

# ***Indicadores de calidad del material orgánico en suspensión en la cuenca Central del Estrecho de Bransfield, océano Austral***



**Br. Gabriel Lobato Soria**

**Tesis de Grado, Licenciatura en Ciencias Biológicas**

Laboratorio de Biogeoquímica Marina, Sección Oceanografía y Ecología Marina

Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales

Tutora: PhD. Natalia Venturini

Co-tutora: PhD. Constanza Ricaurte-Villota

Marzo 2026

Montevideo, Uruguay

## Índice de Contenidos

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b> .....   | <b>9</b>  |
| 1.1. <i>La Bomba Biológica y el rol del material orgánico particulado</i> .....                          | 9         |
| 1.2. <i>Contexto oceanográfico: el océano Austral</i> .....  | 10        |
| 1.3. <i>Caracterización bioquímica e isotópica del material orgánico particulado</i> .....               | 12        |
| <b>2. Objetivos</b> .....  | <b>14</b> |
| 2.1. <i>Objetivo general</i> .....   | 14        |
| 2.2. <i>Objetivos específicos</i> .....  | 14        |
| <b>3. Materiales y Métodos</b> .....   | <b>15</b> |
| 3.1. <i>Área de estudio</i> .....  | 15        |
| 3.2. <i>Estrategia de muestreo</i> .....   | 18        |
| 3.3. <i>Análisis de laboratorio</i> .....  | 20        |
| 3.4. <i>Tratamiento de datos</i> .....   | 21        |
| <b>4. Resultados</b> .....   | <b>24</b> |
| 4.1. <i>Propiedades fisicoquímicas de la columna de agua</i> .....                                       | 24        |
| 4.2. <i>Composición bioquímica del MOP en suspensión</i> .....   | 27        |
| 4.3. <i>Composición elemental e isotópica estable del MOP en suspensión</i> .....                        | 34        |
| 4.4. <i>Distribución vertical de las masas de agua en la cuenca Central</i> .....                        | 37        |
| 4.5. <i>Análisis multivariados</i> .....   | 39        |
| <b>5. Discusión</b> .....  | <b>44</b> |
| 5.1. <i>Estructura de la columna de agua</i> .....   | 44        |
| 5.2. <i>Variabilidad macromolecular y labilidad del MOP en la columna de agua</i> .....                  | 46        |
| 5.3. <i>Origen y grado de procesamiento del MOP en suspensión: evidencia elemental e isotópica</i> ..... | 50        |
| <b>6. Conclusiones</b> .....   | <b>53</b> |
| <b>7. Consideraciones finales</b> .....  | <b>54</b> |
| <b>8. Referencias bibliográficas</b> .....   | <b>55</b> |
| <b>9. Anexo</b> .....  | <b>64</b> |
| 9.1. <i>Material suplementario</i> .....   | 64        |

## Resumen

El material orgánico particulado (MOP) cumple un rol clave en la Bomba Biológica Oceánica al mediar la exportación de carbono desde la superficie hacia el océano profundo. En el océano Austral, uno de los principales sumideros de CO<sub>2</sub> a escala global, los procesos que controlan la producción, transformación y transporte vertical del MOP son fundamentales para comprender su contribución a la regulación climática. En regiones de gran complejidad oceanográfica y geomorfológica, como el Estrecho de Bransfield, la composición y exportación del MOP son moduladas por la interacción entre los patrones de circulación y la topografía del fondo. En este trabajo se caracterizó la distribución vertical, composición bioquímica y el origen del MOP en suspensión en dos estructuras volcánicas de la cuenca Central del Estrecho de Bransfield: el complejo de tres picos Three Sisters y el monte submarino Orca. Las muestras fueron recolectadas durante el crucero ORCA III (verano austral 2019/2020), a bordo del R/V BAP Carrasco, en 14 estaciones y a distintas profundidades de la columna de agua (superficie, base de la termoclina, zona intermedia y fondo). Se realizaron perfiles de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia, y se identificaron las principales masas de agua presentes en la región. Se determinaron las concentraciones totales de carbohidratos (CHO), lípidos (LIP) y proteínas (PRT), se estimó su contribución al carbono biopolimérico (CBP) y se calcularon las razones bioquímicas PRT:CHO y CHO:LIP. Adicionalmente, se analizaron la composición elemental (C, N) y las firmas isotópicas estables ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) del MOP. Los datos fueron integrados mediante estadísticos descriptivos y análisis multivariados de ordenación. El MOP exhibió un gradiente vertical decreciente, asociado a la estratificación de la columna de agua y a la distribución de las masas de agua en la cuenca Central. Las concentraciones de biopolímeros mostraron máximos en superficie (CBP ~ 50  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) y una disminución progresiva hacia aguas profundas (~ 12  $\mu\text{g L}^{-1}$ ). En ambos sitios, las PRT constituyeron la fracción dominante, entre 50 – 90% del CBP total, con razones PRT:CHO mayores a 1 en todas las profundidades. Esto indica la presencia de un MOP autóctono, fresco, de gran valor nutricional y biodisponible para los consumidores heterótrofos. Three Sisters presentó una distribución relativamente homogénea del MOP, con razones CHO:LIP constantes a lo largo de la columna de agua, sugiriendo una exportación vertical más directa. En contraste, la mayor variabilidad en Orca es consistente con una dinámica del MOP más compleja, potencialmente asociada a procesos de retención y recirculación. Aunque el contenido total de MOP disminuyó con la profundidad, la persistencia de la fracción proteica y de razones bioquímicas asociadas a material lábil, indica que una fracción del MOP logra preservarse y mantener su integridad molecular en los estratos más profundos de la columna de agua. Las razones C:N (4 – 6) y las firmas  $\delta^{13}\text{C}$  (-29,6 – -25,8 ‰) indican un origen predominantemente autótrofo del MOP, sin evidencias de aportes significativos de material de origen quimiosintético derivado de la actividad volcánica submarina. Estos resultados muestran que la distribución vertical y la calidad del MOP en la cuenca Central del Estrecho de Bransfield están principalmente controladas por procesos biológicos y físicos del sistema pelágico, a la vez influenciados localmente por la geomorfología submarina, y aportan nuevos antecedentes para una región del océano Austral escasamente estudiada.

## Abstract

Particulate organic matter (POM) plays a key role in the Biological Carbon Pump by mediating the export of carbon from surface waters to the deep ocean. In the Southern Ocean, a major region for global CO<sub>2</sub> sequestration, the processes controlling POM production, transformation, and vertical transport are fundamental to understanding its contribution to climate regulation. In regions with pronounced oceanographic and geomorphological complexity, such as the Bransfield Strait, POM composition and export are modulated by the interaction between circulation patterns and seafloor topography. In this study, we characterized the vertical distribution, biochemical composition, and origin of suspended POM at two volcanic edifices in the Central Bransfield Basin: the Three Sisters ridges and the Orca Seamount. Samples were collected during the ORCA III cruise (austral summer 2019/2020) aboard the R/V *BAP Carrasco*, in multiple depths along the water column (surface, thermocline base, intermediate layer, and near-bottom waters) at 14 stations. Vertical profiles of temperature, salinity, dissolved oxygen, and fluorescence were obtained, and the main water masses in the region identified. Concentrations of carbohydrates (CHO), lipids (LIP) and proteins (PRT) were quantified and used to estimate biopolymeric carbon (BPC), as well as the derived biochemical ratios PRT:CHO and CHO:LIP. Elemental composition (C, N) and stable isotope signatures ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) of POM were also analyzed. Data were integrated using descriptive statistics and multivariate ordination analyses. POM exhibited a vertically decreasing gradient, in association with the water column stratification and the distribution of water masses in the Central Basin. Biopolymer concentrations showed surface maxima (BPC  $\sim 50 \mu\text{g L}^{-1}$ ) and a progressive decline toward deep waters ( $\sim 12 \mu\text{g L}^{-1}$ ). At both sites, PRT were the dominant fraction, accounting for 50 – 90% of total BPC, with PRT:CHO ratios consistently greater than 1 throughout the water column. This indicates the presence of predominantly autochthonous, fresh POM with high nutritional value and bioavailability for heterotrophic consumers. Three Sisters displayed a relatively homogeneous vertical POM distribution, as indicated in constant CHO:LIP ratios, suggesting a more direct vertical export. In contrast, the higher variability observed at Orca is consistent with more complex POM dynamics, potentially linked to retention and recirculation processes. Although total POM content decreased with depth, the persistence of the protein fraction and biochemical ratios associated with labile material indicates that a fraction of POM is preserved and retains its molecular integrity in deeper layers of the water column. C:N ratios (4 – 6) and  $\delta^{13}\text{C}$  signatures (-29,6 – -25,8 ‰) indicate a predominantly autotrophic origin of POM, with no evidence of significant inputs of chemosynthetically derived material related to submarine volcanic activity. Overall, these results show that the vertical distribution and quality of POM in the Central Bransfield Basin are primarily driven by biological and physical processes within the pelagic system, locally influenced by seafloor geomorphology, and provide new insights into a poorly studied region of the Southern Ocean.

## Índice de Figuras

- Figura 1.** Mapa de la región de estudio (B) incluyendo acercamientos a los sitios de estudio y las estaciones de muestreo correspondientes a Orca (A) y Three Sisters (C). El relieve de fondo está representado a partir de datos batimétricos obtenidos del General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), utilizando la cuadrícula de 2021..... 19
- Figura 2.** Ilustración representativa del efecto monte submarino. Adaptación de la portada del Journal of Geophysical Research, vol. 125 (2020)..... 20
- Figura 3.** Diagramas de caja (BOXPLOT) para los parámetros fisicoquímicos (filas) a distintas profundidades de la columna de agua (columnas) en los dos sitios estudiados. La línea central de la caja indica la mediana de los datos. Los extremos inferior y superior indican el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), respectivamente. La diferencia entre Q1 y Q3 define la longitud de la caja, y corresponde al rango intercuartil (IQR). Los bigotes en forma T se extienden desde los extremos de la caja hasta los valores mínimo (inferior) y máximo (superior) dentro de 1,5 veces el IQR. Los puntos vacíos situados por fuera de los bigotes representan valores atípicos (outliers). Nota: en el sitio Orca hay vacíos de datos para las tres variables contempladas..... 27
- Figura 4.** Concentraciones de CHO, LIP y PRT (totales) en el MOP en suspensión en cada profundidad de las estaciones muestreadas en Three Sisters. .... 29
- Figura 5.** Concentraciones de CHO, LIP y PRT (totales) en el MOP en suspensión en cada profundidad de las estaciones muestreadas en Orca. .... 30
- Figura 6.** Diagramas de caja (BOXPLOT) para los distintos biopolímeros orgánicos (filas) a distintas profundidades de la columna de agua (columnas) en los dos sitios estudiados. La línea central de la caja indica la mediana de los datos. Los extremos inferior y superior indican el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), respectivamente. La diferencia entre Q1 y Q3 define la longitud de la caja, y corresponde al rango intercuartil (IQR). Los bigotes en forma T se extienden desde los extremos de la caja hasta los valores mínimo (inferior) y máximo (superior) dentro de 1,5 veces el IQR. Los puntos vacíos situados por fuera de los bigotes representan valores atípicos (outliers)..... 31
- Figura 7.** Contribución relativa de CHO, LIP y PRT al CBP total en las estaciones muestreadas en Three Sisters..... 32
- Figura 8.** Contribución relativa de CHO, LIP y PRT al CBP total en las estaciones muestreadas en Orca..... 33
- Figura 9.** Análisis conjunto del  $\delta^{13}\text{C}$  en función de la razón C:N en la base de la termoclina de las estaciones muestreadas en Three Sisters y Orca. Se incluyen

valores de referencia para varias fuentes de material orgánico según la literatura: marina (Bianchi & Canuel, 2011), aguas antárticas (Lourey et al., 2004; Henley et al., 2012; Lin et al., 2023) y agua dulce (Lamb et al., 2006) para  $\delta^{13}\text{C}$ , y bacteriana (Monticelli et al., 2003; Henley et al., 2012), fitoplanctónica (Goñi et al., 2003; Lamb et al., 2006), zooplanctónica (Bianchi & Canuel, 2011) y terrestre (Goñi et al., 2003; Lamb et al., 2006) para la razón C:N..... 37

**Figura 10.** Diagrama temperatura-salinidad (T-S) en las estaciones muestreadas en Three Sisters. Cada punto en el espacio representa una observación realizada con el CTD a lo largo del gradiente de profundidad. Se indican en recuadros las principales masas de agua identificadas (TBW: Agua Transicional con influencia del mar de Bellingshausen; TWW: Agua Transicional con influencia del mar de Weddell; BDW: Agua Profunda de Bransfield; BBW: Agua de Fondo de Bransfield)..... 38

**Figura 11.** Diagrama temperatura-salinidad (T-S) en las estaciones muestreadas en Orca. Cada punto en el espacio representa una observación realizada con el CTD a lo largo del gradiente de profundidad. Se indican en recuadros las principales masas de agua identificadas (TBW: Agua Transicional con influencia del mar de Bellingshausen; TWW: Agua Transicional con influencia del mar de Weddell; BDW: Agua Profunda de Bransfield; BBW: Agua de Fondo de Bransfield). ..... 39

**Figura 12.** Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA) construido para las distintas profundidades de las estaciones muestreadas en Three Sisters, a partir de variables fisicoquímicas (Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; OD: oxígeno disuelto; Clo-a: clorofila-a) y bioquímicas (CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas) en PC1 y PC2. Las flechas representan las cargas (loadings) de las variables en los dos primeros componentes principales; su longitud indica la magnitud de la contribución de cada variable al patrón multivariado, y su orientación el sentido de la correlación con los ejes. Los puntos corresponden a las muestras individuales y los centroides con elipses de confianza representan la posición media y la variabilidad asociada a cada profundidad..... 40

**Figura 13.** Coeficientes de correlación de cada variable (loadings) para el PC1 **(a)** y el PC2 **(b)** en el PCA realizado para Three Sisters. Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; OD: oxígeno disuelto; Clo-a: clorofila-a; CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas. .... 41

**Figura 14.** Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA) construido para las distintas profundidades de las estaciones muestreadas en Orca, a partir de variables fisicoquímicas (Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; Clo-a: clorofila-a) y bioquímicas (CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas) en PC1 y PC2. Las flechas representan las cargas (loadings) de las variables en los dos primeros

componentes principales; su longitud indica la magnitud de la contribución de cada variable al patrón multivariado, y su orientación el sentido de la correlación con los ejes. Los puntos corresponden a las muestras individuales y los centroides con elipses de confianza representan la posición media y la variabilidad asociada a cada profundidad. Nota: el PCA se realizó utilizando únicamente aquellas profundidades para cada estación, que tuvieran datos completos para todas las variables consideradas. Las observaciones con valores faltantes fueron excluidas del análisis, dado que el PCA requiere matrices completas para la correcta estimación de la estructura multivariada. En consecuencia, las profundidades de algunas estaciones, así como la estación M-45 con todas sus profundidades, no fueron representadas en el espacio de ordenación..... 42

**Figura 15.** Coeficientes de correlación de cada variable (loadings) para el PC1 **(a)** y el PC2 **(b)** en el PCA realizado para Orca. Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; Clo-a: clorofila-a; CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas..... 43

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1.</b> Coordenadas geográficas, profundidad (Prof.), temperatura (T), salinidad (Sal.), concentración de oxígeno disuelto (OD.) y clorofila-a (Clo-a) en las estaciones de muestreo en Three Sisters. ....   | 25 |
| <b>Tabla 2.</b> Coordenadas geográficas, profundidad (Prof.), temperatura (T), salinidad (Sal.) y clorofila-a (Clo-a) en las estaciones de muestreo en Orca. n.d.: no disponible. ...   | 26 |
| <b>Tabla 3.</b> Parámetros bioquímicos, elementales e isotópicos en Three Sisters: concentración de carbono biopolimérico (CBP), razón proteínas/carbohidratos (PRT:CHO) y carbohidratos/lípidos (CHO:LIP), carbono total (C), nitrógeno total (N), razón carbono/nitrógeno (C:N) y firma isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ).....   | 35 |
| <b>Tabla 4.</b> Parámetros bioquímicos, elementales e isotópicos en Orca: concentración de carbono biopolimérico (CBP), razón proteínas/carbohidratos (PRT:CHO) y carbohidratos/lípidos (CHO:LIP), carbono total (C), nitrógeno total (N), razón carbono/nitrógeno (C:N) y firma isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ). n.d.: no disponible...   | 36 |
| <b>Tabla 5 (S1).</b> Resultados de las comparaciones estadísticas de las variables fisicoquímicas (temperatura, salinidad y clorofila-a) y bioquímicas (CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas) entre profundidades de cada sitio de muestreo y entre sitios para cada profundidad. La normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad mediante la prueba de Levene. Cuando se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, seguido de comparaciones múltiples mediante el test post-hoc de Tukey. Cuando uno o ambos supuestos no se cumplieron, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, seguida de comparaciones post-hoc no paramétricas (Dunn o Conover, según la variable analizada), con corrección por comparaciones múltiples mediante los métodos de Holm o Bonferroni. Se reportan los valores del estadístico del test, los grados de libertad (g.l.) y los valores p ajustados. El color verde señala diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). En rojo, se indican las diferencias no significativas ( $p > 0,05$ ). .... | 64 |

## **Lista de Abreviaturas**

**BBW** – Agua de Fondo de Bransfield

**BDW** – Agua Profunda de Bransfield

**CBP** – carbono biopolimérico

**CDWm** – Agua Profunda Circumpolar modificada

**CHO** – carbohidratos

**Clo-a** – clorofila-a

**CO<sub>2</sub>** – dióxido de carbono

**EB** – Estrecho de Bransfield

**LIP** – lípidos

**MOP** – material orgánico particulado

**OA** – océano Austral

**OD** – oxígeno disuelto

**PA** – península Antártica

**PRT** – proteínas

**Sal** – salinidad

**T** – temperatura

**TBW** – Agua Transicional con influencia del mar de Bellingshausen

**TWW** – Agua Transicional con influencia del mar de Weddell

## 1. Introducción

### 1.1. *La Bomba Biológica y el rol del material orgánico particulado*

El constante hundimiento de partículas desde la zona eufótica remueve el carbono derivado del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y conecta la superficie con el océano profundo, donde puede permanecer secuestrado a escalas geológicas de tiempo, actuando como un sumidero de carbono que contribuye a reducir las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub>, principal gas responsable del calentamiento global (Turner *et al.*, 2015; Stukel & Ducklow, 2017; Wynn-Edwards *et al.*, 2020). Dicha exportación de material biogénico constituye el componente gravitacional de la denominada *Bomba Biológica Oceánica* (DeVries & Webber, 2017; Boyd *et al.*, 2018), que comprende una cadena de procesos: desde la producción de complejos orgánicos mediante la fotosíntesis del fitoplancton, hasta el transporte del material resultante a lo largo de la columna de agua y su eventual deposición en los sedimentos (Jo *et al.*, 2021).

El material orgánico particulado (MOP) es un componente esencial de la Bomba Biológica, y se define operativamente según su comportamiento durante el proceso de filtrado de agua como todo material capaz de permanecer retenido en filtros de tipo GF/F, GF/C u otros filtros de policarbonato con tamaños de poro entre 0,2 y 1,0 µm (Verdugo *et al.*, 2004). Tanto el MOP como el material orgánico disuelto, cumplen funciones clave en el ciclo del carbono, aunque el flujo gravitacional del MOP supone la vía más importante de exportación de carbono orgánico al fondo, al convertirse en carbono inorgánico disuelto a profundidades mayores, lo que resulta en el secuestro temporal de carbono hasta su futuro resurgimiento a la superficie a través de la circulación termohalina (Jiao *et al.*, 2010; Kharbush *et al.*, 2020).

La distribución del MOP en el océano depende de la interacción entre procesos vinculados a la producción primaria, la advección de nutrientes, el pastoreo por parte del zooplancton y la remineralización a diversas profundidades (Kiko *et al.*, 2017). A su vez, la estructura y dinámica de las masas de agua, junto con las corrientes, frentes y surgencias, ejercen un control fundamental sobre el MOP al modular la disponibilidad de nutrientes y la intensidad de la mezcla vertical (Ducklow *et al.*, 2018).

La eficiencia del transporte vertical del carbono depende en gran medida de la estabilidad de la columna de agua y de la profundidad a la cual ocurre la remineralización del MOP (Marsay *et al.*, 2015). La amplia mayoría del MOP es remineralizado en la zona eufótica, mientras que una pequeña fracción acaba siendo depositada y enterrada en los sedimentos del fondo (Soares *et al.*, 2015). Tanto la tasa de remineralización del MOP, como la profundidad a la cual ocurre, influyen en la exportación de CO<sub>2</sub> hacia el

fondo oceánico, siendo crucial su impacto sobre la regulación climática global (Kharbush *et al.*, 2020).

El MOP está constituido por detritos, células del fitoplancton, microorganismos como bacterias, protistas y virus, así como por agregados y pellets fecales que se hunden progresivamente (Omand *et al.*, 2020). En su trayecto hacia el fondo, estos productos pueden agruparse formando partículas de mayor tamaño, conocidas como *nieve marina*, una matriz de partículas exopoliméricas que facilita la coagulación y acelera la tasa de sedimentación del MOP (Corzo *et al.*, 2005; Halfter *et al.*, 2022).

El hundimiento del MOP hacia las capas profundas involucra una serie de transformaciones físicas, químicas y biológicas que modifican tanto su composición como su cantidad (Lee *et al.*, 2004). El MOP presente en los ecosistemas marinos incluye una fracción fácilmente asimilable y un componente refractario más difícil de degradar (Danovaro, 2009). La gran mayoría del MOP que es exportado desde las capas superficiales, es perdida a partir de la remoción preferencial de sus componentes más lábiles (Fabiano & Pusceddu, 1998). Aunque el fitoplancton suele dominar la composición orgánica del MOP en aguas superficiales, los organismos heterótrofos generan importantes transformaciones a nivel molecular mediante la disolución, disgregación o consumo de sus componentes durante su tránsito en la columna de agua (Lee *et al.*, 2004).

Los mecanismos de descomposición y transformación del MOP, así como las tasas a las cuales estos ocurren, varían dependiendo de la estructura macromolecular del mismo y su disponibilidad como sustrato para el metabolismo heterotrófico (Stukel & Ducklow, 2017). Carbohidratos (CHO), lípidos (LIP), proteínas (PRT) y ácidos nucleicos, son compuestos mayoritariamente provenientes de fuentes autóctonas, al ser producidos por organismos planctónicos en las aguas más superficiales, y representan la fracción más lábil del MOP, a diferencia de componentes refractarios alóctonos como la celulosa y la lignina, pobres desde el punto de vista alimenticio para los organismos marinos (Antonio *et al.*, 2010; Kharbush *et al.*, 2020).

## 1.2. Contexto oceanográfico: el océano Austral

El océano Austral (OA) es el único océano ininterrumpido por masas continentales, y conecta las tres principales cuencas oceánicas (Atlántico, Pacífico e Índico), limitando con el continente antártico hacia el sur y careciendo de un límite físico realmente definido hacia el norte (Talley *et al.*, 2011), aunque se considera el paralelo de 60° de latitud sur como límite norte. El flujo continuo de la corriente Circumpolar Antártica alrededor del continente antártico, impulsada por los vientos del oeste, juega un rol clave en la evolución de los patrones climáticos globales por su intercambio de

calor, humedad y gases con la atmósfera (Rintoul *et al.*, 2001). En este contexto, el OA constituye uno de los principales sumideros de CO<sub>2</sub>, contribuyendo de manera decisiva al ciclo del carbono y a la regulación climática global (Schneider *et al.*, 2003). El OA actúa como una válvula que regula el intercambio entre las capas profundas y someras del océano: el afloramiento de aguas profundas devuelve nutrientes y carbono a las capas superiores, mientras que el hundimiento de las aguas desde la superficie transfiere oxígeno y CO<sub>2</sub> de origen antrópico hacia el océano profundo (Deppeler & Davidson, 2017; Sallée, 2018).

El aumento de la temperatura en los océanos afecta directamente la producción de hielo marino y las tasas de derretimiento, así como la solubilidad de los gases, que desempeñan un papel crucial en los ciclos de vida de los organismos marinos, la estructura de la columna de agua (estratificación, mezcla) y los procesos biogeoquímicos dominantes que sustentan la productividad en las regiones polares (St John Glew *et al.*, 2021). La península Antártica (PA) ha experimentado un progresivo calentamiento durante las últimas décadas; el aumento en la temperatura atmosférica y de las aguas superficiales ha sido vinculada con la dinámica de avance y retracción del hielo en la región (Kim *et al.*, 2005). La estacionalidad del hielo es un factor determinante en la regulación de la producción primaria, y en la acumulación y distribución del MOP en la columna de agua y en los sedimentos del OA (Costa *et al.*, 2020). La descarga de agua derivada del derretimiento glaciar resulta en un mayor aporte de MOP de origen terrestre que, al estar formado por compuestos más recalcitrantes con bajo contenido de nutrientes y energéticamente pobres, tiene un valor alimenticio más bajo para los organismos marinos (Antonio *et al.*, 2010; Venturini *et al.*, 2020).

En el OA, el Estrecho de Bransfield (EB) comprende una serie de cuencas que, por su cercanía a la costa, están sujetas a cambios estacionales de los frentes marinos y regímenes de viento, así como a perturbaciones locales de la PA, las cuales pueden tener un efecto sobre las características de las masas de agua allí presentes (Gordo, 2013). Además, el EB es una zona de fractura tectónica donde se cree que interactúan simultáneamente un proceso de subducción y otro de separación de placas (Rodrigo *et al.*, 2018). En este sentido, se trata de un *rift* activo capaz de producir afloramientos de magma y actividad hidrotermal efímera, como ha sido propuesto para varias estructuras volcánicas que se elevan desde el lecho marino, destacando la isla Decepción, el complejo Three Sisters y los montes submarinos Orca y Little Point (Klinkhammer *et al.*, 1996; Bohrmann *et al.*, 1998; Klinkhammer *et al.*, 2001; Petersen *et al.*, 2004; Rodrigo *et al.*, 2018). Estos ambientes profundos tienen una importante huella geoquímica a partir de sus flujos de energía y los fluidos químicos que liberan (Levin *et al.*, 2016). Las emanaciones hidrotermales constan de compuestos como sulfuro, metano e hidrógeno

que estimulan la fijación de carbono por medio de la quimiosíntesis, sustentando comunidades biológicas propias de estos ambientes reductores y quimiosintéticos e impactando sobre los ciclos biogeoquímicos marinos (Petersen *et al.*, 2011; Levin *et al.*, 2016).

Al encontrarse en una región sensible a cambios en factores ambientales, el EB supone un sitio ideal para el análisis y seguimiento de los flujos de partículas biogénicas, ya que los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la columna de agua, así como, la geomorfología del fondo marino, pueden alterar la composición del MOP, y a su vez su grado de exportación hacia las aguas profundas y los sedimentos marinos (Kim *et al.*, 2005).

### 1.3. Caracterización bioquímica e isotópica del material orgánico particulado

Varios estudios cuantitativos del MOP suspendido en la columna de agua han sido realizados en distintas regiones del OA, aunque información más detallada sobre sus atributos bioquímicos y labilidad a distintas profundidades es menos abundante (Kim *et al.*, 2020; Venturini *et al.*, 2020; Cau *et al.*, 2021). La determinación de la composición del material orgánico permite inferir el estado metabólico de las partículas en suspensión y, por tanto, comprender mejor su papel en los procesos bioquímicos de la columna de agua (Fabiano *et al.*, 1996). En este sentido, la cuantificación de biopolímeros orgánicos como CHO, LIP y PRT es un método eficaz para estimar la labilidad del carbono orgánico y, con ello, la fracción del MOP realmente biodisponible para los consumidores (Misic *et al.*, 2017).

Los CHO son componentes estructurales y de almacenamiento de energía fundamentales en los organismos fotosintéticos. Aunque una fracción importante de los CHO sintetizados por los productores primarios es remineralizada, una parte se mantiene preservada (Veuger *et al.*, 2012). Siendo compuestos estructuralmente diversos, son consumidos preferencialmente según sus características moleculares, permitiendo su uso para rastrear las fuentes originales de los componentes detríticos del carbono orgánico (Grosse *et al.*, 2021). Los LIP comprenden cientos de moléculas hidrofóbicas como pigmentos fotosintéticos, hidrocarburos y ésteres/éteres de glicerol, los cuales conforman alrededor del 20 % del carbono orgánico en las células (Kharbush *et al.*, 2020). Son compuestos altamente estables, resistentes a la degradación, de manera tal que su preservación en el MOP es mayor (Meyers, 2003). Debido a la especificidad en su producción por distintos organismos, los LIP son excelentes indicadores del estado de degradación del MOP, o bien para discriminar entre los microorganismos que contribuyen a su producción, degradación o exportación (Kharbush *et al.*, 2020). Los aminoácidos, constituyentes básicos de las PRT, son los

elementos identificables más abundantes del MOP marino, presentes tanto en células autótrofas y heterótrofas, como en material detrítico (Bridoux *et al.*, 2015).

Por su parte, el análisis elemental y de isótopos estables de carbono y nitrógeno proporciona información acerca de los patrones relacionados a la fuente biosintética predominante del MOP y del metabolismo heterótrofo asociado (St John Glew *et al.*, 2021). Atributos como la temperatura, la disponibilidad de oxígeno y de nutrientes, y procesos de afloramiento y estructura de las comunidades biológicas, determinan el fraccionamiento isotópico del carbono en el MOP, por lo cual su razón isotópica suele emplearse para estudiar las condiciones oceanográficas presentes en el momento de la fijación del carbono. Asimismo, la razón isotópica del nitrógeno refleja procesos como la absorción de nitratos, nitrificación, desnitrificación y remineralización, entre otros (Soares *et al.*, 2015).

## 2. Objetivos

### 2.1. *Objetivo general*

Caracterizar la distribución y composición bioquímica del MOP en suspensión y su variación con la profundidad en la columna de agua, en la cuenca Central del Estrecho de Bransfield.

### 2.2. *Objetivos específicos*

Evaluar la concentración, calidad y degradación del MOP a diferentes profundidades en la columna de agua, a partir de análisis de biopolímeros orgánicos (CHO, LIP, PRT).

Identificar el origen y las fuentes de procedencia del MOP mediante su composición elemental (C, N) y firmas isotópicas ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ).

Determinar la influencia de las condiciones termohalinas (temperatura, salinidad), densidad y oxígeno disuelto en la distribución y calidad del MOP en la columna de agua.

### 3. Materiales y Métodos

#### 3.1. Área de estudio

El EB es un largo canal semicerrado que se encuentra en paralelo a la PA, con la cual limita hacia el sureste, y enfrentando al Pasaje de Drake a lo largo de las islas Shetland del Sur, que suponen su límite noroeste (Vorrath *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2020). Se trata de una cuenca de arco posterior o retroarco, con una extensión aproximada de 450 km y un ancho máximo de 100 km, formada por interacciones complejas entre las placas Antártica y Sudamericana, y las microplacas de Phoenix, Scotia y Shetland (Prieto *et al.*, 1998; Heroy *et al.*, 2008; Dziak *et al.*, 2010). Las cuencas de retroarco son típicamente marinas y marginales o parcialmente aisladas, alargadas, formadas en regiones de subducción y detrás de los sistemas de arcos de islas. Está generalmente aceptado que estas se forman a partir de procesos extensionales, los cuales se atribuyen más comúnmente al retroceso de la placa subducida (Karig, 1971; Almendros *et al.*, 2020).

La región de las islas Shetland del Sur y la PA supone el remanente de una antigua gran zona de subducción que se mantuvo activa durante la mayor parte de los últimos 200 Ma. La placa de Phoenix, una de las más grandes del Pacífico durante el Mesozoico-Cenozoico, habría subducido a la placa Antártica hasta su cese hace aproximadamente 4 Ma, quedando reducida a un pequeño fragmento incorporado a la placa Antártica (Lawver *et al.*, 1995; Prieto *et al.*, 1998). Sin embargo, existe evidencia que sugiere una continuación del proceso de subducción, que ejerce tensiones sobre la placa Shetland, la cual estaría “arqueándose” sobre sí misma, separándose de la placa Antártica y generando como resultado la apertura del EB (Ibáñez *et al.*, 1997; Prieto *et al.*, 1998). En este sentido, el estrecho se está abriendo sobre una zona de corteza continental y podría encontrarse en la transición desde un *rifting* hacia la expansión del suelo oceánico, en relación con la formación de geofomas como islas volcánicas y montes submarinos (Almendros *et al.*, 2020).

En el EB se reconocen las cuencas Oeste, Central y Este, con profundidades máximas de 1370, 1960 y 2750 m, respectivamente (Frey *et al.*, 2023). A pesar de su complejidad topográfica, el estrecho se abre a los mares de Scotia y Weddell al este y al mar de Bellingshausen al oeste, los cuales intercambian masas de agua, sedimentos y biota con el EB a través de pequeños pasajes y canales (Wilson *et al.*, 1999). Impulsadas por los vientos y condicionadas por la compleja topografía, las aguas provenientes de los mares adyacentes, de las corrientes costeras y del derretimiento del hielo, intruyen y se combinan en el EB generando un complejo patrón de circulación, así como diversos frentes y *eddies* (Zhou *et al.*, 2020).

El EB constituye una región de transición con condiciones oceanográficas contrastantes, donde coexisten y se mezclan varias masas de agua con propiedades termohalinas distintivas, moduladas por la topografía y la circulación local y regional (Gordo, 2013). En la superficie y subsuperficie, la estructura termohalina del EB está formada principalmente por dos masas de agua: Agua Transicional con influencia del mar de Bellingshausen (TBW, por sus siglas en inglés) y Agua Transicional con influencia del mar de Weddell (TWW). La primera comprende aguas relativamente cálidas, poco salinas y estratificadas, que ingresan a través del Estrecho de Gerlache y la cuenca Oeste del EB, moviéndose hacia el noreste y originando la corriente de Bransfield. Por otro lado, las aguas de la TWW tienden a ingresar desde el extremo de la PA a partir de la cuenca Este, en dirección suroeste, y son más frías, salinas y casi homogéneas (García *et al.*, 1994, 2002; Gordo, 2013). Las transiciones entre estas dos masas de agua definen los frentes de Bransfield y de Península, los cuales se desplazan estacionalmente y responden a variaciones en el aporte de aguas costeras, vientos y forzantes a mesoescala (Sangrà *et al.*, 2011). En la estructura vertical típica del EB, también se ha observado la intrusión de Agua Profunda Circumpolar modificada (CDWm) como una cuña de aguas cálidas y salinas en los estratos intermedios (100 – 400 metros), y aguas frías, densas y homogéneas provenientes del Agua Profunda de Bransfield (BDW) y el Agua de Fondo de Bransfield (BBW) a profundidades mayores y en el fondo, respectivamente (Gordon & Nowlin, 1978; Tokarczyk, 1987; Wilson *et al.*, 1999; García *et al.*, 2002; Gordo, 2013).

El presente trabajo fue desarrollado en la cuenca Central del EB (Figura 1), que se halla separada de las cuencas Oeste y Este tomándose como referencia geográfica a las islas Decepción y Bridgeman, respectivamente. Además de suponer límites geomorfológicos para la cuenca Central, estas islas también definen un lineamiento neovolcánico constituido por una serie de estructuras volcánicas circulares, semicirculares y elongadas, entre las cuales ocurre la mayor parte de la actividad sísmica que ha sido registrada en el EB (Dziak *et al.*, 2010; Espinoza Celi *et al.*, 2023). El área en cuestión tiene una extensión de aproximadamente 230 km y un ancho que ronda los 60 km. Dispuestas hacia el norte a lo largo de su eje central, se elevan varias estructuras prominentes desde el fondo marino, siendo el monte submarino Orca y el complejo Three Sisters las más notables (Schreider *et al.*, 2014). El primero es considerado un volcán inactivo con forma prácticamente circular, de 20 km de ancho 1 km de altura, con su base a 1,5 km de profundidad y un cráter de 3 km de ancho (Hatzky, 2005; Schreider *et al.*, 2014). Por su parte, Three Sisters es una formación integrada por tres elevaciones extendidas longitudinalmente por más de 50 km, que abarcan 20 km

de ancho en su conjunto y 2 – 3 km individualmente, con alturas que oscilan entre 0,2 y 0,5 km, separadas entre ellas por depresiones lineales (Schreider *et al.*, 2014).

Así como las dorsales meso-oceánicas y los arcos volcánicos, las cuencas de retroarco suelen comprender sitios de importante actividad hidrotermal. Estas emanaciones del océano profundo suelen albergar diversas comunidades biológicas, pues suponen depósitos ricos en minerales y energía capaces de sustentar a productores quimioautótrofos (Du Preez & Fisher, 2018; Rodrigo *et al.*, 2018). Estos organismos emplean la energía de los fluidos liberados para producir compuestos orgánicos, utilizando como sustrato compuestos inorgánicos reducidos, por medio de la quimiosíntesis. De esta manera, introducen al ambiente materia orgánica que es distinta en composición a la producida por el fitoplancton en aguas superficiales (Rodrigo *et al.*, 2018; le Bris *et al.*, 2019). Esta materia ingresa a los otros niveles tróficos asociados a las emanaciones, pudiendo afectar aún más la composición del MOP suspendido en las aguas circundantes. Como resultado, el MOP en estas regiones puede mostrar una firma química distinta en comparación con otras áreas del OA, según la proximidad e intensidad de la actividad hidrotermal presente (Hernández-Sánchez *et al.*, 2024).

En particular en el EB, el trasfondo tectónico podría proporcionar condiciones favorables para la generación de sistemas hidrotermales (Dählmann *et al.*, 2001). Varias investigaciones han reportado evidencia de actividad hidrotermal en la cuenca Central del EB, como la alteración hidrotermal del material sedimentario (Suess *et al.*, 1987), altos niveles de compuestos inorgánicos (sulfuros de hierro, hierro-zinc, hierro-zinc-cobre, cloruro de zinc y óxidos de hierro y zinc) en la columna de agua y sedimentos (Lawver *et al.*, 1995; Bohrmann *et al.*, 1998; Petersen *et al.*, 2004), anomalías térmicas (Klinkhammer *et al.*, 1996; Rodrigo *et al.*, 2018) y ocurrencia de microorganismos termófilos e hipertermófilos (Rodrigo *et al.*, 2018).

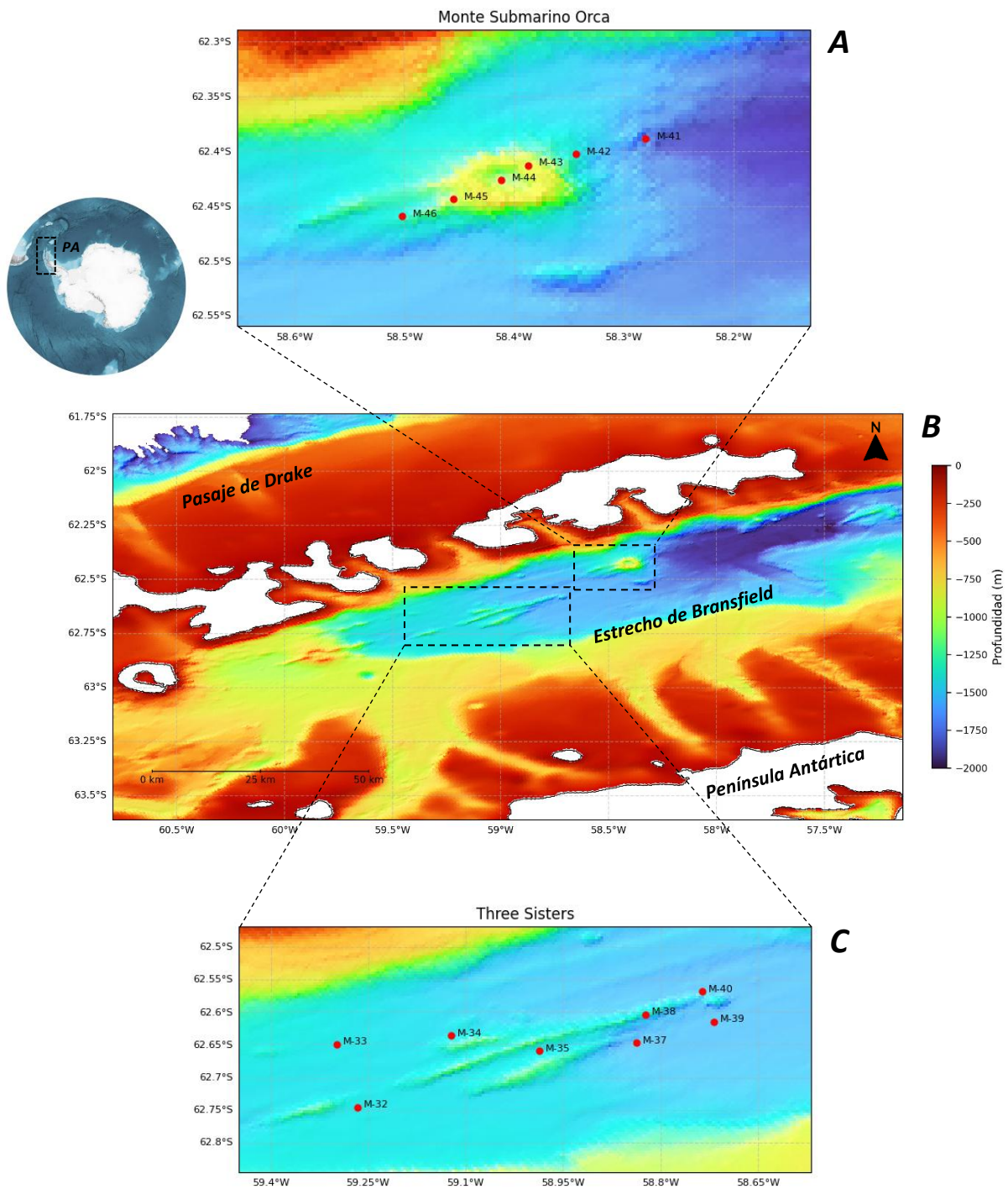
Además, los montes submarinos y geoformas similares suelen albergar agrupaciones de zooplancton y stocks de peces asociados, por lo cual la diversidad biológica suele ser alta, siendo muchas de las especies endémicas en estos sitios (Genin, 2004). Este fenómeno corresponde a lo que se ha denominado *efecto monte submarino*, asociado a diversos procesos influyentes en el entorno inmediato de estas elevaciones (Kiriakoulakis *et al.*, 2009) (Figura 2). Por ejemplo, el aumento de la productividad primaria local y de la densidad de organismos planctónicos y bentónicos podría atribuirse a la surgencia de aguas profundas y la retención de nutrientes a partir de procesos como las columnas de Taylor, las cuales resultan de la incidencia de un flujo de agua con tendencia rotacional, sobre una elevación topográfica aislada (Kiriakoulakis *et al.*, 2009; Meredith *et al.*, 2015) (Figura 2). La obstaculización del flujo

puede generar vórtices anticiclónicos y ciclónicos alrededor del obstáculo, distribuyendo el material en suspensión hacia la periferia del monte submarino (Meredith *et al.*, 2015).

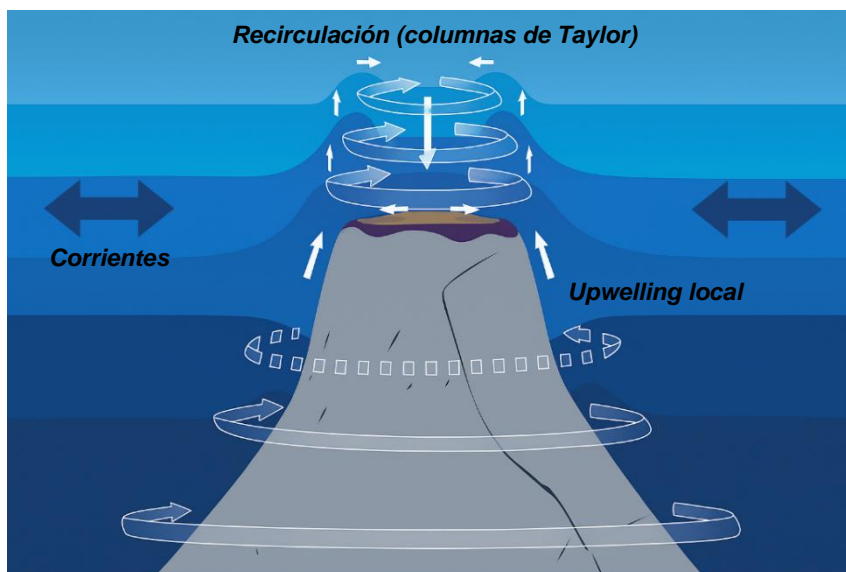
### 3.2. Estrategia de muestreo

El presente trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación “Evolución del volcanismo submarino en el estrecho de Bransfield: Relación de las emanaciones hidrotermales con la biodiversidad y el cambio climático”. El muestreo se realizó durante el crucero oceanográfico ORCA III, del 20 de enero al 26 de febrero de 2020, en la Campaña Antártica de Verano (CAV) 2019/2020, a bordo del R/V BAP Carrasco de la Marina de Guerra del Perú, como parte de un convenio de cooperación científica entre Uruguay (Facultad de Ciencias, Universidad de la República, y el Instituto Antártico Uruguayo) y Perú (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú, y el Programa Antártico Peruano).

Las muestras fueron tomadas a distintas profundidades de la columna de agua (superficie, base de la termoclina, zona intermedia y fondo) (ver profundidades puntuales en la Tabla 1 y la Tabla 2) utilizando una roseta oceanográfica con 12 botellas Niskin (5 L), acoplada a un CTD Seabird SBE 19 PLUS. El CTD fue a su vez equipado con sensores de oxígeno disuelto y un fluorómetro cuya señal de fluorescencia in vivo fue calibrada para la estimación de la clorofila-a. También se realizó el estudio batimétrico con una ecosonda multihaz Kongsberg EM-122 a una frecuencia de 12 kHz. Se tomaron muestras en 8 estaciones localizadas en el complejo Three Sisters (M-32 a M-35 y M-37 a M-40) y en 6 estaciones en el monte submarino Orca (M-41 a M-46) (Figura 1). En las estaciones M-35, M-37, M-39, M-40 y M-42, se colectaron dos muestras asociadas a la zona intermedia (estas segundas muestras de aquí en adelante denominadas Intermedia II), en lugar de una, por tratarse de estaciones con mayor profundidad. Por otra parte, no fue posible tomar muestras de fondo en las estaciones M-39 y M-45 debido a las condiciones del mar. En Three Sisters, la estación M-36 fue eliminada debido a dificultades logísticas. En cada estación se hicieron perfiles de temperatura y salinidad, y en algunos casos, se complementaron con perfiles de concentración de oxígeno disuelto y fluorescencia. A bordo del buque las muestras de agua de mar fueron filtradas a través de filtros GF/F (Whatmann®, 47 mm, con 0,7 µm de tamaño de poro) previamente calcinados a 450 °C durante 4 hs, bajo vacío suave para concentrar las partículas en suspensión. Los filtros fueron refrigerados a -20 °C hasta su posterior análisis en el laboratorio.



**Figura 1.** Mapa de la región de estudio (B) incluyendo acercamientos a los sitios de estudio y las estaciones de muestreo correspondientes a Orca (A) y Three Sisters (C). El relieve de fondo está representado a partir de datos batimétricos obtenidos del General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO), utilizando la cuadrícula de 2021.



**Figura 2.** Ilustración representativa del *efecto monte submarino*. Adaptada de la portada del *Journal of Geophysical Research*, vol. 125 (2020).

### 3.3. Análisis de laboratorio

El análisis de biopolímeros orgánicos en suspensión se realizó espectrofotométricamente por métodos colorimétricos, siguiendo los protocolos descritos por Danovaro (2009). Los filtros utilizados fueron fraccionados en alícuotas para los distintos análisis: cada determinación de biopolímero se realizó a partir de un  $\frac{1}{4}$  filtro, utilizándose  $\frac{1}{2}$  filtro en total para obtener pseudo-réplicas (análisis en duplicado). La concentración de CHO totales fue determinada mediante la metodología descrita por DuBois *et al.* (1956), basada en la capacidad de azúcares simples, polisacáridos y sus derivados, de resultar en un producto de coloración amarilla tras la reacción con fenol y ácido sulfúrico concentrado, que puede leerse por espectrofotometría a una longitud de onda de 485 nm. Los LIP fueron cuantificados según Bligh & Dyer (1959) y Marsh & Weinstein (1966), utilizando una solución de cloroformo y metanol para su extracción, y leídos a 375 nm. Para la concentración de PRT totales, se utilizó el método de Lowry *et al.* (1951), modificado por Hartree (1972), que se basa en la capacidad de los aminoácidos tirosina, triptófano y algunos complejos proteína-ion  $\text{Cu}^{2+}$  de reducir el ácido fosfomolibdico-fosfotúngstico presente en el reactivo de Folin-Ciocalteu, resultando en un producto azulado cuya absorbancia se determina a una longitud de onda de 650 nm. Las concentraciones de CHO, LIP y PRT fueron expresadas como equivalentes de glucosa, tripalmitina y albúmina sérica bovina, respectivamente.

Los análisis de carbono orgánico total y  $\delta^{13}\text{C}$ , así como de nitrógeno total y  $\delta^{15}\text{N}$ , se realizaron a partir de submuestras diferentes de un mismo filtro GF/F. Las submuestras destinadas al análisis de carbono fueron acidificadas mediante exposición a vapores de HCl 1N (*acid fuming*) en un desecador de vidrio, siguiendo los métodos

descritos por Levin & Currin (2012). Debido a que la acidificación de las muestras puede alterar la firma isotópica del nitrógeno (Ryba & Burgess, 2002), las submuestras utilizadas para el análisis de nitrógeno total y  $\delta^{15}\text{N}$  no fueron acidificadas y en su lugar, fueron pretratadas mediante un enjuague con agua Milli-Q, según Levin & Currin (2012). Finalmente, todos los filtros fueron sometidos a análisis elemental e isotópico. Es relevante destacar que, por razones presupuestales, estos análisis fueron realizados únicamente para los filtros correspondientes a la base de la termoclina.

Para el análisis elemental e isotópico, se transfirió una alícuota de cada filtro a una cápsula de estaño, la cual fue procesada en un analizador elemental Thermo Flash HT Plus o Costech 4010, acoplado a un espectrómetro de masas de razón isotópica (IRMS) Thermo Delta V Plus, en el Centro de Isótopos Estables de la Universidad de Nuevo México (CSI-UNM, USA). Las firmas isotópicas de carbono y nitrógeno de las muestras se expresaron en la unidad delta ( $\delta$ ) según nomenclatura estándar:  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  (‰) =  $[(R_{\text{muestra}} / R_{\text{estándar}}) - 1] \times 1000$  (donde R es  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  o  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ , respectivamente). Las proporciones de isótopos de carbono y nitrógeno se reportaron en relación a los estándares Vienna Pee Dee Belemnite (V-PDB) y V-AIR, respectivamente. Se corrieron tres estándares internos de laboratorio al inicio, a intervalos entre muestras y al final de cada sesión analítica. La precisión analítica calculada a partir de los estándares fue  $\pm 0,1$  ‰ tanto para el  $\delta^{13}\text{C}$  como para el  $\delta^{15}\text{N}$ . Los análisis se normalizaron con los estándares de laboratorio calibrados utilizando NBS 21, NBS 22 y USGS 24 para el  $\delta^{13}\text{C}$ , y respecto a OIEA N1, OIEA N2 y USGS 43 para el  $\delta^{15}\text{N}$ .

#### 3.4. *Tratamiento de datos*

Previo al análisis estadístico, se realizaron representaciones gráficas mediante diagramas de caja (BOXPLOT) para las variables fisicoquímicas de la columna de agua y las variables bioquímicas de composición del MOP en suspensión, con el objetivo de explorar la distribución de los datos y visualizar tendencias generales entre sitios y profundidades. Con el fin de evaluar posibles diferencias espaciales (entre sitios) y verticales (entre profundidades), posteriormente se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad (homogeneidad de varianzas) de los datos. La normalidad se examinó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, aplicada a cada grupo cuando el tamaño muestral lo permitió ( $n \geq 3$ ). La homocedasticidad se evaluó mediante la prueba de Levene. Cuando los datos cumplieron simultáneamente los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se aplicó un análisis paramétrico (ANOVA de una vía). En aquellos casos en que el ANOVA resultó significativo, las diferencias pareadas se evaluaron mediante el test post-hoc de Tukey. Cuando uno o ambos supuestos no se

cumplieron, se utilizó una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar medianas entre grupos. En estos casos, las comparaciones múltiples se realizaron mediante tests post-hoc no paramétricos (Dunn o Conover, dependiendo de la variable analizada), con corrección por comparaciones múltiples utilizando los métodos de Holm o Bonferroni. El nivel de significancia se estableció como  $p < 0,05$  para todos los análisis estadísticos (Zar, 2010). Las variables fisicoquímicas consideradas fueron la temperatura, salinidad y clorofila-a. No se consideró el oxígeno disuelto debido a la ausencia de datos en el sitio Orca. Asimismo, hubo faltantes puntuales para las otras tres variables en algunas profundidades de ciertas estaciones de este mismo sitio. Por otra parte, las variables bioquímicas consideradas fueron las concentraciones totales de CHO, LIP y PRT. Ya que solamente algunas estaciones cuentan con una segunda profundidad intermedia, las profundidades consideradas en estos análisis fueron la superficie, base de la termoclina, intermedia y el fondo.

Para identificar patrones de ordenamiento e inferir posibles gradientes en la columna de agua en las distintas estaciones de Three Sisters y Orca, se aplicaron Análisis de Componentes Principales (PCA, por sus siglas en inglés) de forma independiente para cada sitio. Este enfoque multivariado es apropiado cuando se trabaja con múltiples variables potencialmente correlacionadas, ya que permite reducir la dimensionalidad del conjunto de datos (Jolliffe & Cadima, 2016) así facilitando la visualización de las relaciones entre estaciones y profundidades. Todas las variables consideradas fueron estandarizadas mediante un escalado de tipo z (media = 0, desviación estándar = 1), con el objetivo de evitar la influencia de las diferencias de escala y unidades entre variables, y los PCA fueron realizados sobre la matriz de correlaciones resultante. Para Three Sisters fueron incluidas ocho variables: profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila-a y concentraciones de CHO, LIP y PRT. En este caso, se consideraron todas las profundidades muestreadas en cada estación (superficie, base de la termoclina, intermedia, fondo y una segunda profundidad intermedia en las estaciones M-35, M-37 y M-40). De manera similar, se realizó un PCA para el sitio Orca utilizando las mismas variables consideradas previamente, con excepción del oxígeno disuelto, cuya inclusión no fue posible por el vacío de datos. En este sitio, la estación M-42 presentó dos profundidades intermedias, mientras que las estaciones M-44 y M-46 incluyeron únicamente la superficie y base de la termoclina, debido a la ausencia de datos fisicoquímicos en los estratos más profundos. Todos los análisis estadísticos y figuras fueron realizados en el entorno de programación Python (versión 3.10), empleando bibliotecas como *scikit-learn*, *matplotlib*, *pandas* y *seaborn*, y ejecutados en la plataforma colaborativa Google Colab.

Las razones proteínas/carbohidratos (PRT:CHO) y lípidos/carbohidratos (LIP:CHO) fueron calculadas y utilizadas como indicadores del estado de degradación y del valor energético del MOP, respectivamente. Valores de la razón PRT:CHO superiores a 1, indican la presencia de material orgánico fresco, mientras que valores inferiores a 1 son reflejo de material orgánico detrítico, parcialmente degradado. Por su parte, razones CHO:LIP mayores a 1 sugieren la presencia de material orgánico con menor valor energético para los consumidores, en tanto que razones inferiores a 1 indican material orgánico de mayor valor energético (Galois *et al.*, 2000; Pusceddu *et al.*, 2011). Las concentraciones totales de los tres biopolímeros orgánicos para cada profundidad, expresadas en  $\mu\text{g L}^{-1}$ , fueron convertidas en equivalente de carbono y sumadas para obtener una estimación del carbono biopolimérico (CBP), utilizando factores de 0,40 mg (CHO), 0,75 mg (LIP) y 0,49 mg (PRT) de C/mg para cada biopolímero (Isla *et al.*, 2006; Pusceddu *et al.*, 2009). El CBP refleja la fracción más lábil de carbono orgánico particulado total, lo que permite evaluar su biodisponibilidad para los consumidores heterótrofos (Fabiano & Danovaro, 1994; Pusceddu *et al.*, 2011).

## 4. Resultados

### 4.1. Propiedades fisicoquímicas de la columna de agua

Las variables fisicoquímicas presentaron una distribución vertical definida en ambos sitios de estudio, con valores organizados por estratos o profundidades, según se detalla en la Tabla 1 y Tabla 2.

La temperatura en la superficie varió entre 2,16 y 2,69 °C en Three Sisters, y entre 1,70 y 2,17 °C en Orca, sitio con temperaturas significativamente menores para esta profundidad ( $p < 0,05$ ) (Figura 3) (*ver resultados estadísticos en la Tabla S1 del material suplementario*). En la base de la termoclina, los valores estuvieron entre 1,99 y 2,44 °C en Three Sisters, y entre 1,89 y 2,27 °C en Orca. En la zona intermedia se registraron temperaturas negativas, con rangos de -0,62 a -0,98 °C en Three Sisters y -0,50 a -1,16 °C en Orca. En el fondo, la temperatura se mantuvo entre -1,40 y -1,51 °C en el primer sitio y entre -1,20 y -1,47 °C en el segundo. No se encontraron diferencias significativas entre sitios tanto para la termoclina como para los estratos más profundos ( $p > 0,05$ ) (Figura 3) (Tabla S1).

Respecto a la salinidad, en la superficie se registraron valores entre 34,16 y 34,20 en Three Sisters y entre 34,01 y 34,12 en Orca, donde fueron significativamente menores ( $p < 0,05$ ) (Figura 3) (Tabla S1). En la base de la termoclina, la salinidad también fue significativamente menor en Orca que en Three Sisters ( $p < 0,05$ ) (Figura 3) (Tabla S1), con rangos entre 34,13 a 34,17 y 34,18 a 34,30, respectivamente. En la intermedia, se alcanzaron valores entre 34,49 y 34,56 en Three Sisters, y 34,47 y 34,53 en Orca. En el fondo, los rangos fueron de 34,52 a 34,54 en ambos sitios.

El oxígeno disuelto fue medido únicamente en Three Sisters, donde osciló entre 7,18 y 7,33 mg L<sup>-1</sup> en superficie, 7,17 y 7,30 mg L<sup>-1</sup> en la base de la termoclina, 5,81 y 6,26 mg L<sup>-1</sup> en la intermedia, y 6,38 y 6,42 mg L<sup>-1</sup> en el fondo.

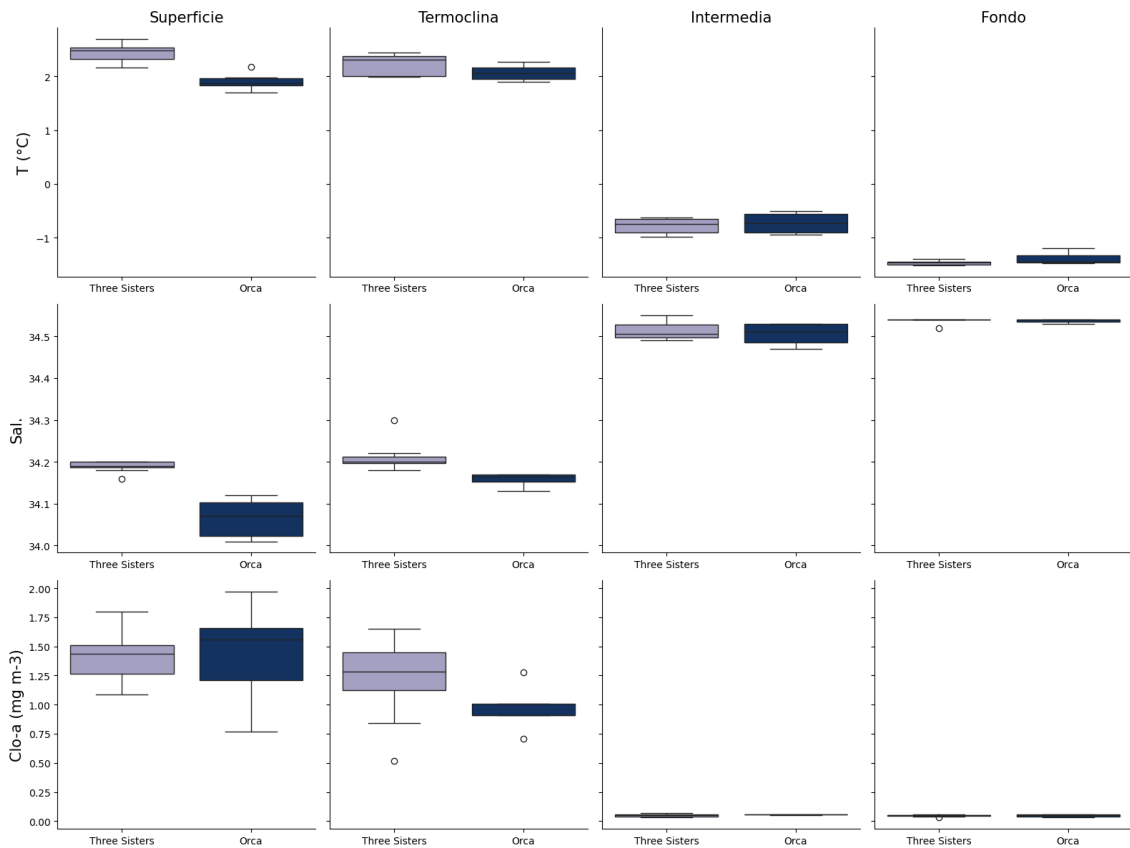
Los valores de clorofila-a en superficie variaron entre 1,09 y 1,80 mg m<sup>-3</sup> en Three Sisters, y entre 0,77 y 1,97 mg m<sup>-3</sup> en Orca. En la base de la termoclina, los valores se ubicaron entre 0,52 y 1,65 mg m<sup>-3</sup> en Three Sisters, y entre 0,71 y 1,28 mg m<sup>-3</sup> en Orca. En las profundidades intermedias, se registraron concentraciones entre 0,03 y 0,07 mg m<sup>-3</sup> en Three Sisters y entre 0,05 y 0,06 mg m<sup>-3</sup> en Orca. En el fondo, los valores se mantuvieron entre 0,03 y 0,06 mg m<sup>-3</sup> en ambos sitios. No se hallaron diferencias significativas entre ambos sitios para todos los estratos ( $p > 0,05$ ) (Figura 3) (Tabla S1).

**Tabla 1.** Coordenadas geográficas, profundidad (Prof.), temperatura (T), salinidad (Sal.), concentración de oxígeno disuelto (OD.) y clorofila-a (Clo-a) en las estaciones de muestreo en Three Sisters.

| Estación    | Lat. (S)    | Long. (W)   | Prof. (m)           | T (°C) | Sal.  | OD. (mg L <sup>-1</sup> ) | Clo-a (mg m <sup>-3</sup> ) |
|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------|-------|---------------------------|-----------------------------|
| <b>M-32</b> | 62° 44' 46" | 59° 16' 1"  | Superficie (10)     | 2,36   | 34,16 | 7,29                      | 1,17                        |
|             |             |             | Termoclina (39)     | 2,27   | 34,18 | 7,28                      | 1,27                        |
|             |             |             | Intermedia (360)    | -0,98  | 34,52 | 6,21                      | 0,03                        |
|             |             |             | Fondo (1390)        | -1,47  | 34,54 | 6,42                      | 0,06                        |
| <b>M-33</b> | 62° 38' 59" | 59° 17' 55" | Superficie (10)     | 2,43   | 34,19 | 7,23                      | 1,09                        |
|             |             |             | Termoclina (38)     | 2,38   | 34,19 | 7,22                      | 1,30                        |
|             |             |             | Intermedia (665)    | -0,84  | 34,55 | 5,84                      | 0,05                        |
|             |             |             | Fondo (1375)        | -1,46  | 34,54 | 6,40                      | 0,05                        |
| <b>M-34</b> | 62° 38' 10" | 59° 7' 21"  | Superficie (10)     | 2,16   | 34,19 | 7,33                      | 1,80                        |
|             |             |             | Termoclina (31)     | 2,00   | 34,20 | 7,30                      | 1,65                        |
|             |             |             | Intermedia (650)    | -0,88  | 34,55 | 5,87                      | 0,04                        |
|             |             |             | Fondo (1430)        | -1,44  | 34,54 | 6,38                      | 0,03                        |
| <b>M-35</b> | 62° 39' 35" | 58° 59' 13" | Superficie (10)     | 2,69   | 34,19 | 7,22                      | 1,53                        |
|             |             |             | Termoclina (44)     | 2,38   | 34,20 | 7,23                      | 1,44                        |
|             |             |             | Intermedia (200)    | -0,62  | 34,49 | 6,15                      | 0,05                        |
|             |             |             | Intermedia II (650) | -0,98  | 34,55 | 6,02                      | 0,06                        |
| <b>M-37</b> | 62° 38' 50" | 58° 50' 13" | Superficie (10)     | 2,54   | 34,20 | 7,23                      | 1,42                        |
|             |             |             | Termoclina (41)     | 1,99   | 34,30 | 7,17                      | 0,52                        |
|             |             |             | Intermedia (200)    | -0,66  | 34,49 | 6,19                      | 0,07                        |
|             |             |             | Intermedia II (630) | -0,93  | 34,55 | 5,91                      | 0,03                        |
| <b>M-38</b> | 62° 36' 11" | 58° 49' 25" | Superficie (10)     | 2,52   | 34,18 | 7,20                      | 1,50                        |
|             |             |             | Termoclina (48)     | 2,35   | 34,22 | 7,19                      | 1,22                        |
|             |             |             | Intermedia (330)    | -0,95  | 34,51 | 6,26                      | 0,03                        |
|             |             |             | Fondo (1168)        | -1,45  | 34,54 | 6,42                      | 0,05                        |
| <b>M-39</b> | 62° 36' 53" | 58° 44' 9"  | Superficie (10)     | 2,19   | 34,18 | 7,22                      | 1,45                        |
|             |             |             | Termoclina (39)     | 2,01   | 34,20 | 7,21                      | 0,84                        |
|             |             |             | Intermedia (200)    | -0,65  | 34,50 | 6,14                      | 0,06                        |
|             |             |             | Intermedia II (575) | -0,83  | 34,56 | 5,81                      | 0,06                        |
| <b>M-40</b> | 62° 34' 7"  | 58° 44' 9"  | Superficie (10)     | 2,53   | 34,20 | 7,18                      | 1,30                        |
|             |             |             | Termoclina (44)     | 2,44   | 34,21 | 7,17                      | 1,48                        |
|             |             |             | Intermedia (200)    | -0,66  | 34,50 | 6,19                      | 0,06                        |
|             |             |             | Intermedia II (565) | -0,88  | 34,55 | 5,88                      | 0,06                        |
|             |             |             | Fondo (1624)        | -1,51  | 34,54 | 6,42                      | 0,05                        |

**Tabla 2.** Coordenadas geográficas, profundidad (Prof.), temperatura (T), salinidad (Sal.) y clorofila-a (Clo-a) en las estaciones de muestreo en Orca. n.d.: no disponible.

| Estación    | Lat. (S)    | Long. (W)   | Prof. (m)           | T (°C) | Sal.  | Clo-a (mg m <sup>-3</sup> ) |
|-------------|-------------|-------------|---------------------|--------|-------|-----------------------------|
| <b>M-41</b> | 62° 23' 20" | 58° 16' 48" | Superficie (10)     | 2,17   | 34,12 | 1,21                        |
|             |             |             | Termoclina (50)     | 2,17   | 34,13 | 1,28                        |
|             |             |             | Intermedia (315)    | -0,50  | 34,49 | 0,06                        |
|             |             |             | Fondo (1750)        | -1,47  | 34,54 | 0,03                        |
| <b>M-42</b> | 62° 24' 10" | 58° 20' 37" | Superficie (10)     | 1,82   | 34,01 | 1,66                        |
|             |             |             | Termoclina (50)     | 1,93   | 34,17 | 0,91                        |
|             |             |             | Intermedia (200)    | -0,58  | 34,47 | 0,05                        |
|             |             |             | Intermedia II (950) | -1,16  | 34,54 | 0,05                        |
|             |             |             | Fondo (1350)        | -1,45  | 34,54 | 0,06                        |
| <b>M-43</b> | 62° 24' 46" | 58° 23' 14" | Superficie (10)     | 1,70   | 34,01 | 1,97                        |
|             |             |             | Termoclina (52)     | 1,89   | 34,15 | 0,71                        |
|             |             |             | Intermedia (550)    | -0,89  | 34,53 | 0,06                        |
|             |             |             | Fondo (900)         | -1,20  | 34,53 | 0,05                        |
| <b>M-44</b> | 62° 25' 36" | 58° 24' 44" | Superficie (10)     | 1,90   | 34,06 | 1,56                        |
|             |             |             | Termoclina (48)     | 2,27   | 34,17 | 1,01                        |
|             |             |             | Intermedia (570)    | n.d.   | n.d.  | n.d.                        |
|             |             |             | Fondo (1070)        | n.d.   | n.d.  | n.d.                        |
| <b>M-45</b> | 62° 26' 36" | 58° 27' 18" | Superficie (10)     | 1,98   | 34,11 | n.d.                        |
|             |             |             | Termoclina (66)     | 1,99   | 34,17 | n.d.                        |
|             |             |             | Intermedia (525)    | -0,94  | 34,53 | n.d.                        |
| <b>M-46</b> | 62° 27' 34" | 58° 30' 7"  | Superficie (10)     | 1,85   | 34,08 | 0,77                        |
|             |             |             | Termoclina (41)     | 2,11   | 34,16 | 0,91                        |
|             |             |             | Intermedia (600)    | n.d.   | n.d.  | n.d.                        |
|             |             |             | Fondo (1172)        | n.d.   | n.d.  | n.d.                        |



**Figura 3.** Diagramas de caja (BOXPLOT) para los parámetros fisicoquímicos (filas) a distintas profundidades de la columna de agua (columnas) en los dos sitios estudiados. La línea central de la caja indica la mediana de los datos. Los extremos inferior y superior indican el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), respectivamente. La diferencia entre Q1 y Q3 define la longitud de la caja, y corresponde al rango intercuartílico (IQR). Los bigotes en forma T se extienden desde los extremos de la caja hasta los valores mínimo (inferior) y máximo (superior) dentro de 1,5 veces el IQR. Los puntos vacíos situados por fuera de los bigotes representan valores atípicos (*outliers*). Nota: en el sitio Orca hay vacíos de datos para las tres variables contempladas.

#### 4.2. Composición bioquímica del MOP en suspensión

Las concentraciones de CHO, LIP y PRT en las distintas profundidades de las estaciones de Three Sisters y Orca se presentan en la Figura 4 y Figura 5, respectivamente. Se observó una clara estratificación vertical en las concentraciones de los biopolímeros, con los valores más elevados en superficie y una disminución progresiva hacia los estratos más profundos de la columna de agua en ambos sitios. Este patrón se visualiza también en los diagramas de caja (Figura 6). Las PRT constituyeron el componente biopolimérico dominante en todo el rango de profundidades tanto en Three Sisters como en Orca. Por su parte, los LIP y los CHO presentaron concentraciones inferiores a las PRT en todos los estratos. Las diferencias entre sitios para estos dos biopolímeros se observaron principalmente en la capa

intermedia, aunque en sentidos opuestos: los LIP presentaron valores mayores en Three Sisters, mientras que los CHO fueron más elevados en Orca.

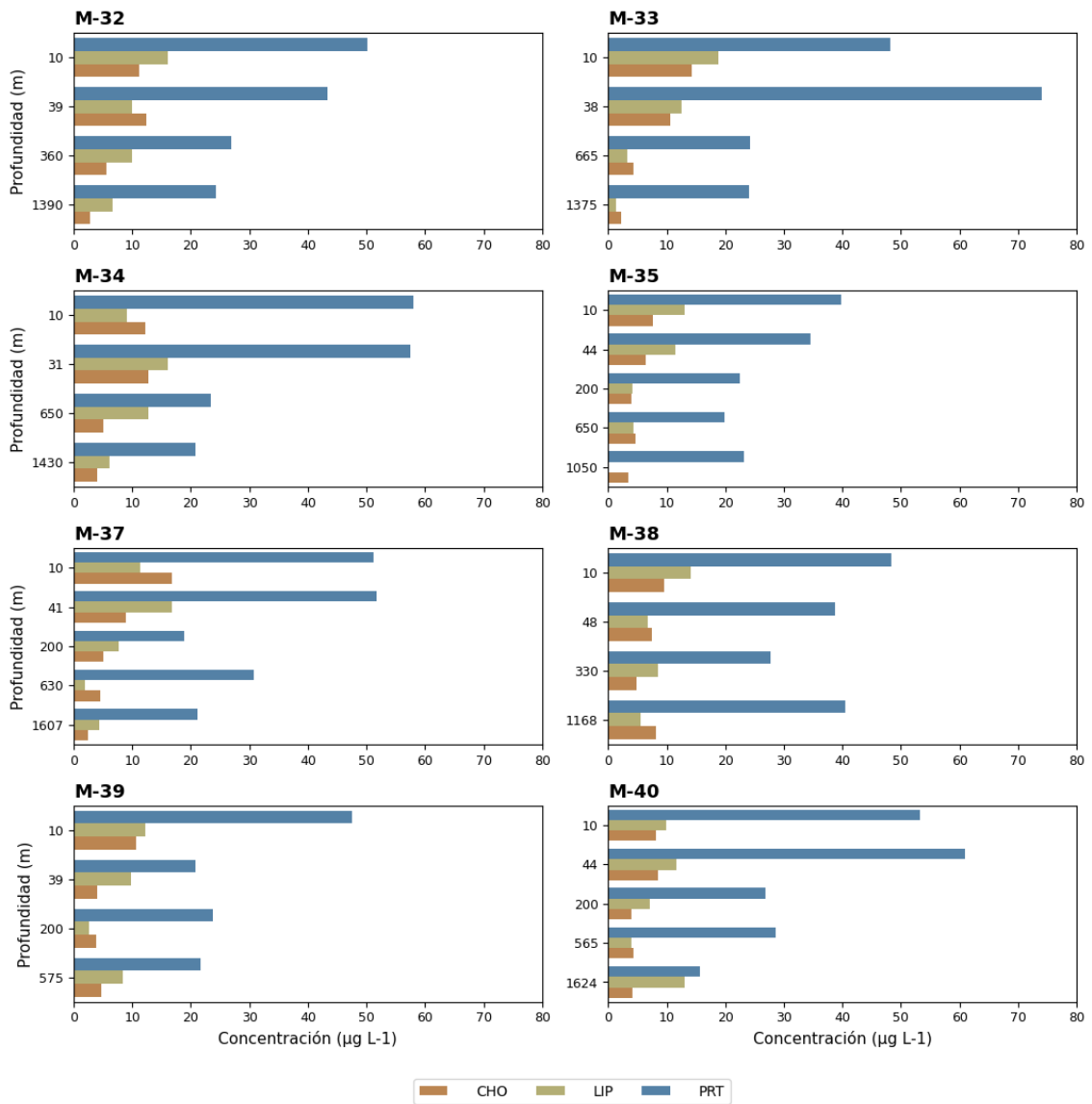
En la superficie, las PRT presentaron concentraciones entre 39,73 (M-35) y 58,06  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-34) ( $49,06 \pm 5,74 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, y entre 50,32 (M-46) y 78,97  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-43) ( $65,85 \pm 15,09 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca. Los LIP mostraron concentraciones con rangos de 9,16 (M-34) a 18,81  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-33) ( $13,08 \pm 3,34 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters y 6,43 (M-41) a 18,50  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-45) ( $11,83 \pm 5,17 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca, respectivamente. Los CHO variaron entre 7,71 (M-35) y 16,70  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-37) ( $11,07 \pm 3,13 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, y entre 8,04 (M-41) y 16,45  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-46) ( $12,42 \pm 3,15 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca. No se hallaron diferencias significativas entre sitios para cada biopolímero en esta profundidad ( $p > 0,05$ ) (Figura 6) (Tabla S1).

En la base de la termoclina, las PRT mostraron concentraciones entre 20,75 (M-39) y 74,05  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-33) ( $47,71 \pm 16,48 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, y entre 30,81 (M-43) y 45,97  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-42) ( $37,01 \pm 6,56 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca. Por su parte, los LIP variaron entre 6,72 (M-38) y 16,81  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-37) ( $11,37 \pm 3,39 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, y entre 7,76 (M-45) y 23,07  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-46) ( $11,65 \pm 5,56 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca. Los CHO presentaron valores entre 3,94 (M-39) y 12,80 (M-34)  $\mu\text{g L}^{-1}$  ( $8,88 \pm 3,20 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en el primer sitio, y entre 6,92 (M-41) y 9,56  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-44) ( $7,78 \pm 0,91 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en el segundo. Tampoco se encontraron diferencias significativas para la termoclina entre ambos sitios ( $p > 0,05$ ) (Figura 6) (Tabla S1).

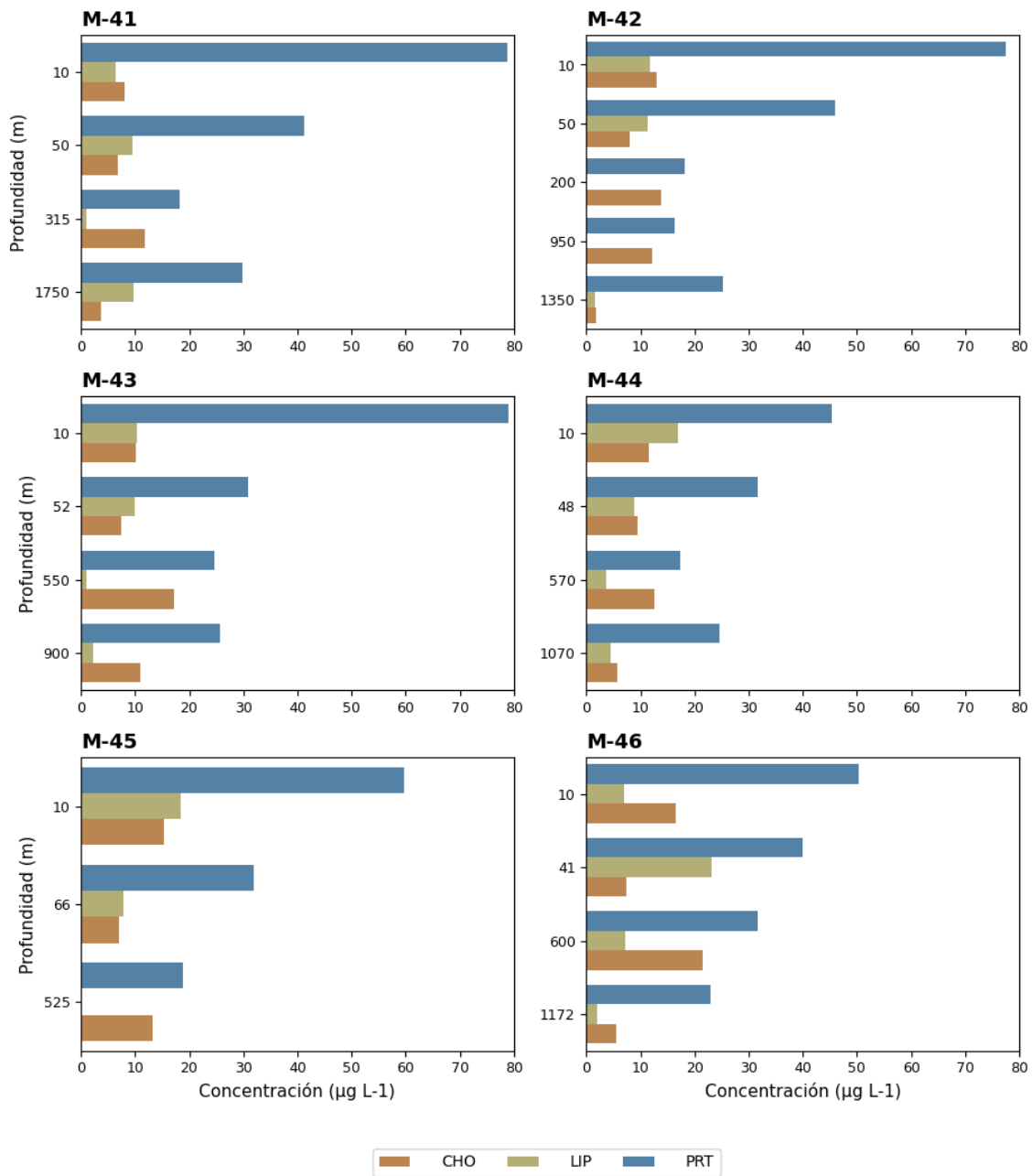
En la zona intermedia, las PRT tuvieron concentraciones entre 18,92 y 30,84  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-37) ( $24,80 \pm 2,87 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, y entre 16,21 (M-42) y 31,63  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-46) ( $21,48 \pm 5,17 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca. Los LIP presentaron valores entre 1,99 (M-37) y 12,70  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-34) ( $7,27 \pm 3,47 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, significativamente mayores a los de Orca ( $p < 0,05$ ) (Figura 6) (Tabla S1), donde fueron desde indetectables a 7,12  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-46) ( $2,13 \pm 3,02 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Los CHO estuvieron entre 3,82 (M-39) y 8,17  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-38) ( $4,58 \pm 0,65 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, y entre 11,88 (M-41) y 21,51  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-46) ( $15,06 \pm 3,82 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca. Contrario a los LIP, los CHO en la intermedia de Three Sisters fueron significativamente menores que en Orca ( $p < 0,05$ ) (Figura 6) (Tabla S1).

En el fondo, las concentraciones de PRT se encontraron entre 15,67 (M-40) y 40,49  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-38) ( $24,78 \pm 7,58 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters, y entre 22,97 (M-46) y 29,78  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-41) ( $25,68 \pm 3,08 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca, sin diferencias significativas entre ambos sitios ( $p > 0,05$ ) (Figura 6) (Tabla S1). Los LIP presentaron valores con rangos de 0,11 (M-35) a 13,12  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-40) ( $5,45 \pm 4,20 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Three Sisters y de 1,50 (M-42) a 9,79  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-41) ( $4,01 \pm 3,48 \mu\text{g L}^{-1}$ ) en Orca. Los CHO presentaron concentraciones entre 2,26 (M-33) y 4,21  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-40) ( $3,75 \pm 1,86 \mu\text{g L}^{-1}$ ), y 1,83 (M-42) y 11,06  $\mu\text{g L}^{-1}$  (M-43) ( $5,38 \pm 3,46 \mu\text{g L}^{-1}$ ), respectivamente.

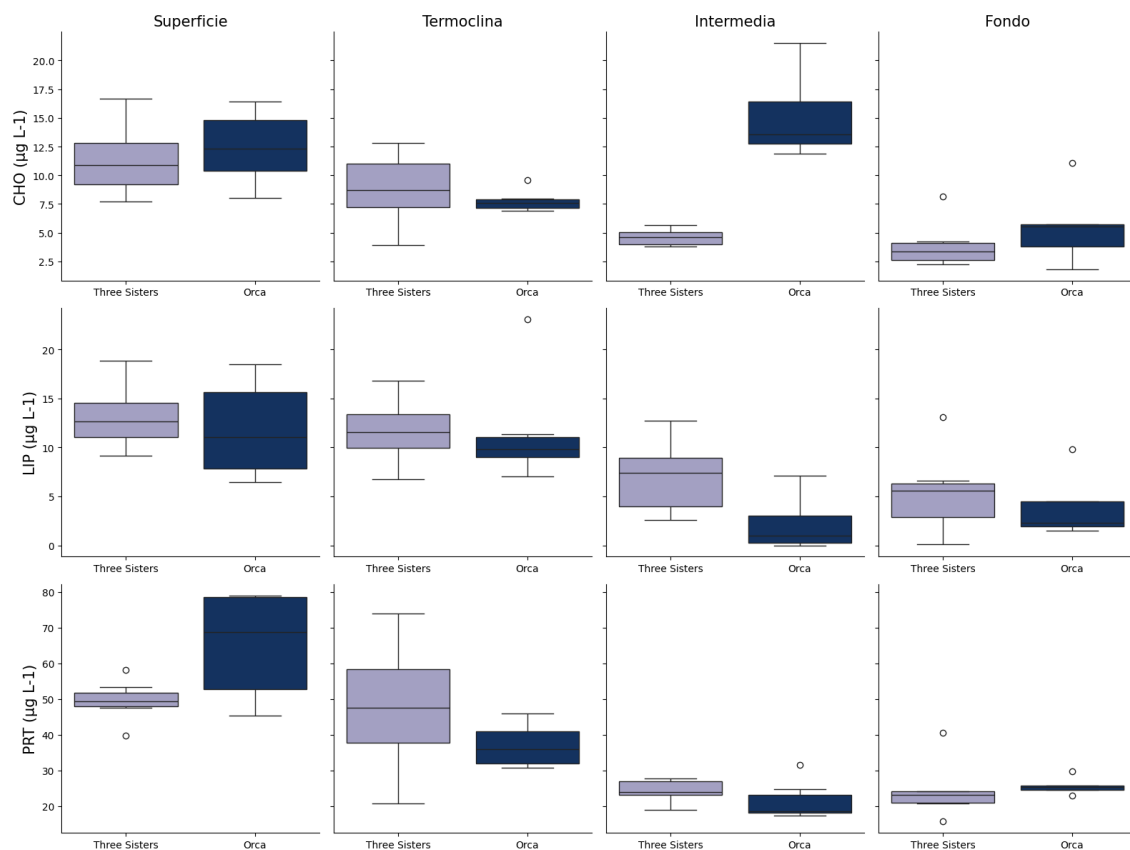
Las concentraciones de los tres biopolímeros, en ambos sitios, presentaron diferencias significativas entre los estratos superficiales y los estratos más profundos de la columna de agua ( $p < 0,05$ ) (Figura 6) (Tabla S1).



**Figura 4.** Concentraciones de CHO, LIP y PRT (totales) en el MOP en suspensión en cada profundidad de las estaciones muestreadas en Three Sisters.



**Figura 5.** Concentraciones de CHO, LIP y PRT (totales) en el MOP en suspensión en cada profundidad de las estaciones muestreadas en Orca.



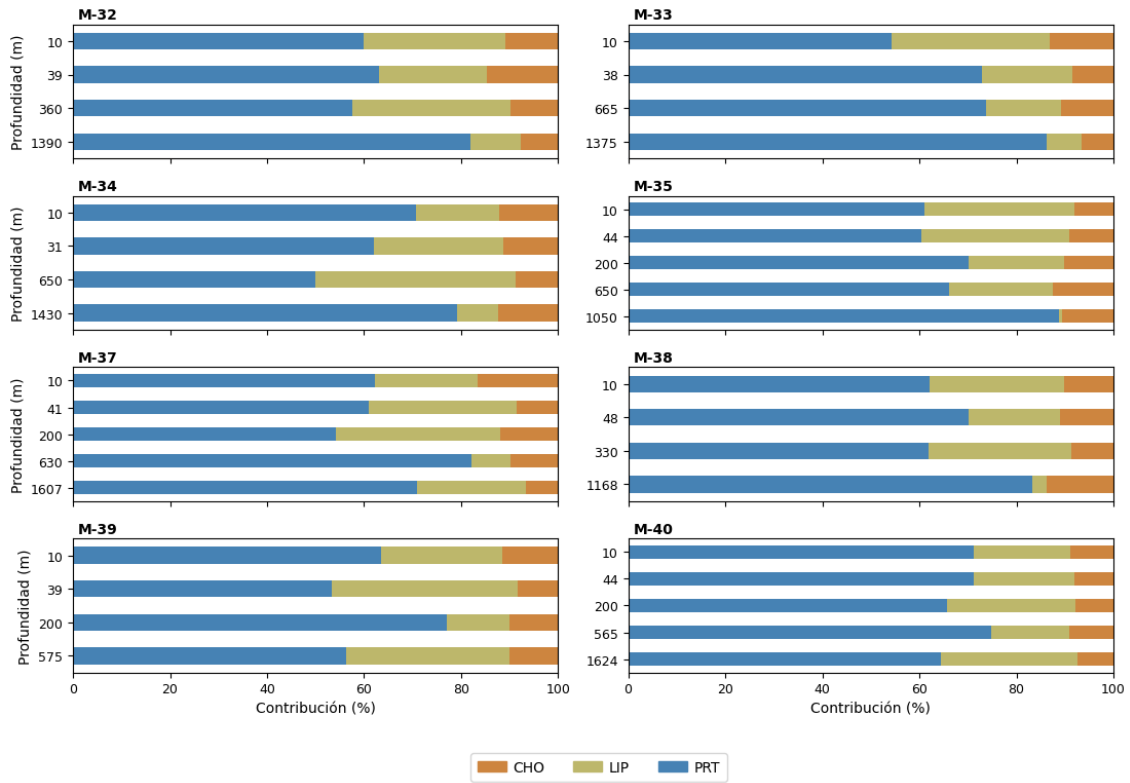
**Figura 6.** Diagramas de caja (BOXPLOT) para los distintos biopolímeros orgánicos (filas) a distintas profundidades de la columna de agua (columnas) en los dos sitios estudiados. La línea central de la caja indica la mediana de los datos. Los extremos inferior y superior indican el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), respectivamente. La diferencia entre Q1 y Q3 define la longitud de la caja, y corresponde al rango intercuartílico (IQR). Los bigotes en forma T se extienden desde los extremos de la caja hasta los valores mínimo (inferior) y máximo (superior) dentro de 1,5 veces el IQR. Los puntos vacíos situados por fuera de los bigotes representan valores atípicos (*outliers*).

Las contribuciones relativas de cada biopolímero respecto al CBP total en Three Sisters y Orca se presentan en la Figura 7 y la Figura 8, respectivamente.

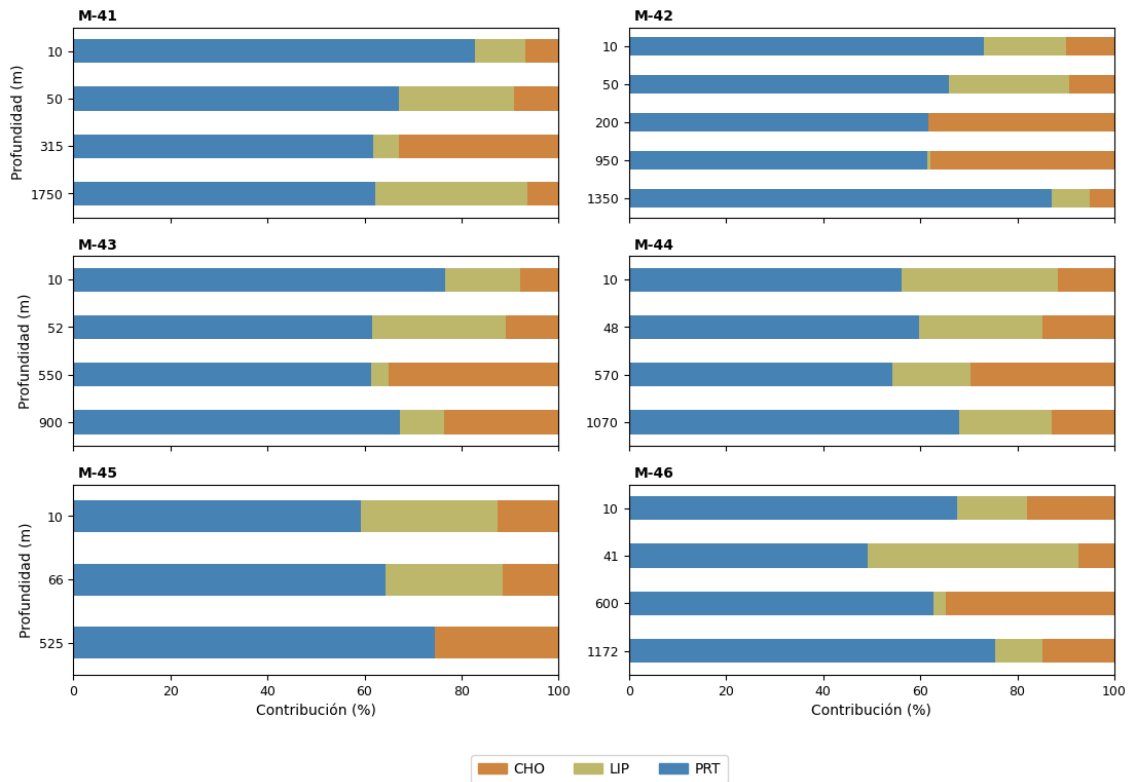
En Three Sisters, las PRT representaron el mayor porcentaje del CBP total en todos los estratos o profundidades de la columna de agua, para todas las estaciones, con valores entre 49,9 (intermedia, M-34) y 88,8 % (fondo, M-35). También se observaron proporciones elevadas en el fondo de las estaciones M-33 (86,2 %) y M-38 (83,3 %). Los LIP tuvieron aportes de entre 0,6 (fondo, M-35) y 41,1 % (intermedia, M-34). Los CHO fueron la clase de biopolímero con menor contribución al CBP total, variando entre 6,6 (fondo, M-37) y 16,6 % (superficie, M-37).

En Orca, las PRT también constituyeron la fracción principal del CBP total en todas las estaciones y profundidades, con contribuciones de entre 49,2 (termoclina, M-46) y 86,9 % (fondo, M-42). Los LIP presentaron un rango más amplio, con concentraciones indetectables en algunas profundidades intermedias y una contribución

máxima de 43,4 % (termoclina, M-46). Los CHO aportaron entre el 5,1 (fondo, M-42) y 38,4 % (intermedia, M-42) al CBP total.



**Figura 7.** Contribución relativa de CHO, LIP y PRT al CBP total en las estaciones muestreadas en Three Sisters.



**Figura 8.** Contribución relativa de CHO, LIP y PRT al CBP total en las estaciones muestreadas en Orca.

Las concentraciones de CBP más altas se encontraron en las capas superficiales de ambos sitios, con un máximo de  $49,85 \mu\text{g C L}^{-1}$  en la termoclina de M-33 en Three Sisters (Tabla 3) y  $52,04 \mu\text{g C L}^{-1}$  en la superficie de M-42 en Orca (Tabla 4). En cuanto a la variación con la profundidad, ambos sitios mostraron una tendencia general decreciente, con algunas excepciones en el fondo respecto a la zona intermedia.

Se obtuvieron razones PRT:CHO mayores a 1 en todos los estratos de cada estación, en ambos sitios. En Three Sisters, los valores de esta razón se encontraron entre 3,06 (superficie, M-37) y 10,65 (fondo, M-33), siendo similares en particular en la zona intermedia (Tabla 3). Por otra parte, en Orca se obtuvieron valores entre 1,31 (intermedia, M-42) y 13,86 (fondo, M-42), mostrando esta razón mayor variabilidad en la columna de agua respecto a Three Sisters (Tabla 4).

En cuanto a la razón CHO:LIP, la mayoría de los valores se hallaron por debajo de 2,5 en Three Sisters, con excepción del fondo de M-35 (Tabla 3). En Orca, se destacan algunos valores comparativamente más altos (outliers), por ejemplo 126,7 (intermedia II, M-42), 17,79 (intermedia, M-43) y 11,54 (intermedia, M-41) (Tabla 4).

#### 4.3. *Composición elemental e isotópica estable del MOP en suspensión*

Es relevante recordar que los análisis elementales e isotópicos, presentados en la Tabla 3 y la Tabla 4, solamente fueron realizados para los filtros GF/F correspondientes a la base de la termoclina de cada estación.

El contenido de carbono orgánico del MOP en suspensión fue de 0,2 % en todas las estaciones de Three Sisters y en la mayoría de las estaciones de Orca, a excepción de M-43 y M-44, donde fue igual a 0,1 %. Por su parte, el nitrógeno presentó valores de 0,03 y 0,04 % en casi todas las estaciones de Three Sisters, ocurriendo el mínimo de 0,02 % en M-39. Orca presentó valores de 0,02 y 0,03 % en general, y un valor máximo de 0,04 % que ocurrió únicamente en la estación M-41. La razón C:N presentó rangos similares entre ambos sitios, entre 4,0 (M-37) y 6,0 (M-38) en Three Sisters, y 4,9 (M-42) y 6,1 (M-44) en Orca (Figura 9).

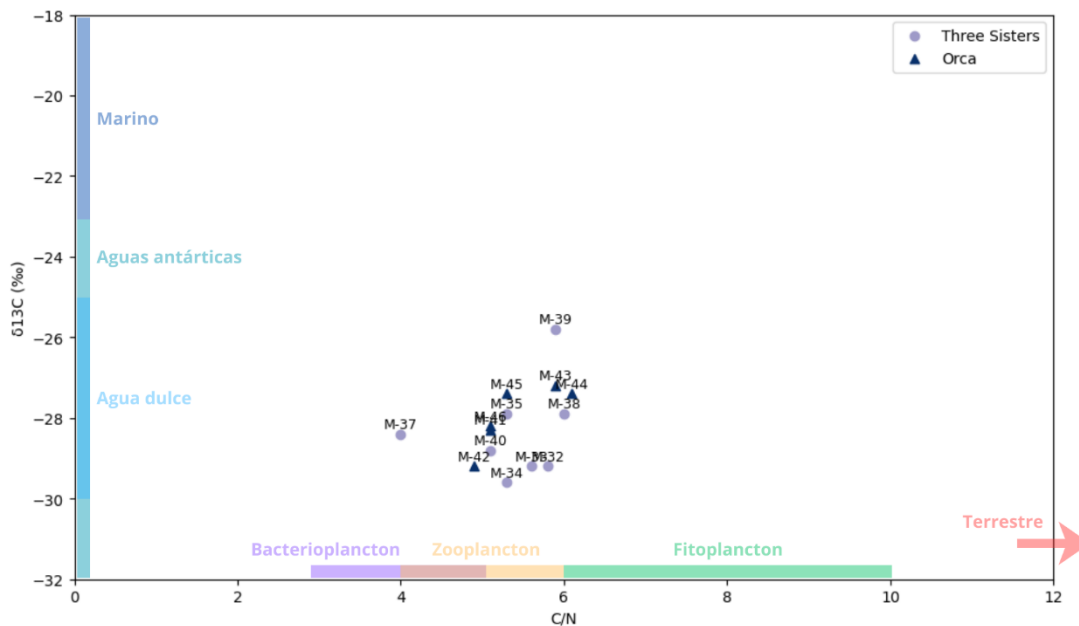
Respecto al  $\delta^{13}\text{C}$ , los valores en Three Sisters variaron entre -29,6 (M-34) y -25,8 ‰ (M-39), mientras que en Orca oscilaron entre -29,2 (M-42) y -27,2 ‰ (M-43) (Figura 9). Las firmas isotópicas de nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) no pudieron ser determinadas debido a las pequeñas concentraciones de N en las muestras.

**Tabla 3.** Parámetros bioquímicos, elementales e isotópicos en Three Sisters: concentración de carbono biopolimérico (CBP), razón proteínas/carbohidratos (PRT:CHO) y carbohidratos/lípidos (CHO:LIP), carbono orgánico total (C), nitrógeno total (N), razón carbono/nitrógeno (C:N) y firma isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ).

| Estación    | Prof. (m) | CBP ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) | PRT:CHO | CHO:LIP | %C  | %N   | C:N | $\delta^{13}\text{C}$ (‰) |
|-------------|-----------|--------------------------------|---------|---------|-----|------|-----|---------------------------|
| <b>M-32</b> | 10        | 41,12                          | 4,48    | 0,70    | 0,2 | 0,03 | 5,8 | -29,2                     |
|             | 39        | 33,68                          | 3,50    | 1,24    |     |      |     |                           |
|             | 360       | 22,91                          | 4,77    | 0,56    |     |      |     |                           |
|             | 1390      | 14,47                          | 8,59    | 0,43    |     |      |     |                           |
| <b>M-33</b> | 10        | 43,47                          | 3,36    | 0,76    | 0,2 | 0,04 | 5,6 | -29,2                     |
|             | 38        | 49,85                          | 7,04    | 0,84    |     |      |     |                           |
|             | 665       | 16,13                          | 5,53    | 1,32    |     |      |     |                           |
|             | 1375      | 13,66                          | 10,65   | 1,73    |     |      |     |                           |
| <b>M-34</b> | 10        | 40,24                          | 4,72    | 1,34    | 0,2 | 0,04 | 5,3 | -29,6                     |
|             | 31        | 45,40                          | 4,49    | 0,79    |     |      |     |                           |
|             | 650       | 23,00                          | 4,68    | 0,39    |     |      |     |                           |
|             | 1430      | 12,90                          | 5,22    | 0,66    |     |      |     |                           |
| <b>M-35</b> | 10        | 31,89                          | 5,15    | 0,59    | 0,2 | 0,04 | 5,3 | -27,9                     |
|             | 44        | 28,10                          | 5,37    | 0,56    |     |      |     |                           |
|             | 200       | 15,77                          | 5,65    | 0,96    |     |      |     |                           |
|             | 650       | 14,78                          | 4,32    | 1,09    |     |      |     |                           |
|             | 1050      | 12,75                          | 6,84    | 31,19   |     |      |     |                           |
| <b>M-37</b> | 10        | 40,33                          | 3,06    | 1,46    | 0,2 | 0,04 | 4,0 | -28,4                     |
|             | 41        | 41,53                          | 5,81    | 0,53    |     |      |     |                           |
|             | 200       | 17,12                          | 3,72    | 0,65    |     |      |     |                           |
|             | 630       | 18,42                          | 6,79    | 2,28    |     |      |     |                           |
|             | 1607      | 14,60                          | 8,81    | 0,54    |     |      |     |                           |
| <b>M-38</b> | 10        | 38,09                          | 5,04    | 0,68    | 0,2 | 0,03 | 6,0 | -27,9                     |
|             | 48        | 27,01                          | 5,17    | 1,11    |     |      |     |                           |
|             | 330       | 21,91                          | 5,79    | 0,56    |     |      |     |                           |
|             | 1168      | 23,82                          | 4,96    | 1,47    |     |      |     |                           |
| <b>M-39</b> | 10        | 33,98                          | 4,47    | 0,87    | 0,2 | 0,02 | 5,9 | -25,8                     |
|             | 39        | 19,04                          | 5,27    | 0,40    |     |      |     |                           |
|             | 200       | 15,11                          | 6,22    | 1,48    |     |      |     |                           |
|             | 575       | 18,79                          | 4,61    | 0,55    |     |      |     |                           |
| <b>M-40</b> | 10        | 36,74                          | 6,58    | 0,83    | 0,2 | 0,04 | 5,1 | -28,8                     |
|             | 44        | 42,03                          | 7,15    | 0,73    |     |      |     |                           |
|             | 200       | 20,02                          | 6,84    | 0,56    |     |      |     |                           |
|             | 565       | 18,75                          | 6,76    | 1,05    |     |      |     |                           |
|             | 1624      | 22,61                          | 3,72    | 0,32    |     |      |     |                           |

**Tabla 4.** Parámetros bioquímicos, elementales e isotópicos en Orca: concentración de carbono biopolimérico (CBP), razón proteínas/carbohidratos (PRT:CHO) y carbohidratos/lípidos (CHO:LIP), carbono orgánico total (C), nitrógeno total (N), razón carbono/nitrógeno (C:N) y firma isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ). n.d.: no disponible.

| Estación    | Prof. (m) | CBP ( $\mu\text{g C L}^{-1}$ ) | PRT:CHO | CHO:LIP | %C  | %N   | C:N | $\delta^{13}\text{C}$ (‰) |
|-------------|-----------|--------------------------------|---------|---------|-----|------|-----|---------------------------|
| <b>M-41</b> | 10        | 46,68                          | 9,80    | 1,25    | 0,2 | 0,04 | 5,1 | -28,3                     |
|             | 50        | 30,22                          | 5,98    | 0,72    |     |      |     |                           |
|             | 315       | 14,44                          | 1,53    | 11,54   |     |      |     |                           |
|             | 1750      | 23,44                          | 7,89    | 0,39    |     |      |     |                           |
| <b>M-42</b> | 10        | 52,04                          | 5,93    | 1,12    | 0,2 | 0,03 | 4,9 | -29,2                     |
|             | 50        | 34,23                          | 5,78    | 0,70    |     |      |     |                           |
|             | 200       | 13,09                          | 1,31    | n.d.    |     |      |     |                           |
|             | 950       | 12,91                          | 1,33    | 126,37  |     |      |     |                           |
|             | 1750      | 14,25                          | 13,86   | 1,22    |     |      |     |                           |
| <b>M-43</b> | 10        | 50,52                          | 7,87    | 0,96    | 0,1 | 0,02 | 5,9 | -27,2                     |
|             | 52        | 27,20                          | 4,18    | 0,74    |     |      |     |                           |
|             | 550       | 19,74                          | 1,43    | 17,79   |     |      |     |                           |
|             | 900       | 18,72                          | 2,32    | 4,86    |     |      |     |                           |
| <b>M-44</b> | 10        | 39,58                          | 3,95    | 0,68    | 0,1 | 0,03 | 6,1 | -27,4                     |
|             | 48        | 25,97                          | 3,31    | 1,08    |     |      |     |                           |
|             | 570       | 17,00                          | 1,38    | 3,43    |     |      |     |                           |
|             | 1070      | 17,74                          | 4,28    | 1,28    |     |      |     |                           |
| <b>M-45</b> | 10        | 49,28                          | 3,88    | 0,83    | 0,2 | 0,02 | 5,3 | -27,4                     |
|             | 66        | 24,28                          | 4,52    | 0,91    |     |      |     |                           |
|             | 525       | 20,50                          | 1,42    | n.d.    |     |      |     |                           |
| <b>M-46</b> | 10        | 36,44                          | 3,06    | 2,37    | 0,2 | 0,03 | 5,1 | -28,2                     |
|             | 41        | 39,88                          | 5,42    | 0,32    |     |      |     |                           |
|             | 600       | 24,75                          | 1,47    | 3,02    |     |      |     |                           |
|             | 1172      | 14,94                          | 4,17    | 2,80    |     |      |     |                           |



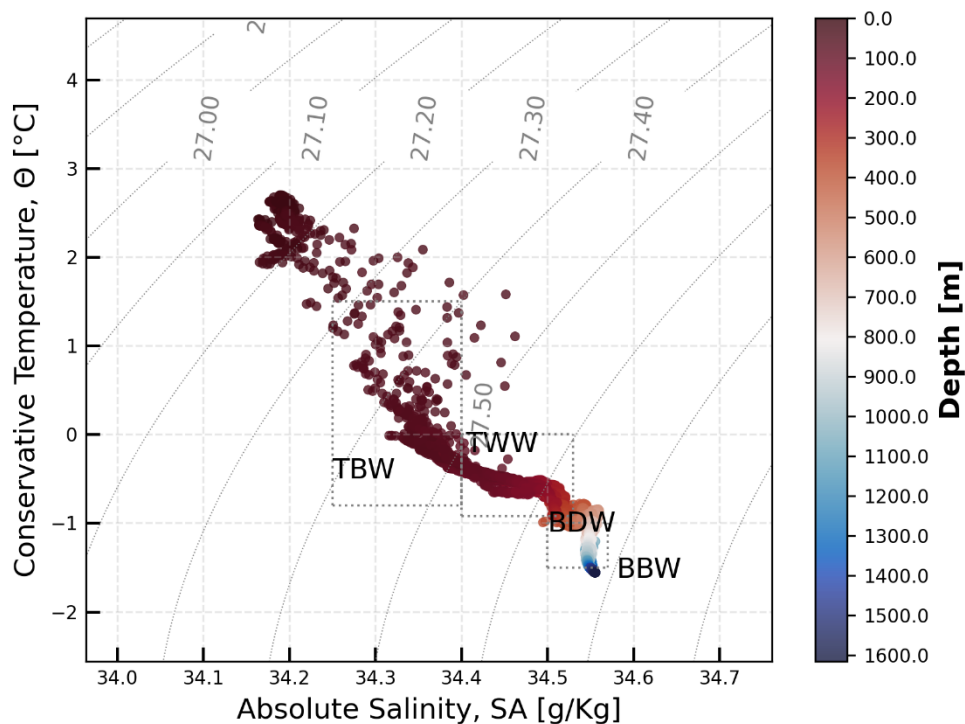
**Figura 9.** Análisis conjunto del  $\delta^{13}\text{C}$  en función de la razón C:N en la base de la termoclina de las estaciones muestreadas en Three Sisters y Orca. Se incluyen valores de referencia para varias fuentes de material orgánico según la literatura: marina (Bianchi & Canuel, 2011), aguas antárticas (Lourey *et al.*, 2004; Henley *et al.*, 2012; Lin *et al.*, 2023) y agua dulce (Lamb *et al.*, 2006) para  $\delta^{13}\text{C}$ , y bacteriana (Monticelli *et al.*, 2003; Henley *et al.*, 2012), fitoplanctónica (Goñi *et al.*, 2003; Lamb *et al.*, 2006), zooplanctónica (Bianchi & Canuel, 2011) y terrestre (Goñi *et al.*, 2003; Lamb *et al.*, 2006) para la razón C:N.

#### 4.4. Distribución vertical de las masas de agua en la cuenca Central

Los diagramas T-S construidos a partir de los perfiles de CTD en las estaciones de Three Sisters y Orca permitieron identificar las principales masas de agua descritas para el EB y determinar su distribución vertical durante el periodo de muestreo.

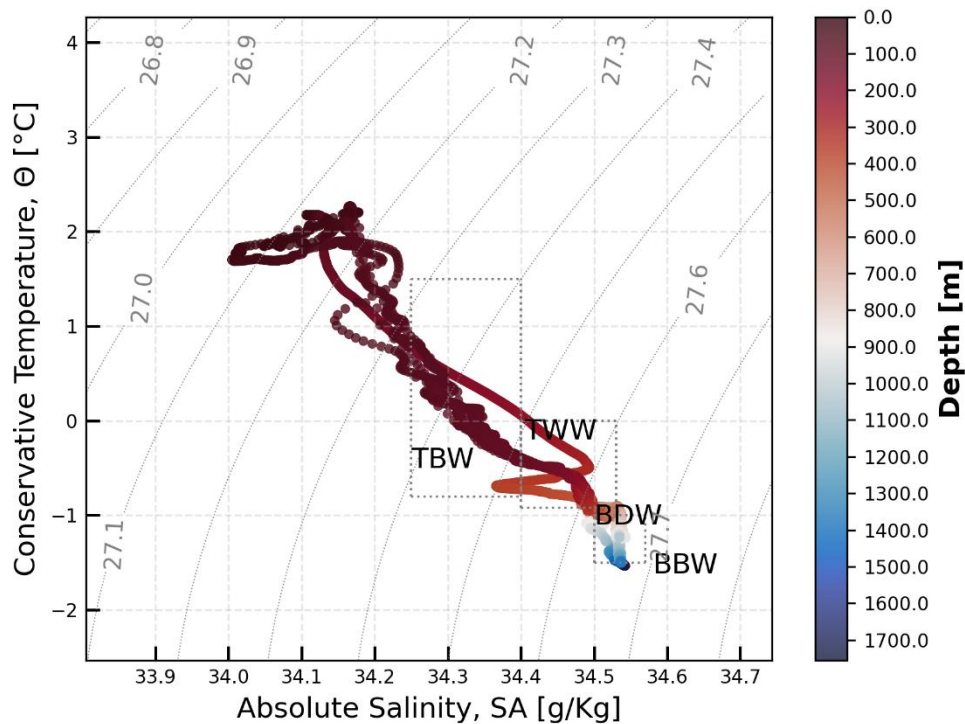
En Three Sisters se observó una distribución de masas de agua con temperaturas conservativas ( $\theta$ ) entre 2,6 y -1,6 °C y valores de salinidad absoluta (SA) entre 34,1 y 34,6 g/Kg, aproximadamente (Figura 10). En las capas superficiales se identificaron aguas relativamente cálidas y menos salinas, siendo las  $\theta$  superiores a 2 °C y SA entre 34,2 y 34,3 kg/Kg. Estas observaciones se concentraron en un rango estrecho del diagrama T-S, indicando una baja dispersión termohalina en superficie. A profundidades intermedias, se identificó un conjunto caracterizado por una disminución progresiva de la  $\theta$  (~ 1,5 – 0 °C) y un aumento de la SA (~ 34,3 g/Kg) evidenciando la presencia de la TBW y la TWW. En aguas profundas, se observó un agrupamiento bien definido de puntos con  $\theta$  negativas (hasta ~ -1,6 °C) y SA elevadas (~ 34,6 g/Kg), en correspondencia con la BDW y la BBW. Estas masas de agua presentaron una variabilidad termohalina reducida, reflejada en la alta densidad de puntos en un espacio acotado del diagrama. Las isólineas de densidad potencial ( $\sigma_0$ ) indicaron un incremento

progresivo de la densidad desde las aguas superficiales hacia las más profundas, consistente con el gradiente termohalino observado en el diagrama T-S.



**Figura 10.** Diagrama temperatura-salinidad (T-S) en las estaciones muestreadas en Three Sisters. Cada punto en el espacio representa una observación realizada con el CTD a lo largo del gradiente de profundidad. Se indican en recuadros las principales masas de agua identificadas (TBW: Agua Transicional con influencia del mar de Bellingshausen; TWW: Agua Transicional con influencia del mar de Weddell; BDW: Agua Profunda de Bransfield; BBW: Agua de Fondo de Bransfield).

En Orca, el diagrama T-S mostró un comportamiento general similar al observado en Three Sisters, con una distribución continua de las masas de agua a lo largo del gradiente de profundidad (Figura 11). Los valores de  $\theta$  variaron entre aproximadamente 2,2 y -1,6 °C, y los de SA entre 34,0 y 34,6 g/Kg. En superficie se identificaron aguas relativamente cálidas y menos salinas ( $\theta \gtrsim 2$  °C, SA entre ~ 34,0 – 34,2 g/Kg), mientras que en la zona intermedia se observó una disminución progresiva de la  $\theta$  acompañada por un aumento de la SA hasta valores cercanos a 34,3 – 34,4 g/Kg, asociados a la TBW y la TWW. En aguas profundas se registró, al igual que en Three Sisters, un agrupamiento bien definido con  $\theta$  negativas (hasta ~ -1,6 °C) y SA elevadas (~ 34,6 g/Kg), asociadas a la BDW y la BBW, con baja variabilidad termohalina.



**Figura 11.** Diagrama temperatura-salinidad (T-S) en las estaciones muestreadas en Orca. Cada punto en el espacio representa una observación realizada con el CTD a lo largo del gradiente de profundidad. Se indican en recuadros las principales masas de agua identificadas (TBW: Agua Transicional con influencia del mar de Bellingshausen; TWW: Agua Transicional con influencia del mar de Weddell; BDW: Agua Profunda de Bransfield; BBW: Agua de Fondo de Bransfield).

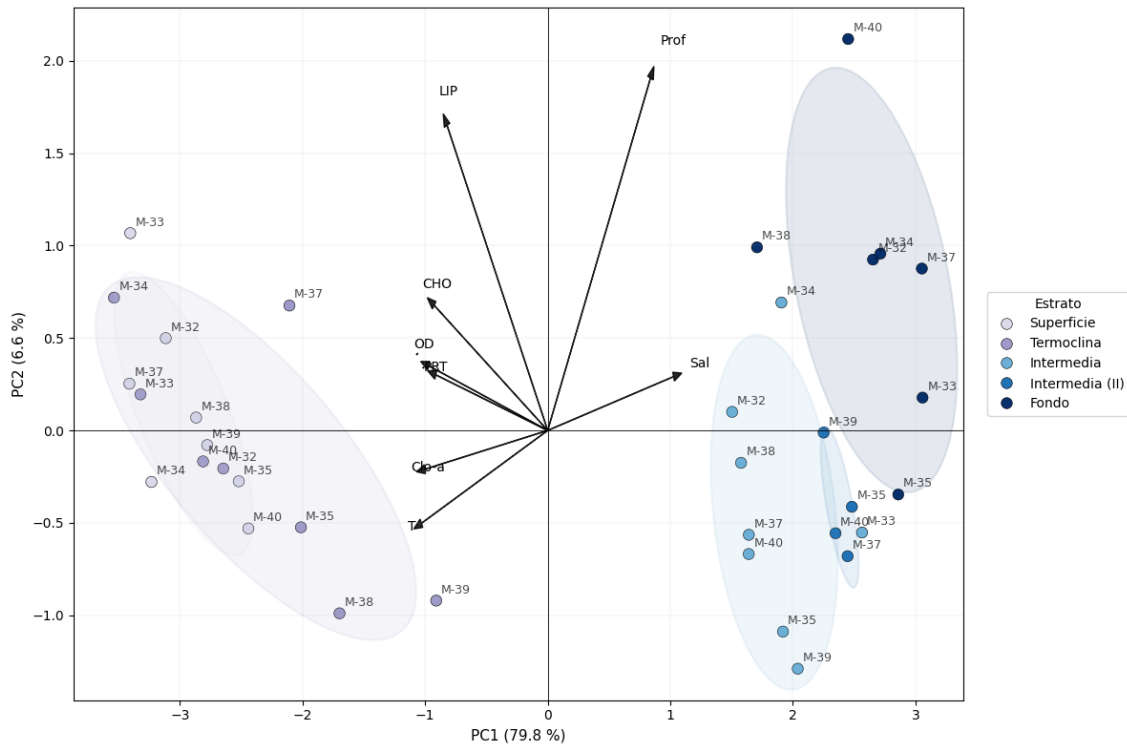
#### 4.5. Análisis multivariados

En Three Sisters, los dos primeros componentes del PCA explicaron conjuntamente el 86,4 % de la varianza total de los datos, con el eje 1 (PC1) explicando el 79,8 % y el eje 2 (PC2) un 6,6 % (Figura 12).

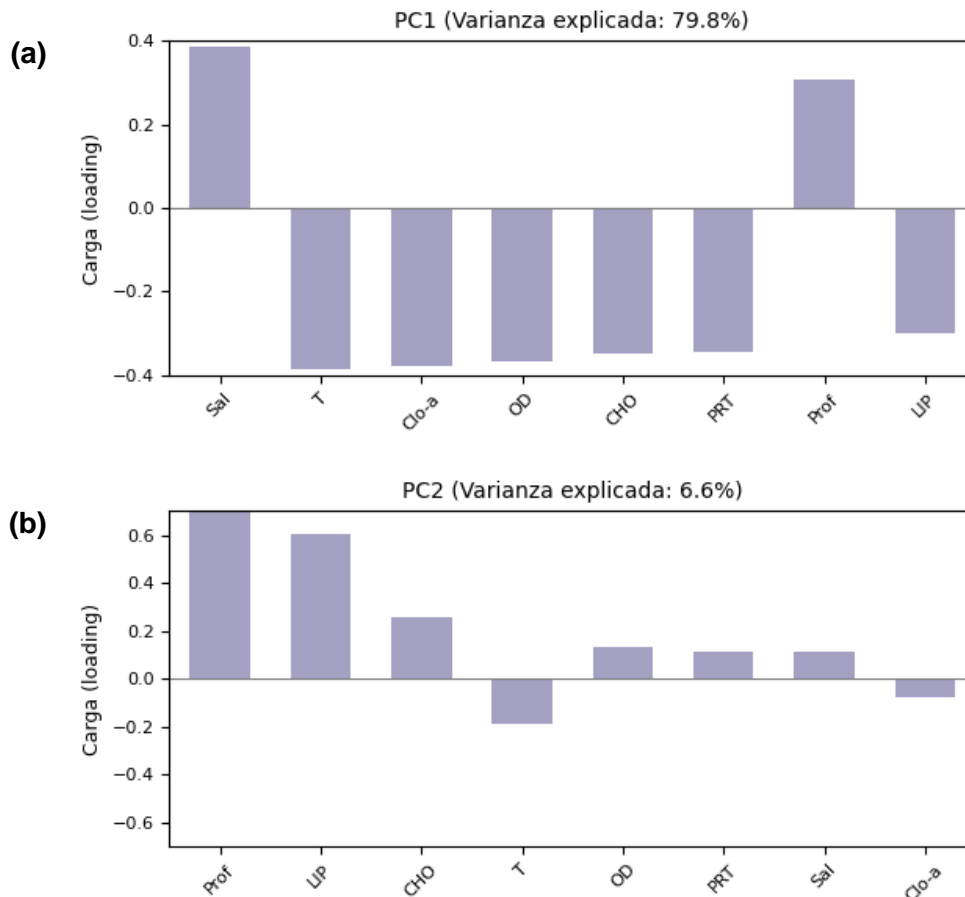
El PC1 presentó coeficientes de correlación (*loadings*) negativos para temperatura (-0,39), clorofila-a (-0,38), oxígeno disuelto (-0,37), CHO (-0,35), PRT (-0,35) y LIP (-0,30), siendo la salinidad (0,39) y la profundidad (0,31) las únicas dos variables con un coeficiente positivo (Figura 13 (a)). El PC2, que explicó una menor proporción de la varianza, presentó correlación positiva muy alta con la profundidad (0,70) y los LIP (0,60). El resto de las variables presentaron correlaciones menores con el PC2: CHO (0,25), temperatura (-0,19), oxígeno disuelto (0,13), salinidad y PRT (0,11 para ambas variables) y clorofila-a (-0,08) (Figura 13 (b)).

En el espacio de ordenación definido por estos dos ejes, se observó una separación de las muestras en función de la profundidad. Las muestras correspondientes a las capas superficiales (superficie y base de la termoclina) de todas las estaciones, se ubicaron en coordenadas (*scores*) negativas del PC1, desde -3,54

(termoclina, M-34) hasta -0,91 (termoclina, M-39). Por el contrario, las muestras obtenidas a mayor profundidad (intermedia, intermedia II y fondo) se agruparon hacia el extremo positivo del PC1, con scores comprendidos entre 3,06 (fondo, M-33) y 1,50 (intermedia, M-32).



**Figura 12.** Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA) construido para las distintas profundidades de las estaciones muestreadas en Three Sisters, a partir de variables fisicoquímicas (Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; OD: oxígeno disuelto; Clo-a: clorofila-a) y bioquímicas (CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas) en PC1 y PC2. Las flechas representan las cargas (*loadings*) de las variables en los dos primeros componentes principales; su longitud indica la magnitud de la contribución de cada variable al patrón multivariado, y su orientación el sentido de la correlación con los ejes. Los puntos corresponden a las muestras individuales y los centroides con elipses de confianza representan la posición media y la variabilidad asociada a cada profundidad.



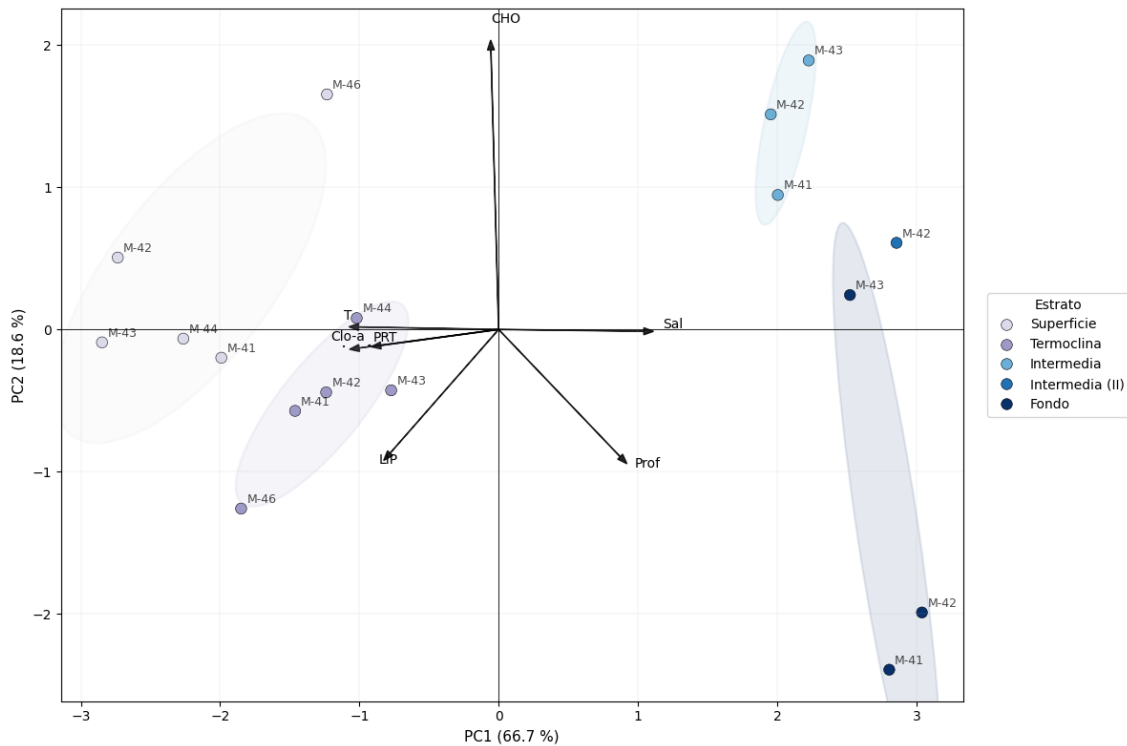
**Figura 13.** Coeficientes de correlación de cada variable (*loadings*) para el PC1 (a) y el PC2 (b) en el PCA realizado para Three Sisters. Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; OD: oxígeno disuelto; Clo-a: clorofila-a; CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas.

El PCA realizado para Orca explicó el 85,3 % de la varianza total en los dos primeros componentes, con PC1 representando un 66,7 % y PC2, un 18,6 % (Figura 14).

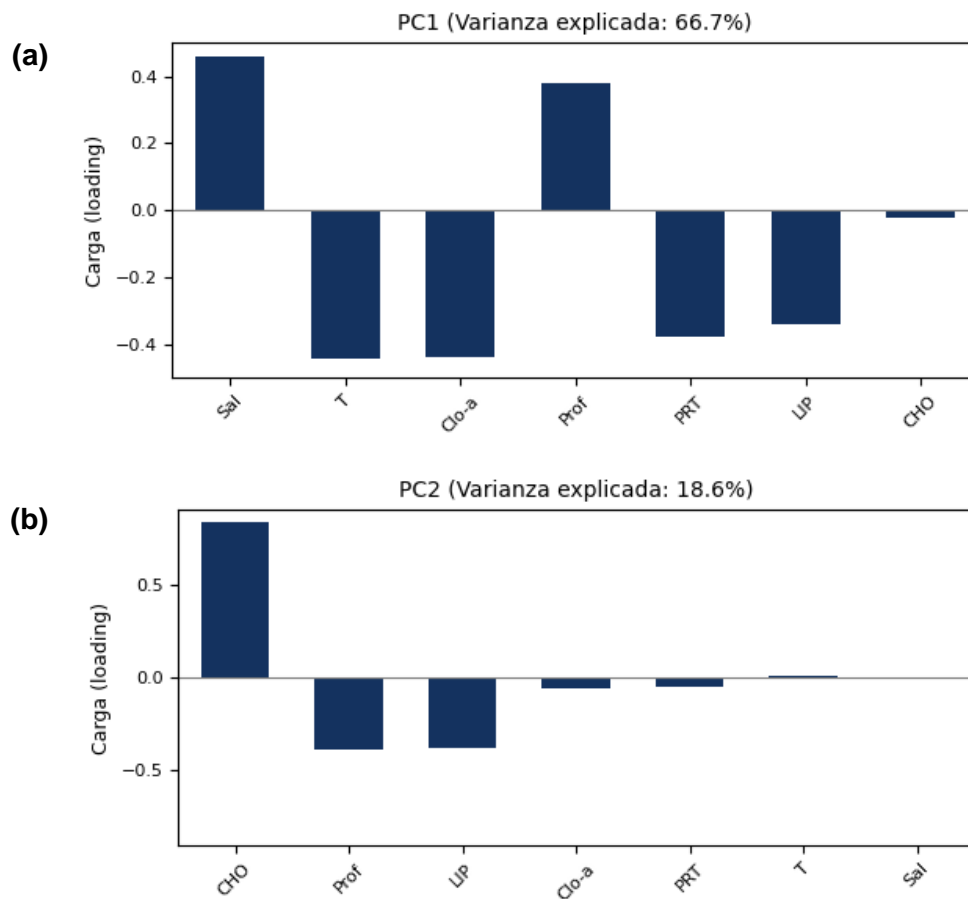
El PC1 presentó correlación negativa con la temperatura y la clorofila-a (-0,44 para ambas variables) y también con PRT (-0,38), LIP (-0,34) y CHO (-0,02), siendo nuevamente la salinidad (0,45) y la profundidad (0,38) las únicas dos variables con un coeficiente positivo (Figura 15 (a)). En tanto, el PC2 presentó una correlación positiva muy alta únicamente con CHO (0,84), seguida por la profundidad (-0,39), LIP (-0,38), clorofila-a (-0,06), PRT (-0,05), temperatura (0,008) y salinidad (-0,005) (Figura 15 (b)).

Al igual que en Three Sisters, los agrupamientos de las muestras en el espacio estuvieron relacionados en gran medida por la profundidad. Las muestras correspondientes a los estratos superficiales (scores en PC1 desde -2,85 en la superficie de M-43 hasta -0,77 en la termoclina de esta misma estación) tendieron a ubicarse en un sector diferenciado del espacio respecto a aquellas tomadas a profundidades

mayores (scores entre 3,04 en el fondo de M-42 hasta 1,95 en la intermedia de dicha estación).



**Figura 14.** Biplot del Análisis de Componentes Principales (PCA) construido para las distintas profundidades de las estaciones muestreadas en Orca, a partir de variables fisicoquímicas (Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; Clo-a: clorofila-a) y bioquímicas (CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas) en PC1 y PC2. Las flechas representan las cargas (*loadings*) de las variables en los dos primeros componentes principales; su longitud indica la magnitud de la contribución de cada variable al patrón multivariado, y su orientación el sentido de la correlación con los ejes. Los puntos corresponden a las muestras individuales y los centroides con elipses de confianza representan la posición media y la variabilidad asociada a cada profundidad. Nota: el PCA se realizó utilizando únicamente aquellas profundidades para cada estación, que tuvieran datos completos para todas las variables consideradas. Las observaciones con valores faltantes fueron excluidas del análisis, dado que el PCA requiere matrices completas para la correcta estimación de la estructura multivariada. En consecuencia, las profundidades de algunas estaciones, así como la estación M-45 con todas sus profundidades, no fueron representadas en el espacio de ordenación.



**Figura 15.** Coeficientes de correlación de cada variable (*loadings*) para el PC1 **(a)** y el PC2 **(b)** en el PCA realizado para Orca. Prof: profundidad; T: temperatura; Sal: salinidad; Clo-a: clorofila-a; CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas.

## 5. Discusión

### 5.1. Estructura de la columna de agua

Las variables fisicoquímicas analizadas presentan perfiles verticales consistentes con la estructura termohalina regional previamente descrita para el EB, caracterizados por una capa superficial relativamente más cálida y menos salina, y por la presencia de temperaturas negativas junto con un aumento progresivo de la salinidad hacia los estratos más profundos de la columna de agua. Esta transición entre estratos se refleja también en los PCA realizados para ambos sitios de estudio: la asociación de temperatura y concentración de Clo-a (aguas cálidas y productivas) caracteriza a las muestras superficiales, mientras que la salinidad y la profundidad definen la agrupación de las muestras provenientes de la zona intermedia y de fondo.

En Three Sisters, las temperaturas superficiales variaron entre 2,16 y 2,69 °C, mientras que en Orca se registraron valores levemente menores, entre 1,70 y 2,17 °C. Al comparar estos resultados con antecedentes regionales, se observa una concordancia general en los gradientes verticales, aunque con diferencias principalmente asociadas a las aguas superficiales. En este sentido, Wilson *et al.* (1999) reportaron temperaturas superficiales entre 1,0 y 1,5 °C en la cuenca Central del EB, mientras que Zhou *et al.* (2006) y Frey *et al.* (2022) registraron rangos de 1,2 a 1,6 °C. Asimismo, Gordo (2013), a partir de la compilación de datos históricos (Tokarczyk *et al.*, 1987; Gordon *et al.*, 2000; García *et al.*, 2002; Sangrà *et al.*, 2011), comparó dichos valores con los obtenidos durante las campañas CIEMAR (2003) y BREDDIES (2006), donde la TBW y la TWW, dominantes en los estratos superiores, presentaron temperaturas y salinidades levemente superiores a las reportadas previamente. Por otro lado, en los estratos más profundos, en el presente trabajo tanto la BDW como la BBW exhibieron rangos de temperatura y salinidad comparables a los documentados anteriormente, lo que confirma la estabilidad termohalina de las aguas profundas en la cuenca.

Las temperaturas superficiales relativamente elevadas observadas en este trabajo, podrían reflejar un efecto estacional o local. Estudios recientes han demostrado que durante veranos con menor cobertura de hielo marino, las aguas superficiales pueden alcanzar temperaturas entre 2,5 y 3,0 °C en sectores costeros o sobre relieves del fondo, como consecuencia de una mayor insolación y también de una mayor estabilidad de la capa superficial (Ardelan *et al.*, 2010; Mendes *et al.*, 2018). En este contexto, las temperaturas más altas registradas en Three Sisters podrían asociarse a condiciones de radiación estival intensificada y a un mayor grado de estratificación de la columna de agua, mientras que las temperaturas relativamente más bajas en Orca,

podrían reflejar surgencias locales inducidas por la topografía del monte submarino o una mayor influencia de la TWW, dada su proximidad a la cuenca Este del EB (Gordo, 2013). En la zona intermedia y en el fondo, las temperaturas negativas observadas, entre -0,5 y -1,5 °C, son coherentes con las características térmicas reportadas para la BDW y la BBW, confirmando que ambos sitios estudiados interceptan masas de agua frías y densas típicas de la cuenca Central del EB (Gordon *et al.*, 2000; Frey *et al.*, 2022).

La mayor variabilidad de la salinidad en superficie, particularmente en Orca, podría estar asociada a la advección de aguas más frías y menos salinas promovida por el relieve submarino. La presencia de montes submarinos puede generar elevación de isopícnas, circulación ciclónica y surgencias locales, dando lugar a anomalías térmicas y halinas de pequeña escala (Genin & Dower, 2008; Bashmachnikov *et al.*, 2013). En los estratos más profundos, los rangos de salinidad observados, de 34,52 a 34,56, indican la presencia de masas de agua más homogéneas y estables, consistentes con las propiedades termohalinas de la BDW y la BBW (Gordon *et al.*, 2000; Gordo, 2013).

La distribución vertical del oxígeno disuelto también fue congruente con lo reportado en estudios previos para la región (Signori *et al.*, 2014; Polukhin *et al.*, 2021; Seliverstova *et al.*, 2023). En Three Sisters se observó un descenso subsuperficial seguido de una recuperación o estabilización del OD hacia el fondo, patrón que podría reflejar la influencia de la CDWm, una masa de agua intermedia cálida y salina, caracterizada por menores concentraciones de oxígeno (Polukhin *et al.*, 2021). Esta masa de agua se introduce desde el noroeste en las cuencas Oeste y Central del EB (Gordo, 2013), y su núcleo pobre en oxígeno podría estar asociado a una renovación limitada y al consumo biológico durante su tránsito y mezcla vertical (Gordon *et al.*, 2000; van Caspel *et al.*, 2018). La recuperación del OD hacia el fondo, en cambio, podría vincularse con la ventilación de las aguas profundas por masas de agua más oxigenadas, como la BDW (Frey *et al.*, 2022; Seliverstova *et al.*, 2023). Si bien no se dispuso de mediciones de OD en Orca, diversos estudios han demostrado que la presencia de relieves abruptos puede generar perturbaciones hidrodinámicas que favorecen la recirculación y ventilación de las capas profundas (Bashmachnikov *et al.*, 2013; Mashayek *et al.*, 2024). En este sentido, podrían esperarse procesos comparables de descomposición de la materia orgánica y respiración microbiana, en combinación con la mezcla o el afloramiento de aguas más oxigenadas.

Las concentraciones de Clo-a, máximas en superficie y con un marcado descenso hacia la termoclina, se corresponden con el patrón estival típico en el EB, dominado por la producción fitoplanctónica superficial y la estratificación de la columna de agua. Estudios recientes en la región indican que las variaciones espaciales y temporales de Clo-a están biológicamente acopladas a la estructura física del sistema,

particularmente al frente de Península y a la distribución de las diferentes masas de agua (TBW, TWW), que determinan el hábitat para distintos ensamblajes fitoplanctónicos (Vený *et al.*, 2024).

## 5.2. Variabilidad macromolecular y labilidad del MOP en la columna de agua

El patrón vertical observado en las concentraciones de CHO, LIP y PRT tanto en Three Sisters como en Orca, estuvo caracterizado por valores máximos en superficie y, en general, una disminución progresiva hacia el fondo. Este patrón coincide con la distribución vertical típica del MOP en suspensión en ambientes marinos polares, donde la fracción lábil, derivada mayoritariamente de la producción fitoplanctónica reciente, se concentra en los estratos superiores y es degradada conforme desciende en la columna de agua (Pusceddu *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 2021; Misic *et al.*, 2024). En particular, la predominancia de PRT en todos los estratos, evidente tanto en sus concentraciones absolutas como en su contribución relativa al CBP, junto con las relaciones PRT:CHO consistentemente mayores a 1, indica la presencia de MOP fresco de origen fitoplanctónico. Esta interpretación se ve reforzada por la agrupación de PRT con Clo-a y las muestras superficiales en el espacio definido por los análisis multivariados, lo que sugiere su asociación con MOP recientemente producido. En conjunto, estos patrones indican una alta productividad primaria estacional y la exportación eficiente de estas partículas hacia el fondo marino (Danovaro *et al.*, 1999; Isla *et al.*, 2006).

Las concentraciones más elevadas de PRT registradas en superficie respecto a otros estratos (hasta  $\sim 79 \mu\text{g L}^{-1}$  en Orca y  $\sim 58 \mu\text{g L}^{-1}$  en Three Sisters) coinciden con la presencia, principalmente, de la TBW. Esta masa de agua relativamente cálida y estratificada se ve enriquecida estacionalmente por la productividad fitoplanctónica del EB, y podría contener una fracción importante del MOP de origen reciente, como resultado de las floraciones superficiales que ocurren en la región durante el verano austral, las cuales suelen estar dominadas por *Phaeocystis antarctica*, diatomeas pequeñas y otros nanoflagelados (Kang & Lee, 1995). En este sentido, se ha verificado que valores elevados de CBP en los estratos superiores responden a la acumulación de macromoléculas biogénicas asociadas a estas floraciones y su potencial transferencia hacia capas más profundas (Kang & Lee, 1995; Danovaro *et al.*, 1999). Cabe destacar que dichas concentraciones fueron inferiores en ambos sitios de estudio, en relación a lo reportado previamente para zonas altamente productivas del OA como la bahía de Terranova en el mar de Ross, donde las PRT en el MOP pueden alcanzar concentraciones de hasta  $145 \mu\text{g L}^{-1}$  durante condiciones “libres de hielo” (Kim *et al.*, 2021), o el mar de Amundsen, con concentraciones entre 100 a  $150 \mu\text{g L}^{-1}$  en el verano tardío o inclusive mayores a  $160 \mu\text{g L}^{-1}$  en picos de floraciones de diatomeas (Kim *et al.*,

2016). No obstante, estas diferencias deben interpretarse en función de la dinámica regional: el EB constituye un sistema altamente dinámico, caracterizado por la confluencia de masas de agua con trayectorias, mezcla y grados de modificación muy distintos, a diferencia de sistemas como la bahía de Terranova o la *polynya* del mar de Amundsen, en los cuales la productividad primaria estacional puede ser muy elevada debido a una fuerte estratificación superficial y otras condiciones favorables para el desarrollo de floraciones (Arrigo & Thomas, 2004; Barber *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2020).

Las concentraciones de CHO y LIP en superficie (valores máximos de  $\sim 18 \mu\text{g L}^{-1}$  en ambos sitios) también fueron más bajas en este estudio que las observadas en trabajos previos (Kim *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2021). La composición bioquímica del MOP está estrechamente ligada a la estructura comunitaria y al estado fisiológico del fitoplancton que lo origina (Finkel *et al.*, 2016). En regiones como el mar de Ross, donde se alternan floraciones dominadas por diatomeas y haptofitas como *P. antarctica*, las diferencias en las contribuciones de CHO, LIP y PRT responden directamente a las estrategias adaptativas de estos organismos (Misic *et al.*, 2024). Por ejemplo, los polisacáridos asociados a *P. antarctica* son más lábiles y tienden a degradarse con rapidez, mientras que otros CHO retenidos en la matriz celular de diatomeas, presentan mayor estabilidad y persistencia en la columna de agua (Hitchcock, 1982). Por otra parte, el EB suele mostrar un predominio de nanoflagelados, incluyendo *P. antarctica*, los cuales pueden llegar a representar más del 80 % del carbono total derivado del fitoplancton (Kang & Lee, 1995). Este tipo de ensamble, característico de zonas de transición y aguas antárticas meso u oligotróficas, produce una señal biogeoquímica distinta: una fracción proteica más abundante ligada a la producción reciente, y concentraciones más bajas de CHO, especialmente de los exopolisacáridos típicos de las floraciones (Kang & Lee, 1995; Kim *et al.*, 2021). El menor aporte de CHO al CBP en Three Sisters y en Orca, coincide con el contexto oceanográfico planteado, y no necesariamente estaría implicando una baja productividad en el EB, sino un tipo de producción dominada por células más pequeñas cuya contribución es menor o más susceptible a la degradación bacteriana temprana (Mosby & Smith, 2015; Deppeler *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2021). Valores de la razón CHO:LIP mayores a 1 pueden deberse a un mayor aporte relativo de CHO estructurales, mientras que valores menores a 1 sugieren un enriquecimiento relativo en LIP, típicamente más resistentes a la degradación y asociados a etapas más avanzadas del procesamiento del MOP (Pusceddu *et al.*, 2011). Las concentraciones de LIP determinadas en ambos sitios, concuerdan con los patrones estacionales descritos para otros sectores del OA, donde la fracción lipídica del MOP suele incrementar hacia fines del otoño y durante el invierno (Kim *et al.*, 2021). Este “enriquecimiento” invernal en LIP, puede ser explicado por su

función en el metabolismo del fitoplancton en estos ambientes polares, ya que los mismos constituyen la principal reserva energética en condiciones de baja intensidad lumínica y por tanto, de actividad fotosintética producida (Misic *et al.*, 2024). En estos sistemas polares caracterizados por importantes cambios en la duración del fotoperiodo, numerosas especies acumulan triacilglicéridos y otros compuestos lipídicos durante la temporada estival, para luego utilizarlos durante los meses de oscuridad parcial o total (Becker *et al.*, 2018; Parrish, 2025). Kim *et al.* (2021) demostraron que, en el mar de Ross, los LIP del MOP aumentan significativamente en otoño e invierno, reflejando el predominio de células en estado de almacenamiento, más que de crecimiento activo. Este comportamiento se asocia además con cambios en la composición comunitaria, con varias diatomeas de gran tamaño (como *Fragilariopsis* sp. y *Thalassiosira* sp.) que acumulan cantidades elevadas de LIP en periodos de baja disponibilidad lumínica, en contraste con las especies más pequeñas (*P. antarctica*) las cuales tienden a priorizar la síntesis proteica durante la fase de crecimiento rápido en el verano (Davidson *et al.*, 2010; Deppeler *et al.*, 2020). La dinámica estacional de la degradación del MOP también juega un rol clave y podría contribuir a la variabilidad observada de las razones CHO:LIP: mientras que los CHO lábiles experimentan una rápida remineralización por parte de las bacterias heterótrofas durante la temporada de mayor actividad biológica, los LIP presentan rutas de degradación más lentas, especialmente cuando se encuentran en formas estructurales más complejas (Wakeham & Lee, 1993).

La distribución de CHO, LIP y PRT también depende de interacciones entre la topografía y los patrones de circulación regionales y locales (Kiriakoulakis *et al.*, 2009). Los montes submarinos y geoformas similares pueden funcionar como estructuras que intensifican la mezcla, o bien generan patrones de circulación cerrados o semicerrados a través de procesos como las columnas de Taylor (Kiriakoulakis *et al.*, 2009; Meredith *et al.*, 2015), resultando en la retención local del MOP en suspensión (Roberts *et al.*, 2018; Busch *et al.*, 2020). El enriquecimiento en CHO observado en las profundidades intermedias de Orca (con razones CHO:LIP mayores a las obtenidas para las otras profundidades) es consistente con la retención de material parcialmente degradado y con la posible inyección de partículas desde capas más profundas, asociadas a surgencias inducidas por la morfología del monte submarino (Kiriakoulakis *et al.*, 2009; Meredith *et al.*, 2015). Por otro lado, las concentraciones de LIP significativamente más altas observadas en los estratos intermedios de algunas estaciones de Three Sisters, podrían deberse a procesos locales de retención y acumulación del MOP asociados a flujos horizontales de partículas o “canales” de circulación generados por las características geomorfológicas del complejo (Schreider *et al.*, 2014; Roberts *et al.*, 2018).

Las masas de agua que confluyen en el EB ejercen un control importante sobre la distribución vertical y el grado de degradación del MOP (Sangrà *et al.*, 2011; Ducklow *et al.*, 2018). La influencia de la TBW en superficie favorece la presencia de MOP fresco, de origen fitoplanctónico, y CBP dominado por las PRT, siendo que estas suelen constituir la fracción dominante del MOP reciente durante periodos de alta producción primaria estival (Ducklow *et al.*, 2001). A profundidades mayores, el ingreso de la TWW introduce aguas más frías y salinas con un MOP sometido a mayores tiempos de residencia y a una remineralización más intensa (Gonçalves-Araujo *et al.*, 2015). Es esperable que la fracción proteica disminuya más rápido con la profundidad, mientras que algunos CHO estructurales, más resistentes a la degradación, adquieran una abundancia relativa mayor (Fabiano *et al.*, 1993; Fabiano & Pusceddu, 1998; Kim *et al.*, 2021). Esto es consistente con las concentraciones más elevadas de CHO en la zona intermedia de Orca, donde la topografía del monte podría, además, estar favoreciendo el ascenso de partículas parcialmente degradadas asociadas a estas intrusiones de la TWW (Lavelle & Mohn, 2010; van Haren *et al.*, 2017; Busch *et al.*, 2020). Cerca del fondo, la presencia de aguas más frías, densas y homogéneas transportadas por la BDW y la BBW favorecen un escenario de intensa remineralización del MOP (Fabiano & Pusceddu, 1998; Danovaro *et al.*, 1999). No obstante, en ambos sitios, la disminución general del CBP hacia el fondo, junto con la persistencia de razones PRT:CHO mayores a 1, indica que, si bien una fracción del material lábil es degradada durante su descenso, parte del carbono biogénico es efectivamente exportado hacia los estratos más profundos. En Three Sisters, las variaciones de CHO:LIP con la profundidad son relativamente moderadas, más consistentes con un sistema dominado por la producción local y una exportación vertical más directa del MOP. En cambio, en Orca la heterogeneidad de CHO:LIP y la presencia de valores más extremos refleja una dinámica más compleja del MOP, probablemente modulada por la topografía del monte, donde procesos de retención y recirculación podrían incrementar el tiempo de residencia del material en la columna de agua y promover una transformación diferenciada de las distintas fracciones macromoleculares.

El EB constituye una región tectónicamente activa que alberga varias estructuras volcánicas submarinas, así como condiciones propicias para la generación de sistemas hidrotermales (Dähmann *et al.*, 2001; Klinkhammer *et al.*, 2001; Almendros *et al.*, 2020). En este contexto, se ha documentado actividad hidrotermal en dos regiones principales del sistema: isla Decepción (cuenca Oeste), un volcán activo con numerosas zonas de emanación hidrotermal somera (Levin *et al.*, 2016; Arasanz *et al.*, 2022; Belyaev *et al.*, 2024), y la cuenca Central del EB, área de estudio del presente trabajo, donde se ha observado evidencia que sugiere la presencia de plumas profundas enriquecidas en

especies químicas reductoras, indicadoras de fuentes hidrotermales difusas (Suess *et al.*, 1987; Lawver *et al.*, 1995; Klinkhammer *et al.*, 1996; Bohrmann *et al.*, 1998; Petersen *et al.*, 2004; Rodrigo *et al.*, 2018). Las implicancias biogeoquímicas de este escenario son relevantes para interpretar las variaciones en la composición del MOP, ya que parte del material producido por los organismos quimiosintéticos asociados a las emanaciones, puede ser transferido al resto de la columna de agua a través de pulsos de partículas. Este MOP derivado de la actividad quimiosintética estaría especialmente enriquecido en LIP, siendo estos la clase de biopolímeros energéticamente más relevante para el sustento de dichas comunidades del fondo (Levin *et al.*, 2016). Los patrones observados en los datos obtenidos en este trabajo, particularmente la ausencia de incrementos lipídicos inusuales, la dominancia proteica en todos los estratos, y las razones CHO:LIP y PRT:CHO típicas de ambientes oligotróficos, no sugieren un aporte hidrotermal significativo en ninguno de los dos sitios estudiados. No obstante, debido a la complejidad hidrográfica del EB y a la demostrada presencia de fuentes hidrotermales en sectores cercanos, no puede descartarse completamente la existencia de aportes difusos muy atenuados o intermitentes, o que tal vez las señales de actividad hidrotermal se encuentren restringidas únicamente a los sedimentos marinos, matriz que no fue estudiada en este trabajo.

### 5.3. *Origen y grado de procesamiento del MOP en suspensión: evidencia elemental e isotópica*

El bajo porcentaje de carbono orgánico (% C) y nitrógeno total (% N) registrado en el MOP en la base de la termoclina para ambos sitios de estudio, es comparable con los valores típicamente reportados en regiones antárticas durante el verano austral, cuando el MOP suele presentar una fracción orgánica reducida debido al reciclaje microbiano intensivo y al aporte de detritos minerales en suspensión (Lin *et al.*, 2023). Este comportamiento resulta esperable para las capas subsuperficiales del EB, donde la remineralización tiende a ser comparativamente elevada y el transporte vertical de las partículas está sometido a una fuerte transformación en la interfase comprendida entre las aguas superficiales correspondientes a la TBW y las más profundas derivadas de la TWW (Sangrà *et al.*, 2011). Las razones C:N determinadas refuerzan esta interpretación: en primer lugar, los valores obtenidos se ubicaron por debajo de los asociados al material vascular terrestre ( $> 12$ ) (Goñi *et al.*, 2003; Lamb *et al.*, 2006), lo que indica ausencia de aportes alóctonos significativos, esperable en un ambiente oceánico como el EB y con una influencia en cierta medida limitada del aporte de agua de deshielo continental (Ducklow *et al.*, 2012; Henley *et al.*, 2020). Asimismo, las razones C:N en ambos sitios se encontraron dentro de los rangos descritos para el MOP

de origen fitoplanctónico de fresco a moderadamente degradado (~ 6 – 10) (Goñi *et al.*, 2003; Lamb *et al.*, 2006), e inclusive para material de origen bacteriano (~ 3 – 5) (Monticelli *et al.*, 2003; Henley *et al.*, 2012), lo cual sugiere una mezcla entre la biomasa autotrófica reciente y compuestos parcialmente degradados por el consumo heterotrófico (Fan *et al.*, 2020; Thomalla *et al.*, 2023). La alta concentración de PRT en las capas superficiales de ambos sitios sugiere una producción primaria activa, dominada por fitoplancton con elevadas tasas de crecimiento, como diatomeas pequeñas y *P. antarctica*, lo que se asocia con valores bajos de la relación C:N (Kang & Lee, 1995; Tuerena *et al.*, 2019; Henley *et al.*, 2020).

Las firmas isotópicas de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) fueron consistentes con los patrones descritos a nivel regional, siendo que las masas de agua frías y ricas en  $\text{CO}_2$  producen  $\delta^{13}\text{C}$  más negativas, mientras que aguas con mayor residencia superficial, mayor productividad localizada o con influencia de la retención topográfica, tienden a mostrar  $\delta^{13}\text{C}$  más enriquecidas (valores menos negativos) (St John Glew *et al.*, 2021; Brandenburg *et al.*, 2022). En ambos sitios se obtuvieron firmas esperables para aguas antárticas (~ -32 – -22 ‰) (Lourey *et al.*, 2004; Lin *et al.*, 2023; Henley *et al.*, 2012), sugiriendo un origen predominantemente autóctono del MOP y no de aportes externos o retrabajados. Si bien los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  también coincidieron con los rangos típicamente asociados a agua dulce, en el contexto del EB esta señal no puede interpretarse como un aporte directo de carbono continental. Procesos de fraccionamiento isotópico asociados al pastoreo del zooplancton, al reprocesamiento bacteriano y a la producción fitoplanctónica bajo condiciones de alta disponibilidad de  $\text{CO}_2$  disuelto, pueden generar  $\delta^{13}\text{C}$  más negativos que mimetizan firmas no marinas (Popp *et al.*, 1998; Tاملander *et al.*, 2006; Tuerena *et al.*, 2019). La ausencia de señales isotópicas extremadamente empobrecidas ( $\leq -35$  ‰), típicas de carbono quimiosintético proveniente de fuentes hidrotermales, indica que Three Sisters ni Orca contribuyen de manera directa, o al menos detectable en el presente trabajo, con fuentes de carbono inorgánico asociadas a emanaciones submarinas, a diferencia de lo observado en sistemas hidrotermales de las dorsales oceánicas o volcanes activos de profundidad (Fisher *et al.*, 1990; Wang *et al.*, 2018).

Las diferencias entre sitios responden a procesos tanto biológicos como físicos, asociados a las características topográficas y de circulación. En Three Sisters se observaron  $\delta^{13}\text{C}$  más negativas, en particular en las estaciones M-32, M-33 y M-34. Este empobrecimiento en  $\delta^{13}\text{C}$  puede estar vinculado a tasas elevadas de crecimiento de células fitoplanctónicas pequeñas y a condiciones de disponibilidad no limitante de  $\text{CO}_2$  disuelto, que determinan un alto fraccionamiento isotópico durante la fotosíntesis y generan partículas más empobrecidas en  $^{13}\text{C}$  (Popp *et al.*, 1999; Tuerena *et al.*, 2019;

Brandenburg *et al.*, 2022). Además, la posibilidad de que un mayor componente bacteriano contribuya a este empobrecimiento es explicada por un procesamiento temprano del MOP que tiende a “alivianar” la señal isotópica (Thomalla *et al.*, 2023). Tal comportamiento coincide con lo reportado por Khim *et al.* (2005) en el EB, donde los autores observaron  $\delta^{13}\text{C}$  bajas al inicio de las floraciones de fitoplancton, seguido por un enriquecimiento progresivo con el avance de la temporada estival, debido tanto al agotamiento relativo de  $\text{CO}_2$  como al aumento de la contribución de pellets fecales y restos del zooplancton, más enriquecidos en  $^{13}\text{C}$ .

Aunque no se obtuvieron firmas de  $\delta^{15}\text{N}$  debido al bajo contenido de N en el MOP retenido en los filtros, la estructura general del sistema sugiere un comportamiento análogo al descrito para el  $\delta^{13}\text{C}$  (Khim *et al.*, 2005). En las primeras etapas de una floración, cuando el nitrato está disponible en exceso, el fitoplancton discrimina más fuertemente contra el  $^{15}\text{N}$ , generando  $\delta^{15}\text{N}$  bajas en el MOP. Khim *et al.* (2005) demostraron que este es el caso para el hundimiento de partículas en la cuenca Este del EB, donde los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  se mantienen bajos al inicio del verano austral y aumentan conforme avanza la estación productiva, como producto del consumo progresivo del nitrato, la reducción del fraccionamiento isotópico y el creciente aporte de material zooplanctónico enriquecido. Por otra parte, St John Glew *et al.* (2021) sostienen que esta tendencia es un patrón robusto a escala del OA, con variaciones estacionales regionales de hasta  $\pm 4$  ‰ y, localmente, amplitudes mayores según las dinámicas del sistema. No obstante, es posible inferir que la combinación de % N bajos, C:N moderadas y el predominio de las PRT en el CBP total, indica la presencia de nitrógeno biogénico, aunque con concentraciones por debajo del umbral analítico. Algunos estudios recientes en regiones polares sugieren que esta limitación podría resolverse aumentando el volumen de filtrado o bien utilizando técnicas de concentración de partículas (Henley *et al.*, 2020; Thomalla *et al.*, 2023).

## 6. Conclusiones

Este trabajo permitió caracterizar la distribución vertical y la composición macromolecular del MOP, así como sus fuentes de procedencia, en la cuenca Central del Estrecho de Bransfield, integrando información bioquímica, elemental e isotópica y fisicoquímica, a lo largo de la columna de agua. Los resultados obtenidos aportan evidencia relevante sobre la variabilidad en la composición bioquímica del MOP y sus implicancias en términos de labilidad y biodisponibilidad en un sistema oceánico complejo y escasamente estudiado.

El análisis de biopolímeros orgánicos evidenció una marcada estructura vertical del MOP, estrechamente asociada a la estratificación de la columna de agua y la distribución de las masas de agua presentes en la región. Las altas concentraciones totales de proteínas, así como la dominancia de la fracción proteica en el carbono biopolimérico, junto con las razones obtenidas entre biopolímeros, indican la presencia general de un MOP de alto valor nutricional, caracterizado por una fracción orgánica lábil y altamente biodisponible para los consumidores heterótrofos. Este escenario es consistente con un aporte predominantemente de producción autótrofa reciente y sugiere condiciones favorables para la transferencia eficiente de energía hacia los niveles tróficos superiores.

Si bien se observó una disminución general del contenido de MOP con la profundidad, la persistencia de la fracción proteica y de razones bioquímicas indicativas de material lábil, sugiere que al menos una parte de las partículas exportadas al fondo conserva su integridad molecular, pese a los procesos de transformación y degradación a los cuales son sometidas durante el transporte vertical.

Las diferencias observadas entre los sitios estudiados están relacionadas a la influencia de la geomorfología y de los procesos físicos y oceanográficos locales sobre la calidad y biodisponibilidad del MOP. Three Sisters presentó un comportamiento más consistente del MOP a lo largo de la columna de agua, compatible con un sistema dominado por la producción local y una exportación vertical relativamente directa hacia el fondo marino. En Orca, la mayor heterogeneidad sugiere una dinámica más compleja, potencialmente asociada a procesos de retención y recirculación, que incrementan el tiempo de residencia del MOP en la columna de agua y favorecen su transformación.

Con la información elemental e isotópica disponible, fue posible inferir un origen mayoritariamente autótrofo del MOP, con un grado de alteración creciente con la profundidad. La integración de estos indicadores sugiere que la dinámica del MOP responde principalmente a procesos biológicos y físicos típicos del sistema pelágico, sin evidencias claras de un aporte significativo de MOP de origen quimiosintético.

## 7. Consideraciones finales

Los resultados obtenidos amplían el marco de referencia existente y constituyen una base para futuras comparaciones espaciales y temporales orientadas a comprender el comportamiento, transformación y destino del MOP en sistemas marinos polares. Se resalta la necesidad de profundizar el estudio del MOP mediante enfoques integradores que combinen análisis bioquímicos más detallados con mediciones directas de los flujos de partículas, indicadores de actividad microbiana y series temporales que permitan capturar la variabilidad del sistema. En un escenario de cambio climático acelerado en el océano Austral, avanzar en la comprensión de cómo varía la calidad, el valor energético y el potencial de utilización del MOP resulta fundamental para evaluar la respuesta del ecosistema y los procesos asociados a la Bomba Biológica frente a crecientes perturbaciones ambientales.

## 8. Referencias bibliográficas

- Almendros, J., Wilcock, W., Soule, D., Teixidó, T., Vizcaíno, L., Ardanaz, O., Granja-Bruña, J. L., Martín-Jiménez, D., Yuan, X., Heit, B., Schmidt-Aursch, M. C., Geissler, W., Dziak, R., Carrión, F., Ontiveros, A., Abella, R., Carmona, E., Agüi-Fernández, J. F., Sánchez, N., ... Schmahl, L. (2020). BRAVOSEIS: Geophysical investigation of rifting and volcanism in the Bransfield strait, Antarctica. *Journal of South American Earth Sciences*, 104. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102834>
- Antonio, E. S., Kasai, A., Ueno, M., Kurikawa, Y., Tsuchiya, K., Toyohara, H., Ishihi, Y., Yokoyama, H., & Yamashita, Y. (2010). Consumption of terrestrial organic matter by estuarine molluscs determined by analysis of their stable isotopes and cellulase activity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(3), 401–407. <https://doi.org/10.1016/J.ECSS.2009.05.010>
- Arasanz, R., Vilanova, O., Geyer, A., Aulinas, M., Ibañez-Insa, J., Álvarez-Valero, A. M., Albert, H., & Prieto-Ballesteros, O. (2022). Characterization of alteration minerals in Deception Island (Antarctica): implications for the dynamics of the current hydrothermal system. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-10002>
- Ardelan, M. v, Holm-Hansen, O., Hewes, C. D., Reiss, C. S., Silva, N. S., Dulaiova, H., Steinnes, E., & Sakshaug, E. (2010). Natural iron enrichment around the Antarctic Peninsula in the Southern Ocean. *Biogeosciences*, 7. [www.biogeosciences.net/7/11/2010/](http://www.biogeosciences.net/7/11/2010/)
- Arrigo, K. R., & Thomas, D. N. (2004). Large scale importance of sea ice biology in the Southern Ocean. *Antarctic Science*, 16, 471–486. <https://doi.org/10.1017/S0954102004002263>
- Barber, D. G., Asplin, M. G., Papakyriakou, T. N., Miller, L., Else, B. G. T., Iacozza, J., Mundy, C. J., Gosslin, M., Asselin, N. C., Ferguson, S., Lukovich, J. v, Stern, G. A., Gaden, A., Pučko, M., Geilfus, N.-X., & Wang, F. (2012). Consequences of change and variability in sea ice on marine ecosystem and biogeochemical processes during the 2007–2008 Canadian International Polar Year program. *Climatic Change*, 115(1), 135–159. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0482-9>
- Bashmachnikov, I., Loureiro, C., & Martins, A. (2013). Topographically induced circulation patterns and mixing over Condor seamount. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2013.09.014>
- Becker, K. W., Collins, J. R., Durham, B. P., Groussman, R. D., White, A. E., Fredricks, H. F., Ossolinski, J. E., Repeta, D. J., Carini, P., Armbrust, E. V., & van Mooy, B. A. S. (2018). Daily changes in phytoplankton lipidomes reveal mechanisms of energy storage in the open ocean. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07346-z>
- Belyaev, O., Huertas, I. E., Navarro, G., Amaya-Vías, S., de La Paz, M., Sparaventi, E., Heredia, S., Sukekava, C. F., Laglera, L. M., Tovar-Sá Nchez, A., Guieu, C., & Holmes, T. M. (2024). Hydrothermal alteration of seawater biogeochemistry in Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica). <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1432122>
- Bianchi, T., & Canuel, E. (2011). *Chemical Biomarkers in Aquatic Ecosystems*. Princeton University Press.
- Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911–917. <https://doi.org/10.1139/o59-099>
- Bohrmann, G., Chin, C., Petersen, S., Sahling, H., Schwarz-Schampera, U., Greinert, J., Lammers, S., Rehder, G., Daehlmann, A., Wallmann, K., Dijkstra, S., & Schenke, H.-W. (1998). Hydrothermal activity at Hook Ridge in the Central Bransfield Basin, Antarctica. *Geo-Marine Letters*, 18(4), 277–284. <https://doi.org/10.1007/s003670050080>
- Boyd, P. W., Claustre, H., Levy, M., Siegel, D. A., & Weber, T. (2019). Multi-faceted particle pumps drive carbon sequestration in the ocean. *Nature*, 568(7752), 327–335. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1098-2>
- Brandenburg, K. M., Rost, B., van de Waal, D. B., Hoins, M., & Sluijs, A. (2022). Physiological control on carbon isotope fractionation in marine phytoplankton. *Biogeosciences*, 19(13), 3305–3315. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3305-2022>
- Bridoux, M. C., Neibauer, J., Ingalls, A. E., Nunn, B. L., & Keil, R. G. (2015). Suspended marine particulate proteins in coastal and oligotrophic waters. *Journal of Marine Systems*, 143, 39–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.10.014>
- Busch, K., Hanz, U., Mienis, F., Mueller, B., Franke, A., Martyn Roberts, E., Tore Rapp, H., & Hentschel, U. (2020). On giant shoulders: How a seamount affects the microbial community composition of seawater and sponges. *Biogeosciences*, 17(13), 3471–3486. <https://doi.org/10.5194/bg-17-3471-2020>

- Campbell, K. A. (2006). Hydrocarbon seep and hydrothermal vent paleoenvironments and paleontology: Past developments and future research directions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232(2), 362–407. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.06.018>
- Cau, A., Ennas, C., Moccia, D., Mangoni, O., Bolinesi, F., Saggiomo, M., Granata, A., Guglielmo, L., Swadling, K. M., & Pusceddu, A. (2021). Particulate organic matter release below melting sea ice (Terra Nova Bay, Ross Sea, Antarctica): Possible relationships with zooplankton. *Journal of Marine Systems*, 217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103510>
- Corzo, A., Rodríguez-Gálvez, S., Lubian, L., Sangrá, P., Martínez, A., & Morillo, J. A. (2005). Spatial distribution of transparent exopolymer particles in the Bransfield Strait, Antarctica. *Journal of Plankton Research*, 27(7), 635–646. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbi038>
- Costa, R. R., Mendes, C. R. B., Tavano, V. M., Dotto, T. S., Kerr, R., Monteiro, T., Odebrecht, C., & Secchi, E. R. (2020). Dynamics of an intense diatom bloom in the Northern Antarctic Peninsula, February 2016. *Limnology and Oceanography*, 65(9), 2056–2075. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/lno.11437>
- Dählmann, A., Wallmann, K., Sahling, H., Sarthou, G., Bohrmann, G., Petersen, S., Chin, C. S., & Klinkhammer, G. P. (2001). Hot vents in an ice-cold ocean: Indications for phase separation at the southernmost area of hydrothermal activity, Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3), 381–394. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00535-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00535-0)
- Danovaro, R. (2009). *Methods for the Study of Deep-Sea Sediments, Their Functioning and Biodiversity* (R. Danovaro, Ed.; 1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439811382>
- Danovaro, R., Marrale, D., della Croce, N., Parodi, P., & Fabiano, M. (1999). Biochemical composition of sedimentary organic matter and bacterial distribution in the Aegean Sea: trophic state and pelagic–benthic coupling. *Journal of Sea Research*, 42(2), 117–129. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1385-1101\(99\)00024-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1385-1101(99)00024-6)
- Davidson, A. T., Scott, F. J., Nash, G. v, Wright, S. W., & Raymond, B. (2010). Physical and biological control of protistan community composition, distribution and abundance in the seasonal ice zone of the Southern Ocean between 30 and 80°E. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57(9), 828–848. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.02.011>
- Deppeler, S. L., & Davidson, A. T. (2017). Southern Ocean phytoplankton in a changing climate. *Frontiers in Marine Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00040>
- Deppeler, S., Schulz, K. G., Hancock, A., Pascoe, P., McKinlay, J., & Davidson, A. (2020). Ocean acidification reduces growth and grazing impact of Antarctic heterotrophic nanoflagellates. *Biogeosciences*, 17(16), 4153–4171. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4153-2020>
- DeVries, T., & Weber, T. (2017). The export and fate of organic matter in the ocean: New constraints from combining satellite and oceanographic tracer observations. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(3), 535–555. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2016GB005551>
- du Preez, C., & Fisher, C. R. (2018). Long-term stability of back-arc basin hydrothermal vents. *Frontiers in Marine Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00054>
- DuBois, Michel., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A., & Smith, Fred. (1956). Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Analytical Chemistry*, 28(3), 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Ducklow, H. W., Clarke, A., Dickhut, R., Doney, S. C., Geisz, H., Huang, K., Martinson, D. G., Meredith, M. P., Moeller, H. v, Montes-Hugo, M., Schofield, O., Stammerjohn, S. E., Steinberg, D., & Fraser, W. (2012). The Marine System of the Western Antarctic Peninsula. In *Antarctic Ecosystems* (pp. 121–159). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781444347241.ch5>
- Ducklow, H. W., Steinberg, D. K., & Buesseler, K. O. (2001). *Upper Ocean Carbon Export and the Biological Pump*.
- Ducklow, H. W., Stukel, M. R., Eveleth, R., Doney, S. C., Jickells, T., Schofield, O., Baker, A. R., Brindle, J., Chance, R., & Cassar, N. (2018). Spring-summer net community production, new production, particle export and related water column biogeochemical processes in the marginal sea ice zone of the Western Antarctic Peninsula 2012-2014. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2122). <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0177>
- Dziak, R. P., Park, M., Lee, W. S., Matsumoto, H., Bohnenstiehl, D. R., & Haxel, J. H. (2010). Tectonomagmatic activity and ice dynamics in the Bransfield Strait back-arc basin, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2009JB006295>

- Espinoza Celi, J. A., Cahuana-Yáñez, N. G., Martillo-Bustamante, C. E., & González-Bonilla, M. (2023). Bransfield Strait and South Shetland Islands sedimentary basement and upper crustal structure: An analysis of gravity and magnetic data at the northwestern area of the Antarctic Peninsula. *Tectonophysics*, 852, 229771. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229771>
- Fabiano, M., Povero, P., & Danovaro, R. (1993). Distribution and composition of particulate organic matter in the Ross Sea (Antarctica). *Polar Biology*, 13(8), 525–533. <https://doi.org/10.1007/BF00236394>
- Fabiano, M., & Danovaro, R. (1994). Composition of organic matter in sediments facing a river estuary (Tyrrhenian Sea): relationships with bacteria and microphytobenthic biomass. *Hydrobiologia*, 277(2), 71–84. <https://doi.org/10.1007/BF00016755>
- Fabiano, M., Povero, P., & Danovaro, R. (1996). Particulate organic matter composition in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) during summer 1990. *Antarctic Science*, 8(1), 7–13. <https://doi.org/DOI:10.1017/S095410209600003X>
- Fabiano, M., & Pusceddu, A. (1998). Total and hydrolizable particulate organic matter (carbohydrates, proteins and lipids) at a coastal station in Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica). *Polar Biology*, 19(2), 125–132. <https://doi.org/10.1007/s003000050223>
- Fan, G., Han, Z., Ma, W., Chen, S., Chai, F., Mazloff, M. R., Pan, J., & Zhang, H. (2020). Southern Ocean carbon export efficiency in relation to temperature and primary productivity. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70417-z>
- Finkel, Z. v., Follows, M. J., Liefer, J. D., Brown, C. M., Benner, I., & Irwin, A. J. (2016). *Phylogenetic Diversity in the Macromolecular Composition of Microalgae*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155977>
- Fisher, C. R., Kennicutt, M. C., & Brooks, J. M. (1990). Stable carbon isotopic evidence for carbon limitation in hydrothermal vent vestimentiferans. *Science*, 247(4946), 1094–1096. <https://doi.org/10.1126/science.247.4946.1094>
- Frey, D. I., Krechik, V. A., Morozov, E. G., Drozd, I. D., Gordey, A. S., Latushkin, A. A., Mekhova, O. S., Mukhametianov, R. Z., Murzina, S. A., Ostroumova, S. A., Ponomarev, V. I., Salyuk, P. A., Smirnova, D. A., Shutov, S. A., & Zuev, O. A. (2022). Water Exchange between Deep Basins of the Bransfield Strait. *Water (Switzerland)*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/w14203193>
- Frey, D. I., Krechik, V., Gordey, A., Gladyshev, S., Churin, D., Drozd, I., Osadchiev, A., Kashin, S., Morozov, E., & Smirnova, D. (2023). Austral summer circulation in the Bransfield Strait based on SADCPC measurements and satellite altimetry. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1111541>
- Galois, R., Blanchard, G., Seguignes, M., Huet, V., & Joassard, L. (2000). Spatial distribution of sediment particulate organic matter on two estuarine intertidal mudflats: a comparison between Marennes-Oléron Bay (France) and the Humber Estuary (UK). *Continental Shelf Research*, 20(10-11). [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(00\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(00)00019-4)
- García, M. A., López, O., Sospedra, J., Espino, M., Gràcia, V., Morrison, G., Rojas, P., Figa, J., Puigdefàbregas, J., & Arcilla, A. S. (1994). Mesoscale variability in the Bransfield Strait region (Antarctica) during Austral summer. *European Geosciences Union*, 12, 856–867. <https://doi.org/10.1007/s00585-994-0856-z>
- García, M. A., Castro, C. G., Ríos, A. F., Doval, M. D., Rosón, G., Gomis, D., & López, O. (2002). Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(4), 585–602. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00113-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8)
- GEBCO Compilation Group. (2021). *GEBCO 2021 Grid*. <https://doi.org/10.5285/c6612cbe-50b3-0cff-e053-6c86abc09f8f>
- Genin, A. (2004). Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies. *Journal of Marine Systems*, 50(1), 3–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.10.008>
- Genin, A., & Dower, J. (2008). Seamount Plankton Dynamics. En *Seamounts: Ecology, Fisheries and Conservation* (pp. 87–100). <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch5>
- Gonçalves-Araujo, R., de Souza, M. S., Tavano, V. M., & Garcia, C. A. E. (2015). Influence of oceanographic features on spatial and interannual variability of phytoplankton in the Bransfield Strait, Antarctica. *Journal of Marine Systems*, 142, 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.09.007>
- Goñi, M. A., Teixeira, M. J., & Perkey, D. W. (2003). Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57(5), 1023–1048. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(03\)00008-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0272-7714(03)00008-8)

- Gordo, C. (2013). Sistema de la Corriente del Bransfield (Antártida). *Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.
- Gordon, A., & Nowlin, Jr. (1978). The Basin Waters of the Bransfield Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 8, 258–264. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1978\)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1978)008<0258:TBWOTB>2.0.CO;2)
- Gordon, A. L., Mensch, M., Zhaoqian, D., Smethie Jr., W. M., & de Bettencourt, J. (2000). Deep and bottom water of the Bransfield Strait eastern and central basins. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105, 11337–11346. <https://doi.org/10.1029/2000JC900030>
- Grosse, J., Nöthig, E. M., Torres-Valdés, S., & Engel, A. (2021). Summertime Amino Acid and Carbohydrate Patterns in Particulate and Dissolved Organic Carbon Across Fram Strait. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.684675>
- Halfter, S., Cavan, E. L., Butterworth, P., Swadling, K. M., & Boyd, P. W. (2022). “Sinking dead”—How zooplankton carcasses contribute to particulate organic carbon flux in the subantarctic Southern Ocean. *Limnology and Oceanography*, 67(1), 13–25. <https://doi.org/10.1002/lno.11971>
- Hartree, E. F. (1972). Determination of protein: A modification of the Lowry method that gives a linear photometric response. *Analytical Biochemistry*, 48(2), 422–427. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(72\)90094-2](https://doi.org/10.1016/0003-2697(72)90094-2)
- Hatzky, J. (2005). *Physiography of the Orca Seamount in the Bransfield Strait, Antarctic Peninsula*. PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.341126>
- Henley, S. F., Annett, A. L., Ganeshram, R. S., Carson, D. S., Weston, K., Crosta, X., Tait, A., Dougans, J., Fallick, A. E., & Clarke, A. (2012). Factors influencing the stable carbon isotopic composition of suspended and sinking organic matter in the coastal Antarctic sea ice environment. *Biogeosciences*, 9(3), 1137–1157. <https://doi.org/10.5194/bg-9-1137-2012>
- Henley, S. F., Cavan, E. L., Fawcett, S. E., Kerr, R., Monteiro, T., Sherrell, R. M., Bowie, A. R., Boyd, P. W., Barnes, D. K. A., Schloss, I. R., Marshall, T., Flynn, R., & Smith, S. (2020). Changing Biogeochemistry of the Southern Ocean and Its Ecosystem Implications. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00581>
- Hernández-Sánchez, M. T., Hepburn, L., Stock, M. J., Connelly, D. P., & Pancost, R. D. (2024). The microbial lipid signature in sediments and chimneys within a back-arc basin hydrothermal system south of the Antarctic Polar Front. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2024.104247>
- Heroy, D. C., Sjunneskog, C., & Anderson, J. B. (2008). Holocene climate change in the Bransfield Basin, Antarctic Peninsula: evidence from sediment and diatom analysis. *Antarctic Science*, 20(1), 69–87. <https://doi.org/10.1017/S0954102007000788>
- Hitchcock, G. L. (1982). A comparative study of the size-dependent organic composition of marine diatoms and dinoflagellates. *Journal of Plankton Research*, 4(2), 363–377. <https://doi.org/10.1093/plankt/4.2.363>
- Ibáñez, J. M., Morales, J., Alguacil, G., Almendros, J., Oritz, R., & del Pezzo, E. (1997). Intermediate-focus earthquakes under South Shetland Islands (Antarctica). *Geophysical Research Letters*, 24(5), 531–534. <https://doi.org/10.1029/97GL00314>
- Isla, E., Rossi, S., Palanques, A., Gili, J. M., Gerdes, D., & Arntz, W. (2006). Biochemical composition of marine sediment from the eastern Weddell Sea (Antarctica): High nutritive value in a high benthic-biomass environment. *Journal of Marine Systems*, 60(3–4), 255–267. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.01.006>
- Jiao, N., Herndl, G. J., Hansell, D. A., Benner, R., Kattner, G., Wilhelm, S. W., Kirchman, D. L., Weinbauer, M. G., Luo, T., Chen, F., & Azam, F. (2010). Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: long-term carbon storage in the global ocean. *Nature Reviews Microbiology*, 8(8), 593–599. <https://doi.org/10.1038/nrmicro2386>
- Jo, N., La, H. S., Kim, J. H., Kim, K., Kim, B. K., Kim, M. J., Son, W., & Lee, S. H. (2021). Different Biochemical Compositions of Particulate Organic Matter Driven by Major Phytoplankton Communities in the Northwestern Ross Sea. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.623600>
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065). <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>
- Journal of Geophysical Research: Oceans. (2021). 125(10), Wiley/AGU.

- Kang, S.-H., & Lee, S. (1995). Antarctic phytoplankton assemblage in the western Bransfield Strait region, February 1993: composition, biomass, and mesoscale distributions. *Marine Ecology Progress Series*, 129.
- Karig, D. E. (1971). Origin and development of marginal basins in the western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76(11), 2542–2561. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB076i011p02542>
- Kharbush, J. J., Close, H. G., van Mooy, B. A. S., Arnosti, C., Smittenberg, R. H., le Moigne, F. A. C., Mollenhauer, G., Scholz-Böttcher, B., Obrecht, I., Koch, B. P., Becker, K. W., Iversen, M. H., & Mohr, W. (2020). Particulate Organic Carbon Deconstructed: Molecular and Chemical Composition of Particulate Organic Carbon in the Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00518>
- Khim, B.-K., Kim, D., Shin, H. C., & Kim, D. Y. (2005). Stable carbon and nitrogen isotopes of sinking particles in the eastern bransfield strait (Antarctica). *Ocean Science Journal*, 40(3), 55–64. <https://doi.org/10.1007/BF03022610>
- Kiko, R., Biastoch, A., Brandt, P., Cravatte, S., Hauss, H., Hummels, R., Kriest, I., Marin, F., McDonnell, A. M. P., Oschlies, A., Picheral, M., Schwarzkopf, F. U., Thurnherr, A. M., & Stemmann, L. (2017). Biological and physical influences on marine snowfall at the equator. *Nature Geoscience*, 10(11), 852–858. <https://doi.org/10.1038/ngeo3042>
- Kim, B. K., Lee, J. H., Joo, H., Song, H. J., Yang, E. J., Lee, S. H., & Lee, S. H. (2016). Macromolecular compositions of phytoplankton in the Amundsen Sea, Antarctica. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 123, 42–49. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2015.04.024>
- Kim, B. K., Jung, J., Lee, Y., Cho, K. H., Gal, J. K., Kang, S. H., & Ha, S. Y. (2020). Characteristics of the biochemical composition and bioavailability of phytoplankton-derived particulate organic matter in the Chukchi sea, Arctic. *Water (Switzerland)*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/W12092355>
- Kim, D., Kim, D.-Y., Park, J.-S., & Kim, Y.-J. (2005). Interannual variation of particle fluxes in the eastern Bransfield Strait, Antarctica: A response to the sea ice distribution. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(11), 2140–2155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.06.008>
- Kim, K., Park, J., Jo, N., Park, S., Yoo, H., Kim, J., & Lee, S. H. (2021). Monthly Variation in the Macromolecular Composition of Phytoplankton Communities at Jang Bogo Station, Terra Nova Bay, Ross Sea. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.618999>
- Kiriakoulakis, K., Vilas, J. C., Blackbird, S. J., Arístegui, J., & Wolff, G. A. (2009). Seamounts and organic matter—Is there an effect? The case of Sedlo and Seine seamounts, Part 2. Composition of suspended particulate organic matter. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(25), 2631–2645. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.024>
- Klinkhammer, G. P., Chin, C.-C., Wilson, C., & Lawver, L. (1996). *Hydrothermal and hydrographic surveys of the Bransfield Strait: Results from cruise NBP95-07*. 31.
- Klinkhammer, G. P., Chin, C. S., Keller, R. A., Dählmann, A., Sahling, H., Sarthou, G., Petersen, S., Smith, F., & Wilson, C. (2001). Discovery of new hydrothermal vent sites in Bransfield Strait, Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3), 395–407. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00536-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00536-2)
- Lamb, A. L., Wilson, G. P., & Leng, M. J. (2006). A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 75(1), 29–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2005.10.003>
- Lavelle, J. W., & Mohn, C. (2010). *Motion, Commotion, and Biophysical Connections at Deep Ocean Seamounts*, 23(1). <http://oceanexplorer.noaa.gov/explorations/06fire/background/marianaarc/marianaarc.html>
- Lawver, L. A., Keller, R. A., Fisk, M. R., & Strelin, J. A. (1995). Bransfield Strait, Antarctic Peninsula Active Extension behind a Dead Arc. En B. Taylor (Ed.), *Backarc Basins: Tectonics and Magmatism* (pp. 315–342). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1843-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1843-3_8)
- le Bris, N., Yücel, M., Das, A., Sievert, S. M., LokaBharathi, P. P., & Girguis, P. R. (2019). Hydrothermal energy transfer and organic carbon production at the deep seafloor. *Frontiers in Marine Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00531>
- Lee, C., Wakeham, S., & Arnosti, C. (2004). Particulate Organic Matter in the Sea: The Composition Conundrum. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 33(8), 565–575. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-33.8.565>

- Levin, L. A., & Currin, C. (2012). *Stable Isotope Protocols: Sampling and Sample Processing*. <https://doi.org/https://escholarship.org/uc/item/3jw2v1hh>
- Levin, L. A., Baco, A. R., Bowden, D. A., Colaco, A., Cordes, E. E., Cunha, M. R., Demopoulos, A. W. J., Gobin, J., Grupe, B. M., Le, J., Metaxas, A., Netburn, A. N., Rouse, G. W., Thurber, A. R., Tunnickliffe, V., van Dover, C. L., Vanreusel, A., & Watling, L. (2016). Hydrothermal vents and methane seeps: Rethinking the sphere of influence. *Frontiers in Marine Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00072>
- Lin, Y., Li, Y., Huang, Y., Chen, Z., Wang, L., Li, D., & Tao, S. (2023). Suspended particulate organic carbon and its carbon isotopic composition in the surface water around the Antarctic Peninsula during summer 2017–2018. *Antarctic Science*, 35(3), 194–208. <https://doi.org/10.1017/S0954102023000093>
- Lourey, M. J., Trull, T. W., & Tilbrook, B. (2004). Sensitivity of  $\delta^{13}\text{C}$  of Southern Ocean suspended and sinking organic matter to temperature, nutrient utilization, and atmospheric  $\text{CO}_2$ . *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(2), 281–305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.10.002>
- Lowry, O. H., R. N. J., F. A. L. & R. R. J. (1951). Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 193(1), 265–275.
- Marsay, C. M., Sanders, R. J., Henson, S. A., Pabortsava, K., Achterberg, E. P., & Lampitt, R. S. (2015). Attenuation of sinking particulate organic carbon flux through the mesopelagic ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(4), 1089–1094. <https://doi.org/10.1073/pnas.1415311112>
- Marsh, J., & Weinstein, D. (1966). Simple charring method for determination of lipids. *Journal of Lipid Research*, 7, 574–576. [https://doi.org/10.1016/S0022-2275\(20\)39274-9](https://doi.org/10.1016/S0022-2275(20)39274-9)
- Mashayek, A., Gula, J., Baker, L. E., Naveira Garabto, A. C., Cimoli, L., Riley, J., & de Lavergne, C. (2024). On the role of seamounts in upwelling deep-ocean waters through turbulent mixing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(7). <https://doi.org/10.1073/pnas.2322163121>
- Mendes, C. R. B., Tavano, V. M., Kerr, R., Dotto, T. S., Maximiano, T., & Secchi, E. R. (2018). Impact of sea ice on the structure of phytoplankton communities in the northern Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 149, 111–123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.12.003>
- Meredith, M. P., Meijers, A. S., Naveira Garabato, A. C., Brown, P. J., Venables, H. J., Abrahamsen, E. P., Jullion, L., & Messias, M.-J. (2015). Circulation, retention, and mixing of waters within the Weddell-Scotia Confluence, Southern Ocean: The role of stratified Taylor columns. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(1), 547–562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2014JC010462>
- Meyers, P. A. (2003). Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 34(2), 261–289. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00168-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00168-7)
- Misic, C., Covazzi Harriague, A., Mangoni, O., Aulicino, G., Castagno, P., & Cotroneo, Y. (2017). Effects of physical constraints on the lability of POM during summer in the Ross Sea. *Journal of Marine Systems*, 166, 132–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2016.06.012>
- Misic, C., Bolinesi, F., Castellano, M., Olivari, E., Povero, P., Fusco, G., Saggiomo, M., & Mangoni, O. (2024). Factors driving the bioavailability of particulate organic matter in the Ross Sea (Antarctica) during summer. *Hydrobiologia*, 851(11), 2657–2679. <https://doi.org/10.1007/s10750-024-05482-w>
- Monticelli, L. S., la Ferla, R., & Maimone, G. (2003). Dynamics of bacterioplankton activities after a summer phytoplankton bloom period in Terra Nova Bay. *Antarctic Science*, 15(1), 85–93. <https://doi.org/10.1017/S0954102003001081>
- Mosby, A. F., & Smith WO, J. (2015). Phytoplankton growth rates in the Ross Sea, Antarctica. *Aquatic Microbial Ecology*, 74, 157–171. <https://www.int-res.com/abstracts/ame/v74/ame01733>
- Omand, M. M., Govindarajan, R., He, J., & Mahadevan, A. (2020). Sinking flux of particulate organic matter in the oceans: Sensitivity to particle characteristics. *Scientific Reports*, 10(1), 5582. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60424-5>
- Parrish, C. C. (2025). *Production, Transport, Fate and Effects of Lipids in the Marine Environment*. <https://doi.org/10.3390/md23020052>
- Petersen, J. M., Zielinski, F. U., Pape, T., Seifert, R., Moraru, C., Amann, R., Hourdez, S., Girguis, P. R., Wankel, S. D., Barbe, V., Pelletier, E., Fink, D., Borowski, C., Bach, W., & Dubilier, N. (2011). Hydrogen is an energy source for hydrothermal vent symbioses. *Nature*, 476(7359), 176–180. <https://doi.org/10.1038/nature10325>

- Petersen, S., Herzig, P. M., Schwarz-Schampera, U., Hannington, M. D., & Jonasson, I. R. (2004). Hydrothermal precipitates associated with bimodal volcanism in the Central Bransfield Strait, Antarctica. *Mineralium Deposita*, 39(3), 358–379. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0414-3>
- Polukhin, A., Morozov, E., Tishchenko, P., Frey, D., Artemiev, V., Borisenko, G., Masevich, A., Marina, E., Medvedev, E. v., Popov, O., Seliverstova, A., & Chultsova, A. (2021). Water Structure in the Bransfield Strait (Antarctica) in January 2020: Hydrophysical, Optical, and Hydrochemical Features. *Oceanology*, 61, 632–644. <https://doi.org/10.1134/S0001437021050106>
- Popp, B. N., Trull, T., Kenig, F., Wakeham, S. G., Rust, T. M., Tilbrook, B., Griffiths, F. B., Wright, S. W., Marchant, H. J., Bidigare, R. R., & Laws, E. A. (1999). Controls on the carbon isotopic composition of Southern Ocean phytoplankton. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(4), 827–843. <https://doi.org/10.1029/1999GB900041>
- Prieto, M. J., Canals, M., Ercilla, G., & de Batist, M. (1998). Structure and geodynamic evolution of the Central Bransfield Basin (NW Antarctica) from seismic reflection data. *Marine Geology*, 149(1), 17–38. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00038-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00038-3)
- Pusceddu, A., Dell'Anno, A., & Fabiano, M. (2000). Organic matter composition in coastal sediments at Terra Nova Bay (Ross Sea) during summer 1995. *Polar Biology*, 23(4), 288–293. <https://doi.org/10.1007/s003000050446>
- Pusceddu, A., Dell'Anno, A., Fabiano, M., & Danovaro, R. (2009). Quantity and bioavailability of sediment organic matter as signatures of benthic trophic status. *Marine Ecology Progress Series*, 375, 41–52. <https://doi.org/10.3354/meps07735>
- Pusceddu, A., Bianchelli, S., Gambi, C., & Danovaro, R. (2011). Assessment of benthic trophic status of marine coastal ecosystems: Significance of meiofaunal rare taxa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(4), 420–430. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.05.012>
- Rintoul, S., W. Hughes, C., & Olbers, D. (2001). The antarctic circumpolar current system. En G. Siedler, J. Church, & J. Gould (Eds.), *International Geophysics* (Vol. 77). Academic Press. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(01\)80124-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0074-6142(01)80124-8)
- Roberts, E. M., Mienis, F., Rapp, H. T., Hanz, U., Meyer, H. K., & Davies, A. J. (2018). Oceanographic setting and short-timescale environmental variability at an Arctic seamount sponge ground. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 138, 98–113. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr.2018.06.007>
- Rodrigo, C., Blamey, J. M., Huhn, O., & Provost, C. (2018). Is there an active hydrothermal flux from the orca seamount in the bransfield strait, antarctica? *Andean Geology*, 45(3), 344–356. <https://doi.org/10.5027/andgeoV45n3-3086>
- Ryba, S. A., & Burgess, R. M. (2002). Effects of sample preparation on the measurement of organic carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, and oxygen concentrations in marine sediments. *Chemosphere*, 48(1), 139–147. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00027-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00027-9)
- Sallée, J. B. (2018). Southern Ocean warming. *Oceanography*, 31(2), 52–62. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2018.215>
- Sangrà, P., Gordo, C., Hernández-Arencibia, M., Marrero-Díaz, A., Rodríguez-Santana, A., Stegner, A., Martínez-Marrero, A., Pelegrí, J. L., & Pichon, T. (2011). The Bransfield current system. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(4), 390–402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011>
- Schneider, B., Schlitzer, R., Fischer, G., & Nöthig, E.-M. (2003). Depth-dependent elemental compositions of particulate organic matter (POM) in the ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2002GB001871>
- Schreider, Al. A., Schreider, A. A., & Evsenko, E. I. (2014). The stages of the development of the basin of the Bransfield Strait. *Oceanology*, 54(3), 365–373. <https://doi.org/10.1134/S0001437014020234>
- Seliverstova, A. M., Zuev, O. A., Polukhin, A. A., Chultsova, A. L., Masevich, A. v., & Mukhametianov, R. Z. (2023). Hydrological and Hydrochemical Structure of the Waters of the Bransfield Strait in January 2022. *Oceanology*, 63(4), 510–522. <https://doi.org/10.1134/S0001437023040161>
- Signori, C. N., Thomas, F., Enrich-Prast, A., Pollery, R. C. G., & Sievert, S. M. (2014). Microbial diversity and community structure across environmental gradients in Bransfield Strait, Western Antarctic Peninsula. *Frontiers in Microbiology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00647>
- Soares, M. A., Bhaskar, P. v, Naik, R. K., Dessai, D., George, J., Tiwari, M., & Anilkumar, N. (2015). Latitudinal  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  variations in particulate organic matter (POM) in surface waters from the Indian ocean sector of Southern Ocean and the Tropical Indian Ocean in 2012. *Deep Sea*

- St John Glew, K., Espinasse, B., Hunt, B. P. v, Pakhomov, E. A., Bury, S. J., Pinkerton, M., Nodder, S. D., Gutiérrez-Rodríguez, A., Safi, K., Brown, J. C. S., Graham, L., Dunbar, R. B., Mucciarone, D. A., Magozzi, S., Somes, C., & Trueman, C. N. (2021). Isoscape Models of the Southern Ocean: Predicting Spatial and Temporal Variability in Carbon and Nitrogen Isotope Compositions of Particulate Organic Matter. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(9). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GB006901>
- Stukel, M. R., & Ducklow, H. W. (2017). Stirring Up the Biological Pump: Vertical Mixing and Carbon Export in the Southern Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 31(9), 1420–1434. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2017GB005652>
- Suess, E., Fisk, M., & Kadko, D. (1987). *Thermal interaction between back-arc volcanism and basin sediments in the Bransfield Strait, Antarctica*.
- Talley, L., Pickard, G., Emery, W., & Swift, J. (2011). *Southern Ocean*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4552-2.10013-7>
- Tamelerand, T., Søreide, J. E., Hop, H., & Carroll, M. L. (2006). Fractionation of stable isotopes in the Arctic marine copepod *Calanus glacialis*: Effects on the isotopic composition of marine particulate organic matter. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 333(2), 231–240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jembe.2006.01.001>
- Thomalla, S. J., du Plessis, M., Fauchereau, N., Giddy, I., Gregor, L., Henson, S., Joubert, W. R., Little, H., Monteiro, P. M. S., Mtshali, T., Nicholson, S., Ryan-Keogh, T. J., & Swart, S. (2023). Southern Ocean phytoplankton dynamics and carbon export: insights from a seasonal cycle approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 381(2249), 20220068. <https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0068>
- Tokarczyk, R. (1987). Classification of water masses in the Bransfield Strait and southern part of the Drake Passage using a method of statistical multidimensional analysis. *Polish Polar Research*, 8, 333–336.
- Tuerena, R. E., Ganeshram, R. S., Humphreys, M. P., Browning, T. J., Bouman, H., & Piotrowski, A. P. (2019). Isotopic fractionation of carbon during uptake by phytoplankton across the South Atlantic subtropical convergence. *Biogeosciences*, 16(18), 3621–3635. <https://doi.org/10.5194/bg-16-3621-2019>
- Turner, J., Hosking, J. S., Bracegirdle, T. J., Marshall, G. J., & Phillips, T. (2015). Recent changes in Antarctic Sea Ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 373(2045). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0163>
- van Caspel, M. van, Hellmer, H. H., & Mata, M. M. (2018). On the ventilation of Bransfield Strait deep basins. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 149, 25–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.006>
- van Haren, H., Hanz, U., de Stigter, H., Mienis, F., & Duineveld, G. (2017). *Internal wave turbulence at a biologically rich Mid-Atlantic seamount*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189720>
- Venturini, N., Zhu, Z., Bessonart, M., García-Rodríguez, F., Bergamino, L., Brugnoli, E., Muniz, P., & Zhang, J. (2020). Between-summer comparison of particulate organic matter in surface waters of a coastal area influenced by glacier meltwater runoff and retreat. *Polar Science*, 26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100603>
- Veny, M., Aguiar-González, B., Marrero-Díaz, Á., Pereira-Vázquez, T., & Rodríguez-Santana, Á. (2024). Biophysical coupling of seasonal chlorophyll-a bloom variations and phytoplankton assemblages across the Peninsula Front in the Bransfield Strait. *Ocean Science*, 20(2), 389–415. <https://doi.org/10.5194/os-20-389-2024>
- Verdugo, P., Alldredge, A. L., Azam, F., Kirchman, D. L., Passow, U., & Santschi, P. H. (2004). The oceanic gel phase: a bridge in the DOM–POM continuum. *Marine Chemistry*, 92(1), 67–85. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marchem.2004.06.017>
- Veuger, B., van Oevelen, D., & Middelburg, J. J. (2012). Fate of microbial nitrogen, carbon, hydrolysable amino acids, monosaccharides, and fatty acids in sediment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 83, 217–233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.12.016>
- Vorrath, M. E., Müller, J., Rebolledo, L., Cárdenas, P., Shi, X., Esper, O., Opel, T., Geibert, W., Munoz, P., Haas, C., Kuhn, G., Lange, C. B., Lohmann, G., & Mollenhauer, G. (2020). Sea ice dynamics in the Bransfield Strait, Antarctic Peninsula, during the past 240 years: A multi-proxy intercomparison study. *Climate of the Past*, 16(6), 2459–2483. <https://doi.org/10.5194/cp-16-2459-2020>

- Wakeham, S. G., & Lee, C. (1993). Production, Transport, and Alteration of Particulate Organic Matter in the Marine Water Column. En M. H. Engel & S. A. Macko (Eds.), *Organic Geochemistry: Principles and Applications* (pp. 145–169). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2890-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2890-6_6)
- Wang, X., Li, C., Wang, M., & Zheng, P. (2018). *Stable isotope signatures and nutritional sources of some dominant species from the PACManus hydrothermal area and the Desmos caldera.* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208887>
- Wilson, C., Klinkhammer, G. P., & Chin, C. S. (1999). Hydrography within the Central and East Basins of the Bransfield Strait, Antarctica. *Journal of Physical Oceanography*, 29(3), 465–479. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029<0465:HWTCAE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029<0465:HWTCAE>2.0.CO;2)
- Wynn-Edwards, C. A., Shadwick, E. H., Davies, D. M., Bray, S. G., Jansen, P., Trinh, R., & Trull, T. W. (2020). Particle Fluxes at the Australian Southern Ocean Time Series (SOTS) Achieve Organic Carbon Sequestration at Rates Close to the Global Median, Are Dominated by Biogenic Carbonates, and Show No Temporal Trends Over 20-Years. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00329>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis* (5th Edition). Prentice-Hall/Pearson.
- Zhou, M., Niiler, P. P., Zhu, Y., & Dorland, R. D. (2006). The western boundary current in the Bransfield Strait, Antarctica. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(7), 1244–1252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dsr.2006.04.003>
- Zhou, X., Zhu, G., & Hu, S. (2020). Influence of tides on mass transport in the Bransfield Strait and the adjacent areas, Antarctic. *Polar Science*, 23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polar.2020.100506>

## 9. Anexo

### 9.1. Material suplementario

**Tabla 5 (S1).** Resultados de las comparaciones estadísticas de las variables fisicoquímicas (temperatura, salinidad y clorofila-a) y bioquímicas (CHO: carbohidratos; LIP: lípidos; PRT: proteínas) entre profundidades de cada sitio de muestreo y entre sitios para cada profundidad. La normalidad de los datos se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad mediante la prueba de Levene. Cuando se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, seguido de comparaciones múltiples mediante el test post-hoc de Tukey. Cuando uno o ambos supuestos no se cumplieron, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, seguida de comparaciones post-hoc no paramétricas (Dunn o Conover, según la variable analizada), con corrección por comparaciones múltiples mediante los métodos de Holm o Bonferroni. Se reportan los valores del estadístico del test, los grados de libertad (g.l.) y los valores p ajustados. El color verde señala diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). En rojo, se indican las diferencias no significativas ( $p > 0,05$ ).

| Variable    | Comparación                             | Estadístico | g.l. | Valor p (ajustado) |
|-------------|---|-------------|------|--------------------|
| Temperatura | Profundidad   Three Sisters (Kruskal)   | 27,1171832  | 3    | 5,56355E-06        |
| Temperatura | Three Sisters: Superficie vs Termoclina |             |      | 1                  |
| Temperatura | Three Sisters: Superficie vs Intermedia |             |      | 0,014244453        |
| Temperatura | Three Sisters: Superficie vs Fondo      |             |      | 1,25091E-05        |
| Temperatura | Three Sisters: Termoclina vs Intermedia |             |      | 0,225550443        |
| Temperatura | Three Sisters: Termoclina vs Fondo      |             |      | 0,000920941        |
| Temperatura | Three Sisters: Intermedia vs Fondo      |             |      | 0,527964877        |
| Temperatura | Profundidad   Monte Orca (ANOVA)        | 469,8378923 | 3    | 4,75269E-15        |
| Temperatura | Monte Orca: Fondo vs Intermedia         |             |      | 0,0008             |
| Temperatura | Monte Orca: Fondo vs Superficie         |             |      | 0                  |
| Temperatura | Monte Orca: Fondo vs Termoclina         |             |      | 0                  |
| Temperatura | Monte Orca: Intermedia vs Superficie    |             |      | 0                  |
| Temperatura | Monte Orca: Intermedia vs Termoclina    |             |      | 0                  |
| Temperatura | Monte Orca: Superficie vs Termoclina    |             |      | 0,4044             |
| Temperatura | Sitio   Superficie (ANOVA)              | 31,28854151 | 1    | 0,000117324        |
| Temperatura | Superficie: Monte Orca vs Three Sisters |             |      | 0,0001             |
| Temperatura | Sitio   Termoclina (Kruskal)            | 3,288348083 | 1    | 0,069773187        |
| Temperatura | Termoclina: Three Sisters vs Monte Orca |             |      | 0,069773187        |
| Temperatura | Sitio   Intermedia (ANOVA)              | 0,245922208 | 1    | 0,630678458        |
| Temperatura | Intermedia: Monte Orca vs Three Sisters |             |      | 0,6307             |
| Temperatura | Sitio   Fondo (ANOVA)                   | 3,090570728 | 1    | 0,112616135        |
| Temperatura | Fondo: Monte Orca vs Three Sisters      |             |      | 0,1126             |
| Salinidad   | Profundidad   Three Sisters (Kruskal)   | 25,21864486 | 3    | 1,38976E-05        |
| Salinidad   | Three Sisters: Superficie vs Termoclina |             |      | 1                  |
| Salinidad   | Three Sisters: Superficie vs Intermedia |             |      | 0,003102445        |
| Salinidad   | Three Sisters: Superficie vs Fondo      |             |      | 9,97179E-05        |
| Salinidad   | Three Sisters: Termoclina vs Intermedia |             |      | 0,058660093        |
| Salinidad   | Three Sisters: Termoclina vs Fondo      |             |      | 0,003786013        |
| Salinidad   | Three Sisters: Intermedia vs Fondo      |             |      | 1                  |
| Salinidad   | Profundidad   Monte Orca (Kruskal)      | 16,61681416 | 3    | 0,000847271        |
| Salinidad   | Monte Orca: Superficie vs Termoclina    |             |      | 0,381650585        |

|             |   |             |       |             |
|-------------|---|-------------|-------|-------------|
| Salinidad   | Monte Orca: Superficie vs Intermedia    |             |       | 0,011195397 |
| Salinidad   | Monte Orca: Superficie vs Fondo         |             |       | 0,002093535 |
| Salinidad   | Monte Orca: Termoclina vs Intermedia    |             |       | 0,879509812 |
| Salinidad   | Monte Orca: Termoclina vs Fondo         |             |       | 0,235563351 |
| Salinidad   | Monte Orca: Intermedia vs Fondo         |             |       | 1           |
| Salinidad   | Sitio   Superficie (Kruskal)            | 9,793721973 | 1     | 0,001751087 |
| Salinidad   | Superficie: Three Sisters vs Monte Orca |             |       | 0,001751087 |
| Salinidad   | Sitio   Termoclina (Kruskal)            | 9,771812081 | 1     | 0,001772077 |
| Salinidad   | Termoclina: Three Sisters vs Monte Orca |             |       | 0,001772077 |
| Salinidad   | Sitio   Intermedia (ANOVA)              | 0,296430732 | 1     | 0,598058937 |
| Salinidad   | Intermedia: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,5981      |
| Salinidad   | Sitio   Fondo (Kruskal)                 | 0,366666667 | 1     | 0,544826851 |
| Salinidad   | Fondo: Three Sisters vs Monte Orca      |             |       | 0,544826851 |
| Clorofila-a | Profundidad   Three Sisters (Kruskal)   | 23,75185014 | 3     | 2,81442E-05 |
| Clorofila-a | Three Sisters: Superficie vs Termoclina |             |       | 1           |
| Clorofila-a | Three Sisters: Superficie vs Intermedia |             |       | 0,001465315 |
| Clorofila-a | Three Sisters: Superficie vs Fondo      |             |       | 0,001319204 |
| Clorofila-a | Three Sisters: Termoclina vs Intermedia |             |       | 0,009482015 |
| Clorofila-a | Three Sisters: Termoclina vs Fondo      |             |       | 0,008646677 |
| Clorofila-a | Three Sisters: Intermedia vs Fondo      |             |       | 1           |
| Clorofila-a | Profundidad   Monte Orca (Kruskal)      | 11,80267062 | 3     | 0,008090622 |
| Clorofila-a | Monte Orca: Superficie vs Termoclina    |             |       | 1           |
| Clorofila-a | Monte Orca: Superficie vs Intermedia    |             |       | 0,064290725 |
| Clorofila-a | Monte Orca: Superficie vs Fondo         |             |       | 0,019881665 |
| Clorofila-a | Monte Orca: Termoclina vs Intermedia    |             |       | 0,551714951 |
| Clorofila-a | Monte Orca: Termoclina vs Fondo         |             |       | 0,23050477  |
| Clorofila-a | Monte Orca: Intermedia vs Fondo         |             |       | 1           |
| Clorofila-a | Sitio   Superficie (ANOVA)              | 0,019912088 | 1     | 0,890333898 |
| Clorofila-a | Superficie: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,8903      |
| Clorofila-a | Sitio   Termoclina (ANOVA)              | 1,910152589 | 1     | 0,194366448 |
| Clorofila-a | Termoclina: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,1944      |
| Clorofila-a | Sitio   Intermedia (Kruskal)            | 0,715447154 | 1     | 0,397641398 |
| Clorofila-a | Intermedia: Three Sisters vs Monte Orca |             |       | 0,397641398 |
| Clorofila-a | Sitio   Fondo (ANOVA)                   | 0,073843124 | 1     | 0,791951909 |
| Clorofila-a | Fondo: Monte Orca vs Three Sisters      |             |       | 0,792       |
| CHO         | Profundidad   Three Sisters (Kruskal)   | 19,36844758 | 3     | 0,000229394 |
| CHO         | Three Sisters: Fondo vs Intermedia      |             |       | 0,273502339 |
| CHO         | Three Sisters: Fondo vs Superficie      |             |       | 1,10236E-05 |
| CHO         | Three Sisters: Fondo vs Termoclina      |             |       | 0,000384837 |
| CHO         | Three Sisters: Intermedia vs Superficie |             |       | 0,000137078 |
| CHO         | Three Sisters: Intermedia vs Termoclina |             |       | 0,004831804 |
| CHO         | Three Sisters: Superficie vs Termoclina |             |       | 0,273502339 |
| CHO         | Profundidad   Monte Orca (ANOVA)        | 11,57255125 | 3, 19 | 0,000153487 |
| CHO         | Monte Orca: Fondo vs Intermedia         |             |       | 2,88096E-05 |
| CHO         | Monte Orca: Fondo vs Superficie         |             |       | 0,000400912 |
| CHO         | Monte Orca: Fondo vs Termoclina         |             |       | 0,316135846 |
| CHO         | Monte Orca: Intermedia vs Superficie    |             |       | 0,316135846 |
| CHO         | Monte Orca: Intermedia vs Termoclina    |             |       | 0,000265253 |

|     |   |             |       |             |
|-----|---|-------------|-------|-------------|
| CHO | Monte Orca: Superficie vs Termoclina    |             |       | 0,004432526 |
| CHO | Sitio   Superficie (ANOVA)              | 0,420145161 | 1, 12 | 0,529072598 |
| CHO | Superficie: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,540279152 |
| CHO | Sitio   Termoclina (ANOVA)              | 0,735737124 | 1, 12 | 0,407835216 |
| CHO | Termoclina: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,387426976 |
| CHO | Sitio   Intermedia (ANOVA)              | 64,20705711 | 1, 12 | 3,69823E-06 |
| CHO | Intermedia: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 8,20193E-05 |
| CHO | Sitio   Fondo (Kruskal)                 | 0,797802198 | 1     | 0,37175129  |
| CHO | Fondo: Monte Orca vs Three Sisters      |             |       | 0,397296151 |
| LIP | Profundidad   Three Sisters (ANOVA)     | 8,410259394 | 3, 27 | 0,000415002 |
| LIP | Three Sisters: Fondo vs Intermedia      |             |       | 0,87564716  |
| LIP | Three Sisters: Fondo vs Superficie      |             |       | 0,002140534 |
| LIP | Three Sisters: Fondo vs Termoclina      |             |       | 0,00996027  |
| LIP | Three Sisters: Intermedia vs Superficie |             |       | 0,00996027  |
| LIP | Three Sisters: Intermedia vs Termoclina |             |       | 0,03323327  |
| LIP | Three Sisters: Superficie vs Termoclina |             |       | 0,87564716  |
| LIP | Profundidad   Monte Orca (Kruskal)      | 13,45519855 | 3     | 0,003748827 |
| LIP | Monte Orca: Fondo vs Intermedia         |             |       | 0,455168209 |
| LIP | Monte Orca: Fondo vs Superficie         |             |       | 0,026315556 |
| LIP | Monte Orca: Fondo vs Termoclina         |             |       | 0,026315556 |
| LIP | Monte Orca: Intermedia vs Superficie    |             |       | 0,001446754 |
| LIP | Monte Orca: Intermedia vs Termoclina    |             |       | 0,001608782 |
| LIP | Monte Orca: Superficie vs Termoclina    |             |       | 0,900299969 |
| LIP | Sitio   Superficie (ANOVA)              | 0,325040134 | 1, 12 | 0,579112448 |
| LIP | Superficie: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,540279152 |
| LIP | Sitio   Termoclina (Kruskal)            | 1,066666667 | 1     | 0,301699582 |
| LIP | Termoclina: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,320773736 |
| LIP | Sitio   Intermedia (ANOVA)              | 7,894673844 | 1, 12 | 0,015756827 |
| LIP | Intermedia: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,012710034 |
| LIP | Sitio   Fondo (ANOVA)                   | 0,318527086 | 1, 10 | 0,584929882 |
| LIP | Fondo: Monte Orca vs Three Sisters      |             |       | 0,704686942 |
| PRT | Profundidad   Three Sisters (Kruskal)   | 17,28045795 | 3     | 0,000618811 |
| PRT | Three Sisters: Fondo vs Intermedia      |             |       | 0,95409615  |
| PRT | Three Sisters: Fondo vs Superficie      |             |       | 0,000318258 |
| PRT | Three Sisters: Fondo vs Termoclina      |             |       | 0,001369194 |
| PRT | Three Sisters: Intermedia vs Superficie |             |       | 0,000749145 |
| PRT | Three Sisters: Intermedia vs Termoclina |             |       | 0,003031307 |
| PRT | Three Sisters: Superficie vs Termoclina |             |       | 0,95409615  |
| PRT | Profundidad   Monte Orca (Kruskal)      | 18,67681159 | 3     | 0,000318856 |
| PRT | Monte Orca: Fondo vs Intermedia         |             |       | 0,123711669 |
| PRT | Monte Orca: Fondo vs Superficie         |             |       | 2,54703E-06 |
| PRT | Monte Orca: Fondo vs Termoclina         |             |       | 0,002209538 |
| PRT | Monte Orca: Intermedia vs Superficie    |             |       | 7,60156E-08 |
| PRT | Monte Orca: Intermedia vs Termoclina    |             |       | 4,41741E-05 |
| PRT | Monte Orca: Superficie vs Termoclina    |             |       | 0,004161114 |
| PRT | Sitio   Superficie (ANOVA)              | 7,30094575  | 1, 12 | 0,019237124 |
| PRT | Superficie: Monte Orca vs Three Sisters |             |       | 0,067835994 |
| PRT | Sitio   Termoclina (ANOVA)              | 2,162771561 | 1, 12 | 0,167118896 |

|     |   |             |   |             |
|-----|---|-------------|---|-------------|
| PRT | Termoclina: Monte Orca vs Three Sisters |             |   | 0,163498934 |
| PRT | Sitio   Intermedia (Kruskal)            | 2,016666667 | 1 | 0,155580348 |
| PRT | Intermedia: Monte Orca vs Three Sisters |             |   | 0,163498934 |
| PRT | Sitio   Fondo (Kruskal)                 | 2,38021978  | 1 | 0,122880258 |
| PRT | Fondo: Monte Orca vs Three Sisters      |             |   | 0,127548659 |