores: M. Sc. Jara, Dr. Díaz, y al Ing. Soto y Técnico Barrientos, gracias por su buena disposición.

A M. Sc. Francisca Bown del laboratorio de glaciología del Centro de Estudio Científicos por su disposición, ayuda y sugerencias para la determinación del derretimiento del glaciar del Seno Gallegos.

Finalmente, pero no menos importante agradecer a mis amigos que fueron de mucha ayuda a la hora de no dejarme bajar los brazos, gracias por estar ahí siempre.

*“El miedo a las alturas es ilógico. El miedo a caer, por otro lado, es prudente y evolucionista”*

**Sheldon Cooper (Eric Caplan)**

## RESUMEN

Las Áreas Marinas Proglaciales (AMP) son ambientes que se localizan frente a glaciares y/o casquetes de hielo, estos ambientes pueden estar sujetos a regímenes fluviales, lacustres o marinos. En Chile, los estudios de estas áreas han sido discretos, y sólo se han enfocado en la descripción y correlación de parámetros oceanográficos, es por esto que los estudios sobre la dinámica y distribución de la concentración de nutrientes son imprescindibles para el entendimiento del funcionamiento de estos ecosistemas y para el discernimiento de las consecuencias causadas por el calentamiento global. En contexto, en esta tesis se modeló por primera vez la dinámica del nitrógeno inorgánico disuelto ( $\Delta\text{DIN}$ ) y el fósforo inorgánico disuelto ( $\Delta\text{DIP}$ ) en un AMP Seno Gallegos. Además, se simuló el flujo de nutrientes bajo dos posibles escenarios de cambio climático, con distintos regímenes de pluviosidad.

Los datos de nutrientes en el Seno Gallegos se obtuvieron a partir de tres campañas de muestreo (otoño, invierno y primavera). Se tomaron muestras de agua en tres zonas ubicadas a 2, 4 y 7 kilómetros de distancia del borde del Ventisquero Garibaldi. Para estimar los flujos de nutrientes y procesos biogeoquímicos en la zona proglacial a partir de la descripción de la distribución y variación estacional de los nutrientes se aplicó el modelo Land Ocean Interactions in the Coastal Zones.

A escala local, el flujo de  $\Delta\text{DIN}$  en el sistema (capa superficial y profunda) fue positivo en invierno ( $4249,32 \text{ mol d}^{-1}$ ); en cambio, en primavera ( $-712,59 \text{ mol d}^{-1}$ ) y otoño ( $-5287,93 \text{ mol d}^{-1}$ ) fue negativo, lo que indica que en invierno hay una producción de nutrientes al sistema y en primavera y otoño hay un consumo de nutrientes. El flujo de  $\Delta\text{DIP}$  revirtió desde invierno ( $768,61 \text{ mol d}^{-1}$ ) a otoño ( $-350,35 \text{ mol d}^{-1}$ ) mostrando que hay un consumo de nutrientes en las temporadas de primavera y otoño y una liberación o producción de nutrientes en invierno. El flujo de nutrientes en el Seno Gallegos en otoño se comportó como fijador de nitrógeno ( $317,73 \text{ mol d}^{-1}$ ), lo cual contrastó de invierno ( $-16547,15 \text{ mol d}^{-1}$ ) y primavera ( $-2094,79 \text{ mol d}^{-1}$ ), donde el DIN se comportó de manera desnitrificante. El estado trófico del DIP en el sistema, en otoño fue autótrofo ( $37137,4 \text{ mol C d}^{-1}$ ), lo cual

difirió de invierno ( $-81473,1 \text{ mol C d}^{-1}$ ) y primavera ( $-9157 \text{ mol C d}^{-1}$ ), donde el estado trófico del DIP fue heterótrofo.

A escala regional, el flujo de nutrientes en el Seno Gallegos ante un cambio climático, muestra que en el escenario de un clima seco el flujo de  $\Delta\text{DIN}$  aumentaría ( $-9384,76 \text{ mol d}^{-1}$ ), y en el escenario de un clima húmedo el flujo de  $\Delta\text{DIN}$  disminuiría ( $-9904,97 \text{ mol d}^{-1}$ ). El flujo de  $\Delta\text{DIP}$  aumentaría en un escenario de clima húmedo ( $-1759,7 \text{ mol d}^{-1}$ ), en cambio, disminuiría en el escenario de un clima seco ( $-1857,24 \text{ mol d}^{-1}$ ).

## ÍNDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1.- INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>2.- MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
2.1.- Zonificación oceanográfica del ecosistema de fiordos y canales chilenos (EFCC).....	<b>19</b>
2.2.- Estudios de nutrientes en áreas marinas proglaciales (AMP) .....	<b>21</b>
2.3.- El modelo de balance de compartimientos (MBC-LOIZ).....	<b>22</b>
<b>3.- PREGUNTAS E HIPÓTESIS</b> .....	<b>27</b>
<b>4.- OBJETIVOS</b> .....	<b>28</b>
4.1.- Objetivo general (EFCC).....	<b>28</b>
4.2.- Objetivos específicos .....	<b>28</b>
<b>5.- MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
5.1.- Área de estudio .....	<b>29</b>
5.2.- Trabajo de terreno .....	<b>31</b>
5.3.- Análisis de laboratorios .....	<b>33</b>
5.4.- Análisis de datos: y cálculos de balance de nutrientes .....	<b>33</b>
5.4.1.- Ingreso de datos a la plantilla MBC LOICZ .....	<b>35</b>
5.4.1.1.- Parámetros físicos.....	<b>36</b>
5.4.1.2.- Parámetros meteorológicos .....	<b>37</b>
5.4.1.3- Parámetros oceanográficos .....	<b>41</b>

<b>6.- RESULTADOS.....</b>	<b>44</b>
6.1.- Concentración de nutrientes promedio en Seno Gallegos.....	44
6.2.- Variación espacial y temporal de la concentración de nutrientes en el Seno Gallegos .....	46
6.2.1.- Temporada de otoño .....	46
6.2.2.- Temporada de invierno .....	48
6.2.3.- Temporada de primavera .....	50
6.3.- Concentración de nutrientes Seno Gallegos v/S concentración de nutrientes histórico Estrecho de Magallanes .....	52
6.4.- Balance de nutrientes a escala local .....	53
6.4.1.- Temporada de otoño .....	53
6.4.2.- Temporada de invierno .....	56
6.4.3.- Temporada de primavera .....	58
6.5.- Balance de nutrientes a escala regional (Seno Gallegos-Estrecho de Magallanes) .....	60
6.6.- Simulación de balance de nutrientes a escala regional (Seno Gallegos - Estrecho de Magallanes).....	63
6.6.1.- Escenario de Clima húmedo .....	63
6.6.2.- Escenario de Clima seco .....	66
<b>7.- DISCUSIÓN .....</b>	<b>68</b>
7.1.- Concentración de nutrientes en Seno Gallegos .....	68
7.1.1.- Concentración de nutrientes Seno Gallegos en relación a otros fiordos de Chile .....	68
7.1.2.- Variación de nutrientes (zona interna (FG y INT) y zona externa (AF) en otoño, invierno y primavera .....	70



7.2.- MBC LOICZ de Seno Gallegos a escala geográfica local y regional .....	71
7.2.1.- MBC LOIZ a escala geográfica local (zona externa- zona interna) .....	71
7.2.2.- MBC LOICZ a escala geográfica regional (Seno Gallegos - Estrecho de Magallanes) .....	74
7.3.- MBC LOICZ de Seno Gallegos a escala temporal (clima húmedo y clima seco).....	76
<b>8.- CONCLUSIÓN .....</b>	<b>78</b>
<b>9.- REVISIONES BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>10.- ANEXOS .....</b>	<b>88</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros de la ecuación para determinar el coeficiente de derretimiento glaciar del Ventisquero Garibaldi, con los respectivos valores utilizados .....	<b>37</b>
<b>Tabla 2.</b> Precipitaciones históricas que se utilizó para la modelación (MBC LOICZ toolbox) local y regional del Seno Gallegos.....	<b>38</b>
<b>Tabla 3.</b> Precipitaciones históricas que se utilizaron para la simulación (MBC LOICZ toolbox) regional del Seno Gallegos ante el escenario de un cambio climático (escenario de un clima húmedo y escenario de un clima seco). .....	<b>39</b>
<b>Tabla 4.</b> Unidades correspondientes a la ecuación de Linacre (1993, 1994) que se utilizaron para el cálculo de la evaporación del Seno Gallegos, para la modelación geográfica a escala local, y para la modelación y simulación a escala regional .....	<b>40</b>
<b>Tabla 5.</b> Unidades que se utilizaron para el cálculo del punto de rocío, el cual se utilizó posteriormente en la ecuación propuesta por Linacre (1993, 1994) para el cálculo de la evaporación .....	<b>41</b>
<b>Tabla 6.</b> Valores promedio de nutrientes de la capa superficial y profunda del Estrecho de Magallanes y Seno Gallegos, los valores del Estrecho de Magallanes son los obtenidos en las expediciones: Straits of Magellan Oceanographic cruise, Cimar 3 y Cimar 16 .....	<b>52</b>
<b>Tabla 7.</b> Resumen de las principales forzantes físicos y procesos biogeoquímicos que afectan la distribución vertical de oxígeno y nutrientes en fiordos y canales chilenos. (Silva <i>et al.</i> 1997) .....	<b>69</b>
<b>Tabla 8.</b> Estado del nitrógeno (E-N) presente en el AMP Seno Gallegos a escala local, para las temporadas de otoño, invierno y primavera, donde N-Fij es fijación del nitrógeno y Denit es la desnitrificación del nitrógeno	<b>72</b>

**Tabla 9.** Estado trófico (autótrofo y heterótrofo) del AMP Seno Gallegos a escala local. El metabolismo neto del ecosistema (p-r) estimado en base al comportamiento de  $\Delta$ DIP en relación con el radio Redfield C: P, el cual si el  $\Delta$ DIP es positivo y (p-r) negativo representa un sistema heterótrofo, en cambio si el  $\Delta$ DIP es negativo y (p-r) positivo representa un sistema autótrofo .....73

**Tabla 10.** Estado del nitrógeno (E-N) presente en el AMP Seno Gallegos a escala regional .....75

**Tabla 11.** Estado trófico (autótrofo y heterótrofo) del AMP Seno Gallegos. El metabolismo neto del ecosistema (p-r) estimado en base al comportamiento de  $\Delta$ DIP en relación con el radio Redfield C: P presente a escala regional en el Seno Gallegos75

**Tabla 12.** Estado del nitrógeno (E-N) presente en el AMP Seno Gallegos a escala regional, en el escenario de un cambio climático (clima húmedo y clima seco), en comparación a la simulación regional Estrecho de Magallanes- Seno Gallegos.....76

**Tabla 13.** Estado trófico (autótrofo y heterótrofo) del AMP Seno Gallegos. El metabolismo neto del ecosistema (p-r) estimado en base al comportamiento de  $\Delta$ DIP en relación con el radio Redfield C: P presente a escala regional en el escenario de un cambio climático (clima húmedo y clima seco), en comparación a la simulación regional Estrecho de Magallanes- Seno Gallegos. ....77

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig. 1.** Sección longitudinal presente en un fiordo proglacial. **A:** es Seno Skyring (Kilian *et al.* 2007); **B:** en el Seno Gallegos (Salcedo-Castro *et al.* 2015). .....**20**
- Fig. 2.** Transformaciones biológicas que sufre el nitrógeno. El eje vertical indica el estado de cambio de oxidación asociado a las transformaciones representadas (redibujado de Rodríguez, 2001). .....**23**
- Fig. 3.** MBC- LOICZ y flujos de  $\Delta$ DIN y  $\Delta$ DIP del estuario fluvial Seno Aysén del año 1998 invierno (Redibujado de Smith *et al.* 2000).....**25**
- Fig. 4.** Imagen satelital del área del Campo de Hielo Cordillera Darwin estudio y localización de la zona de muestreo Seno Gallegos. Imágenes satelitales extraídas del IGM (Instituto Geográfico Militar, en la web: <https://www.igm.cl>), y de la DGA (Dirección General de Aguas, en la web: <http://www.dga.cl>).....**30**
- Fig. 5.** Batimetría del Seno Gallegos, donde FG, INT y AF, corresponden a las áreas de muestreo Frente glaciar, área intermedia y el área más alejada del glaciar respectivamente. Imagen modificada del trabajo Salcedo- Castro *et al.* 2015.....**31**
- Fig. 6.** Imagen satelital del área de estudio Seno Gallegos, y sitios de muestreo, Circulo blanco zona interna (FG y INT) y círculo rojo zona externa (AF). Imagen satelital extraída del IGM (Instituto Geográfico Militar, en la web: <https://www.igm.cl>).....**32**
- Fig. 7.** Esquema explicativo del ingreso de datos a la plantilla LOICZ toolbox, y de los parámetros que esta solicita al investigador para la compartimentación del sistema de dos capas (fuente: elaboración propia). .....**33**
- Fig. 8.** Imagen extraída directamente de la primera hoja de cálculo de la plantilla LOICZ Toolbox nombrada como *Instruccions and basic info* (en la web: [http://nest.su.se/mnode/Toolbox/LOICZ\\_Toolbox.htm](http://nest.su.se/mnode/Toolbox/LOICZ_Toolbox.htm)). .....**34**

<b>Fig. 9.</b> Diagramas de compartimientos de dos capas que crea el LOICZ toolbox en base a los datos ingresados para fósforo (DIP) y nitrógeno (DIP). Las flechas horizontales indican el flujo de entrada y salida, y las verticales indican el flujo entre la capa superior y profunda (diagramas modificados de la plantilla LOICZ, en la web <a href="http://nest.su.se/mnode/Toolbox/LOICZ_Toolbox.htm">http://nest.su.se/mnode/Toolbox/LOICZ_Toolbox.htm</a> ).....	<b>35</b>
<b>Fig. 10.</b> Imagen modificada extraída del trabajo de Fernández <i>et al</i> 2011, donde muestra la variación de precipitación para verano e invierno en la Región de Magallanes. Los números muestran la ubicación de las estaciones meteorológicas usadas de estudio: <b>1:</b> estación de Monte Aymond, <b>2:</b> estación de Punta arenas, <b>3:</b> estación de Laguna Parrillar y la <b>4:</b> estación de Rio Azopardo desembocadura. ....	<b>39</b>
<b>Fig. 11.</b> Valores promedio de nitrógeno inorgánico total (nitrito + nitrato) y fosfato con sus respectivas desviaciones estándar, para la capa superficial y profunda del Seno Gallegos .....	<b>44</b>
<b>Fig. 12.</b> Valores promedio de nitrógeno inorgánico total (nitrito + nitrato) y fosfato con sus respectivas desviaciones estándar, en el Seno Gallegos, FG (frente glaciar), INT (intermedio) y AF (afuera) en las temporadas de otoño (A), invierno (B) y primavera (C). .....	<b>45</b>
<b>Fig. 13.</b> Secciones longitudinales de la concentración de NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> y PO <sub>4</sub> presente en la zona interna (FG y INT) y zona externa (AF) del AMP Seno Gallegos en otoño. El km 0 representa el borde del Ventisquero Garibaldi. ....	<b>47</b>
<b>Fig. 14.</b> Secciones longitudinales de la concentración de NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> y PO <sub>4</sub> presente en la zona interna (FG y INT) y zona externa (AF) del AMP Seno Gallegos en invierno. El km 0 representa el borde del Ventisquero Garibaldi.....	<b>49</b>
<b>Fig. 15.</b> Secciones longitudinales de la concentración de NO <sub>2</sub> , NO <sub>3</sub> y PO <sub>4</sub> presente en la zona interna (FG y INT) y zona externa (AF) del AMP Seno Gallegos en primavera. El km 0 representa el borde del Ventisquero Garibaldi.. ..	<b>51</b>

<b>Fig. 16.</b> Flujo de DIN para la capa superficial y profunda en el AMP Seno Gallegos en otoño. ....	<b>54</b>
<b>Fig. 17.</b> Flujo de DIP para la capa superficial y profunda en el AMP Seno Gallegos en otoño .....	<b>55</b>
<b>Fig. 18.</b> Flujo de DIN para la capa superficial y profunda en el AMP Seno Gallegos en invierno. ....	<b>56</b>
<b>Fig. 19.</b> Flujo de DIP para la capa superficial y profunda en el AMP Seno Gallegos en invierno. ....	<b>57</b>
<b>Fig. 20.</b> Flujo de DIN para la capa superficial y profunda en el AMP Seno Gallegos en primavera .....	<b>58</b>
<b>Fig. 21.</b> Flujo de DIP para la capa superficial y profunda presente en el AMP Seno Gallegos en primavera. ....	<b>59</b>
<b>Fig. 22.</b> Flujo de DIN para la capa superficial y profunda a escala regional en el AMP Seno Gallegos. ....	<b>61</b>
<b>Fig. 23.</b> Flujo de DIP para la capa superficial y profunda a escala regional en el AMP Seno Gallegos .....	<b>62</b>
<b>Fig. 24.</b> Flujo de DIN para la capa superficial y profunda a escala regional en el escenario de un clima húmedo en el AMP Seno Gallegos. ....	<b>64</b>
<b>Fig. 25.</b> Flujo de DIP para la capa superficial y profunda a escala regional en el escenario de un clima húmedo en el AMP Seno Gallegos .....	<b>65</b>
<b>Fig. 26.</b> Flujo de DIN para la capa superficial y profunda a escala regional en el escenario de un clima seco en el AMP Seno Gallegos .....	<b>66</b>
<b>Fig. 27.</b> Flujo de DIP para la capa superficial y profunda a escala regional en el escenario de un clima seco en el AMP Seno Gallegos .....	<b>67</b>