

Influencia glaciaria en la composición y diversidad de la comunidad del fitoplancton marino en la Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge, Antártida

Katy Medina Marcos^{1,2*}, Edwin Loarte^{1,2}, Sofia Rodriguez-Venturo^{1,3},
Maribel Baylón Coritoma⁴, Pedro M Tapia²

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historial del artículo:

Recibido 08 de junio de 2023

Aceptado 04 de abril de 2024

Publicado 30 de abril de 2024

READ IN ENGLISH:

<https://doi.org/10.7773/cm.v2024.3423>

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

* E-mail: kmedinam@unasam.edu.pe

¹ Centro de Investigación en Ciencias de la Tierra, Ambiente y Tecnología (ESAT), Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), 02002 Huaraz, Ancash, Perú.

² Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), 02002 Huaraz, Ancash, Perú.

³ Departamento de Simbiosis Vegetal, Museo de Historia Natural, Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), 15072 Lima, Lima, Perú.

⁴ Laboratorio de Ecología Acuática, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), 15081 Lima, Lima, Perú.

RESUMEN. El cambio climático ha contribuido a un retroceso rápido de los glaciares en la Península Antártica Occidental, presentando implicaciones potenciales para los ecosistemas marinos, especialmente las comunidades de fitoplancton. En el presente trabajo, se examinó la influencia de la cercanía de los frentes glaciares en la composición de fitoplancton en Bahía Almirantazgo, Antártida, durante el verano austral de 2020. Se establecieron 12 estaciones distribuidas a diferentes distancias del frente glaciario para recolectar muestras de agua a 3 profundidades para el análisis cuantitativo de fitoplancton. Se determinó que la comunidad en todas las estaciones estaba dominada por microorganismos nanoflagelados (<20 µm) (95.5%), seguido por diatomeas (4.02%) y, por último, dinoflagelados (0.47%). El índice de diversidad (H') varió entre 0.07 y 1.04 bits·célula⁻¹, presentando los índices más altos en las estaciones más cercanas a los frentes glaciares y la más cercana a la costa (<3 km). Con base en la composición de la comunidad del fitoplancton, se identificaron 3 agrupaciones: (1) la estación más cercana a la costa, (2) las estaciones ubicadas entre 0.66 y 1.12 km del frente glaciario y (3) las estaciones entre 2.61 y 11.10 km del frente glaciario. En general, la diversidad presentó una relación polinomial de cuarto grado ($R^2 = 0.35$) con la distancia al frente glaciario. Por lo tanto, se concluye que la composición de la comunidad de fitoplancton marino varía según su proximidad a los glaciares en Bahía Almirantazgo.

Palabras clave: Antártida, fitoplancton, biodiversidad, composición comunitaria, distancia al glaciario.

INTRODUCCIÓN

La Península Antártica Occidental es una de las regiones que presenta cambios climáticos y ambientales acelerados. Esta región ha experimentado un aumento notable de la temperatura media anual del aire de 1-2 °C durante los últimos 50 años (Ducklow et al. 2007) y un aumento de 0.56 °C por década (Turner et al. 2014), lo que ha generado importantes efectos sobre el hielo marino, las plataformas de hielo y los sistemas glaciares (Steig et al. 2009, Pan et al. 2019). En consecuencia, el retroceso de los glaciares y la desintegración de la capa de hielo están generando cambios en las condiciones hidrofísicas, la duración del periodo de producción y

la estructura y distribución de las comunidades de plancton en la región antártica (Kasyan et al. 2022).

El fitoplancton es uno de los productores primarios más importantes de las aguas antárticas, siendo la fuente principal de alimento y la base de toda la red alimentaria. Habitualmente, en la Península Antártica, las comunidades de fitoplancton están dominadas por diatomeas; sin embargo, a menudo existen sucesos donde dominan otros grupos taxonómicos, como los nanoflagelados (Estrada y Delgado 1990, Lange et al. 2018). Las variaciones en los patrones pueden estar relacionados con las características fisicoquímicas o ambientales de las masas de agua que crean condiciones favorables para la proliferación de diferentes grupos de organismos (Bianchi et

Acceso abierto

En línea ISSN: 2395-9053

Verificado con Similarity Check impulsado por iThenticate

<https://doi.org/10.7773/cm.v2024.3423>



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite compartir y adaptar el trabajo, siempre y cuando se dé el crédito apropiado a los autores originales y la fuente, proporcione un enlace a la licencia Creative Commons e indique si se realizaron cambios. Las figuras, tablas y otros elementos del artículo están incluidos en la licencia CC BY 4.0 del artículo, a menos que se indique lo contrario. Debe solicitar permiso al titular de los derechos de autor para utilizar material no cubierto por esta licencia. El título de la revista está protegido por derechos de autor propiedad de la Universidad Autónoma de Baja California, y el título y el logotipo de la revista no están sujetos a esta licencia.

al. 1992). Una fuente de estos cambios es la entrada de agua glaciares. Esta entrada de agua glacial y los procesos biológicos, como el pastoreo del zooplankton, modifican la abundancia y dominancia de diferentes grupos taxonómicos (Knox 2007). Dado que el cambio climático tiene consecuencias sobre las propiedades físicas y químicas del mar, esto podría provocar cambios en la abundancia, estructura y productividad de las comunidades de fitoplancton, lo que, a su vez, afectaría a todos los niveles tróficos de la red trófica regional (Moline et al. 2004, Kopczyńska 2008, Deppeler y Davidson 2017). Por lo tanto, estudiar la composición de la comunidad de fitoplancton y la influencia de las condiciones ambientales es fundamental para comprender las posibles respuestas de los ecosistemas frente al cambio climático global, tanto a corto como a largo plazo.

En la Isla Rey Jorge, la isla más grande de las Islas Shetland del Sur, se ha evidenciado un retroceso sin precedente de los glaciares que desembocan en los fiordos y en el océano costero (Osmanoğlu et al. 2013). Estudios recientes han evidenciado la influencia de la escorrentía glacial en la composición de las comunidades planctónicas, bentónicas y de macroalgas en 2 fiordos antárticos en Bahía Maxwell (i.e., Caleta Marian y Caleta Potter) debido principalmente a modificaciones notables en las características fisicoquímicas e hidrológicas de la columna de agua por la fusión glacial (García et al. 2019, de Lima et al. 2019, Bae et al. 2021, Kim et al. 2021). Así mismo, las campañas científicas del Perú a la Antártida (ANTAR) han contribuido a la comprensión de la composición del fitoplancton en Ensenada Mackellar, Bahía Almirantazgo, Estrecho de Bransfield, Isla Rey Jorge y los alrededores de Isla Elefante (Sánchez y Villanueva 2001, Bonicelli et al. 2008, Ochoa et al. 2016, Baylón et al. 2019). En particular, en Bahía Almirantazgo, se han desarrollado investigaciones centradas en el estudio de los patrones de distribución del fitoplancton y su variación espacio-temporal (Sánchez et al. 2013, Baylón et al. 2019). Sin embargo, a pesar de los reportes recientes en otros fiordos de Isla Rey Jorge, son escasos los estudios sobre la relación entre el fitoplancton y la influencia de los glaciares en Bahía Almirantazgo. Por lo tanto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia del retroceso de los glaciares sobre la composición y la diversidad del fitoplancton marino, considerando su distancia (proximidad o lejanía) al frente glacial, en Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge, Antártida.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge, Antártida. El gran fiordo de origen tectónico, con una superficie de 122 km² y una profundidad máxima de 535 m, presenta 3 ensenadas principales (Ezcurra, Mackellar y Martel) y una amplia abertura al Estrecho de Bransfield (8.25 km de ancho). Aproximadamente, la mitad de la costa

(83.40 km) está compuesta por glaciares y casquetes polares (Siciński et al. 2011). Además, Bahía Almirantazgo presenta una hidrología compleja determinada por el intercambio de aguas con Estrecho de Bransfield, la escorrentía de agua dulce y los procesos locales (Szafranski y Lipski 1982).

Las estaciones de muestreo se establecieron a lo largo de Bahía Almirantazgo (Fig. 1) en función de la proximidad de los frentes glaciares. En total se establecieron 12 estaciones de muestreo, incluyendo estaciones cercanas a los glaciares (aporte directo de la escorrentía glacial) ubicadas en el interior de Ensenada Mackellar (M01, M02, M03, M04, M05 y M06), estaciones lejanas a los frentes glaciares (sin aporte directo de la escorrentía glacial) ubicadas en dirección al Estrecho de Bransfield (M07, M08 y M09), y otras estaciones a las afueras de la bahía (M10, M11 y M12). Adicionalmente, se tomaron fotografías aéreas de las estaciones de muestreo.

Procedimiento de muestreo

La toma de muestras se llevó a cabo mediante la campaña científica peruana ANTAR XXVII entre el 14 y 19 de enero de 2020 durante el verano austral. En las estaciones ubicadas en Ensenada Mackellar (M01 al M06), las muestras se recolectaron a bordo de una embarcación tipo Zodiac, empleando una botella Niskin de 5 L. En las otras estaciones (M07 a M12), se recolectaron las muestras con el uso de una roseta oceanográfica con un perfilador de conductividad-temperatura-profundidad (CTD) a bordo del buque de la Armada Peruana *Carrasco* (BOP-171) de la Marina de Guerra de Perú. Se tomaron muestras de agua a profundidades de 0, 10 y 20 m que representan la capa fótica de la columna de agua (Cermeno et al. 2014). Estas se recolectaron en frascos de 250 mL y fueron fijadas con formaldehído hasta obtener una concentración final de 0.4% para el análisis posterior y cuantitativo de fitoplancton. Adicionalmente, en cada estación, se hizo un arrastre a nivel superficial con una red de fitoplancton (75 µm de abertura de malla) durante 10 min; estas muestras se fijaron con formaldehído hasta obtener una concentración final de 2% para el análisis posterior y cualitativo de fitoplancton. Debido a las limitaciones de la logística empleada, no se logró adquirir una red de fitoplancton de menor abertura de malla (20 µm), por ende, se trabajó con una red de 75 µm de abertura de malla, la cual nos proporcionó información valiosa sobre los miembros de mayor tamaño de la comunidad fitoplanctónica.

Medición de parámetros fisicoquímicos

Los parámetros fisicoquímicos de la columna de agua se determinaron *in situ* al momento de recolectar las muestras de agua. Se registraron datos de la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto de la columna de agua empleando un medidor portátil Multi 3630 IDS (WTW, Xylem Analytics, Washington, D.C., EE. UU.) para las estaciones dentro de

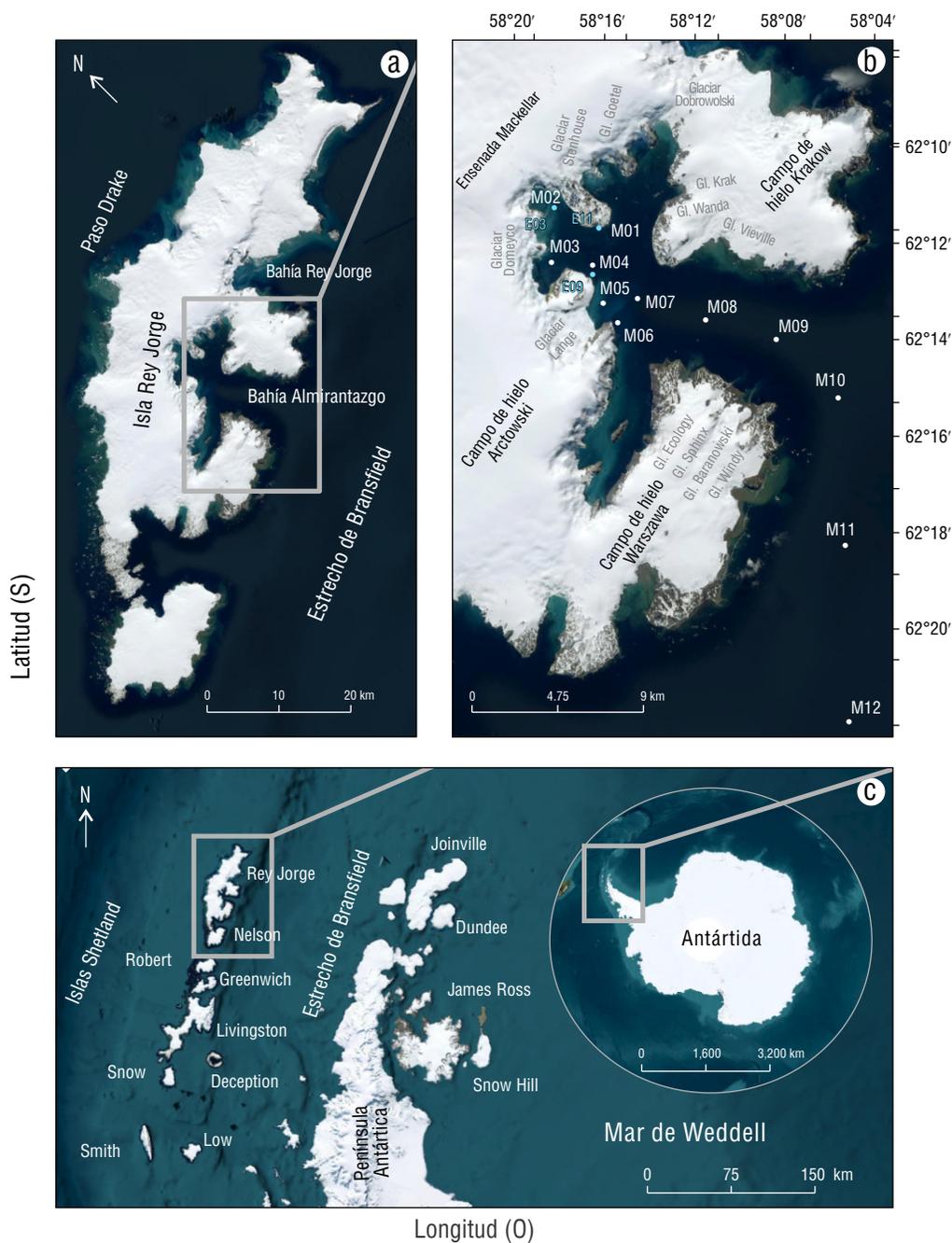


Figura 1. Mapa de ubicación de las estaciones de muestreo en Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge, Antártida. (a) Isla Rey Jorge, (b) Bahía Almirantazgo, (c) Antártida.

Ensenada Mackellar. Para las demás estaciones, utilizamos un perfilador CTD SBE 19 PLUS (Sea-Bird Scientific, Bellevue, EE. UU.). Asimismo, se tomaron registros en Estrecho de Bransfield con el perfilador CTD. Adicionalmente, se descargaron y procesaron los datos físicoquímicos de Bahía Almirantazgo recolectados durante enero de 2020 en las 3 profundidades disponibles en el repositorio de PANGAEA (<https://doi.org/10.1594/PANGAEA.947909>) obtenidos por Osińska et al. (2023).

Análisis de fitoplancton

El análisis cualitativo se realizó aplicando técnicas particulares de observación microscópica de las estructuras. Para las diatomeas, limpiamos y teñimos las valvas (Battarbee 1986); para los dinoflagelados, teñimos los organismos con lugol o azul de metileno. Este análisis nos permitió determinar la frecuencia del fitoplancton $>75 \mu\text{m}$ y de las microalgas $<75 \mu\text{m}$ que quedaron atrapadas en la red durante el arrastre.

Los análisis cuantitativos se realizaron según la técnica de sedimentación de Utermöhl (Lund et al. 1958) y los resultados de la abundancia se expresaron en número de células por litro ($\text{cél}\cdot\text{L}^{-1}$). Cada muestra se homogenizó suavemente para luego colocar una submuestra en cilindros de sedimentación de 50 mL por un tiempo no menor a 48 h. Para identificar y contar los organismos abundantes con tallas $<20\ \mu\text{m}$, utilizamos un microscopio invertido (DM IL LED, Leica, Wetzlar, Germany) (aumento de $400\times$, área de $25\ \text{mm}^2$). Los organismos $>20\ \mu\text{m}$ y poco abundantes fueron contados en toda la cámara (aumento de $200\times$). En cada muestra, se contaron al menos 100 células a lo largo de los transectos de la cámara elegidos aleatoriamente.

Los taxones de fitoplancton se identificaron según las claves editadas por Frenguelli (1943), Balech (1944), Frenguelli y Orlando (1958), Balech (1976), Sourmia et al. (1979), Priddle y Fryxell (1985), Medlin y Priddle (1990), Round et al. (1990), Hasle y Syvertsen (1997) y Steidinger y Tangen (1997). Las diatomeas y dinoflagelados fueron identificados hasta el nivel de género o especie. Sin embargo, algunos organismos no pudieron ser identificados, como es el caso del grupo de pequeños flagelados, los cuales fueron agrupados y clasificados como nanoflagelados ($<20\ \mu\text{m}$).

Distancia al frente glaciar

La distancia media desde la estación de muestreo hasta los frentes glaciares con aporte de agua de deshielo directo se estableció usando la imagen satelital Sentinel-2 del 19 de enero de 2020. Se usó el software ArcGIS v10.7 para visualizar y procesar la imagen satelital. Se realizaron variaciones de las bandas usando la combinación RGB 482 para visualizar los flujos de sedimentos. Visualizando la información en formato *shapefile*, que delimita los contornos de los glaciares de la región antártica en forma de polígonos, identificamos las contribuciones de los frentes glaciares más cercanos. Utilizamos esta información para trazar y medir la distancia a cada estación.

Análisis estadístico

La composición y los análisis estadísticos se realizaron a partir de los datos del análisis cuantitativo de fitoplancton de las muestras de agua tomadas con las botellas Niskin. Los análisis estadísticos se realizaron en R v. 3.6.3 usando el paquete ‘vegan’ (Oksanen et al. 2018). Calculamos la abundancia relativa, el índice de Chao-1 (Chao), el índice de Shannon-Wiener (H') y el índice de equidad de Pielou (J) para cada profundidad y estación. Para los análisis multivariados, los datos de abundancia de fitoplancton ($\text{cél}\cdot\text{L}^{-1}$) se transformaron ($\log [x + 1]$). Se realizaron pruebas de normalidad de los datos de la abundancia transformada mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Para el análisis de similitud de asociaciones de fitoplancton entre estaciones, se aplicó el índice de Bray-Curtis. La matriz del índice de disimilitud generada fue sometida a un análisis de clasificación jerárquica (CLUSTER) o

a un análisis de conglomerados y se expresó en un dendrograma usando el método de promedio aritmético de los grupos de pares no ponderados (UPGMA). Las diferencias estadísticas entre los grupos formados del análisis de conglomerados se probaron mediante el análisis de varianza multivariante permutacional (PERMANDEVA), una prueba no paramétrica. Además, considerando los datos de las especies principales, se realizó un análisis de componentes principales usando Python en Google Colaboratory con la finalidad de conocer las diferencias estadísticas entre 2 componentes: las estaciones más cercanas y las más lejanas al glaciar. Con la información obtenida a partir del análisis de agrupamiento, se definieron grupos (conglomerados) para un análisis de porcentajes de similitud mediante un análisis SIMPER para identificar los taxones responsables de las diferencias entre los grupos. La relación entre la diversidad promedio (H') de especies y la distancia al frente glaciar, se evaluó mediante una prueba de regresión polinomial, la cual permitió determinar el mejor ajuste de los datos.

RESULTADOS

Condiciones hidrológicas y su relación con la distancia al frente glaciar

Los parámetros fisicoquímicos representativos de cada estación de la bahía se compilaron y se detallan en la Tabla 1. La temperatura superficial de las estaciones M01-M07 osciló entre $1.50\text{-}2.20\ ^\circ\text{C}$. Mientras que la temperatura fue ligeramente mayor en las estaciones M10 a M12, con valores entre $1.98\text{-}2.23\ ^\circ\text{C}$. La salinidad también aumentó de las estaciones cercanas M01-M06 ($32.80\text{-}33.10\text{‰}$) a las estaciones lejanas M07-M12 ($33.40\text{-}33.80\text{‰}$). Por el contrario, el oxígeno disuelto fue mayor en las estaciones cercanas (M01-M06) y disminuyó en las lejanas (M07-M12), con valores entre $11.22\text{-}11.39\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ y $7.68\text{-}11.25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente (Fig. 2). El comportamiento de la temperatura, la salinidad y el oxígeno disuelto en la columna de agua fue similar a 10 y 20 m, con ligeras variaciones en el nivel superficial.

Frecuencia de especies de fitoplancton

En las muestras de red predominaron las diatomeas *Porosira glacialis* (100%), *Corethron criophilum* (83.33%), *Licmophora antarctica* (83.33%), *Haslea trompii* (66.67%), *Fragilariopsis cylindrus* (50%) y *Thalassiosira antarctica* (50%). Entre los dinoflagelados, *Pronoctiluca pelágica* (66.67%) y *Gyrodinium* sp. (50%) fueron las especies más frecuentes (Fig. 3).

Composición y abundancia de fitoplancton

Se identificaron 33 especies: 24 diatomeas, 6 dinoflagelados y 3 nanoflagelados. La abundancia total del fitoplancton varió entre $6.09 \times 10^4\ \text{cél}\cdot\text{L}^{-1}$ y $10.15 \times 10^5\ \text{cél}\cdot\text{L}^{-1}$, dominada

en número por los nanoflagelados (<20 μm) (95.5%), seguida por las diatomeas (4.02%) y, por último, los dinoflagelados (0.47%). Con relación a las profundidades de 0, 10 y 20 m, la comunidad estuvo mayormente compuesta por los nanoflagelados (96.37%, 94.68% y 95.41%, respectivamente), seguido por las diatomeas (3.21%, 4.88% y 4.00%, respectivamente) y, finalmente, los dinoflagelados (0.42%, 0.45% y 0.59%, respectivamente). Los valores más altos de abundancia se registraron en las estaciones M08 y M09, mientras que, en términos de profundidad, la abundancia fue mayor en la superficie en comparación a 20 m (Fig. 4). La abundancia de diatomeas fue mayor en las estaciones más cercanas a la costa y al frente glaciario (M01-M06) y fue disminuyendo hacia las estaciones más lejanas (M07-M12); en cambio, las abundancias de dinoflagelados y nanoflagelados aumentaron en las estaciones M07-M09 y ligeramente disminuyeron en las estaciones M10-M12. La abundancia relativa (%) coloca en primer lugar a los nanoflagelados no identificados, seguido de *Leucocryptos marina* y *Pseudo-nitzschia* grupo *delicatissima* (15.83% y 3.49%, respectivamente) en relación con el total de las muestras (Fig. 5).

Riqueza y diversidad

El índice de diversidad de Shannon-Wiener (H'), en general, varió entre 0.07 (M05 a 0 m) y 1.04 bits·célula⁻¹ (M01 a 10 m); estos valores reflejan una baja diversidad debido a la dominancia de pocas especies. En la columna de agua, la diversidad fue mayor a una profundidad de 10 m y menor en la superficie, a excepción de la estación M12 que presentó

mayor diversidad en la superficie (Tabla 2). La riqueza de especies fue mayor en las estaciones M06 a 20 m y M01 a 0 m, con valores del índice de Chao-1 de 18 y 17, respectivamente. A 10 m en M01, se registró una mayor equitatividad en la distribución de las abundancias de las especies. Se evidenció que las estaciones cercanas a los glaciares (M01, M02, M03 y M6) presentaron índices de diversidad H' más altos en comparación con el punto más alejado M12 (Fig. 6a), con excepción de M04 y M05 que presentaron índices bajos y similares a M12. Este patrón era más evidente a profundidades de 10 m (Fig. 6c) y 20 m (Fig. 6d) en comparación con la superficie (Fig. 6b).

A lo largo de Bahía Almirantazgo, se identificaron especies comunes de aguas Antárticas como *T. antarctica*, *P.* grupo *delicatissima*, *C. criophilum*, *P. glacialis*, *H. trompii*, *Fragilariopsis kerguelensis*, *Gyrodinium lachryma* y *Gymnodinium* sp. (Tabla 3). En toda la columna de agua, la abundancia de diatomeas de la clase Bacillariophyceae fue mayor en las estaciones cercanas a los glaciares (M01-M06) y disminuyó entre las estaciones M07 y M12. En cambio, los dinoflagelados de las clases Dinophyceae y Noctilucophyceae (Fig. 7) mostraron un aumento en su abundancia entre las estaciones M07 y M12; tal es el caso de las especies *Gyrodinium* sp. (Fig. 5) y *P. pelagica*.

Similitud en la composición de la comunidad de fitoplancton

Para analizar la relación entre las estaciones, se aplicaron técnicas de conglomerados con los datos integrados

Tabla 1. Coordenadas y condiciones fisicoquímicas de las estaciones de muestreo, y su distancia a los frentes glaciares en la Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge, Antártida.

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Fecha de muestreo	Oxígeno disuelto (mg·L ⁻¹)	Temperatura (°C)	Salinidad (‰)	Distancia media al frente glaciario (km)
M01	58°24'54"	62°5'24"	19/01/2020	11.39	1.60	33.00	2.92
M02	58°26'24"	62°4'4.8"	19/01/2020	11.22	2.20	32.80	0.66
M03	58°28'30"	62°5'2.4"	18/01/2020	11.33	1.80	33.30	1.12
M04	58°26'56.4"	62°6'0"	18/01/2020	11.26	1.50	33.10	0.81
M05	58°28'8.4"	62°7'1.2"	17/01/2020	11.25	1.65	33.00	0.96
M06	58°28'22.8"	62°7'44.4"	17/01/2020	11.24	1.72	33.10	0.43
M07	58°26.370'	62°7.662'	16/01/2020	11.25	1.64	33.10	2.61
M08	58°24.357'	62°9.585'	16/01/2020	11.06	1.76	33.20	3.83
M09	58°22.118'	62°11.524'	15/01/2020	10.79	1.87	33.30	4.14
M10	58°22.088'	62°14.087'	15/01/2020	10.22	1.98	33.50	5.18
M11	58°28.617'	62°17.300'	14/01/2020	8.77	1.97	33.70	6.24
M12	58°36.683'	62°21.026'	14/01/2020	7.60	2.23	34.00	11.1

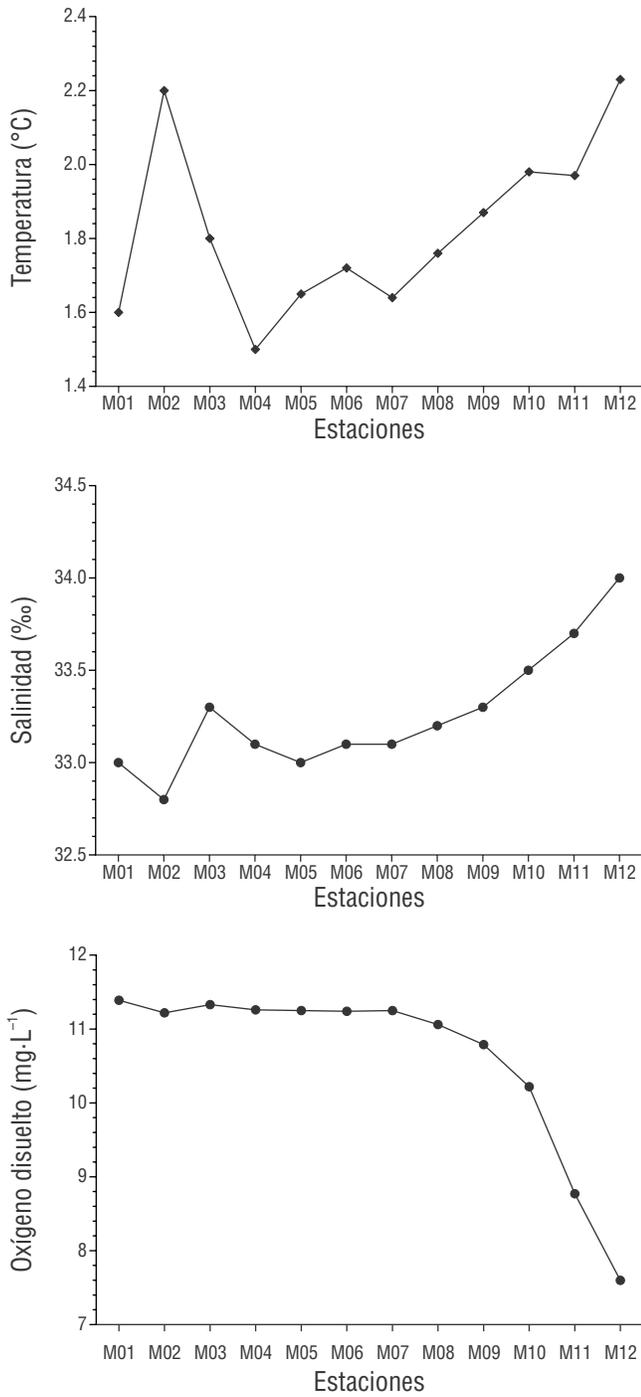


Figura 2. Temperatura, salinidad y oxígeno disuelto superficial (0 m) de las estaciones de muestreo en la Bahía Almirantazgo, durante el verano austral 2020.

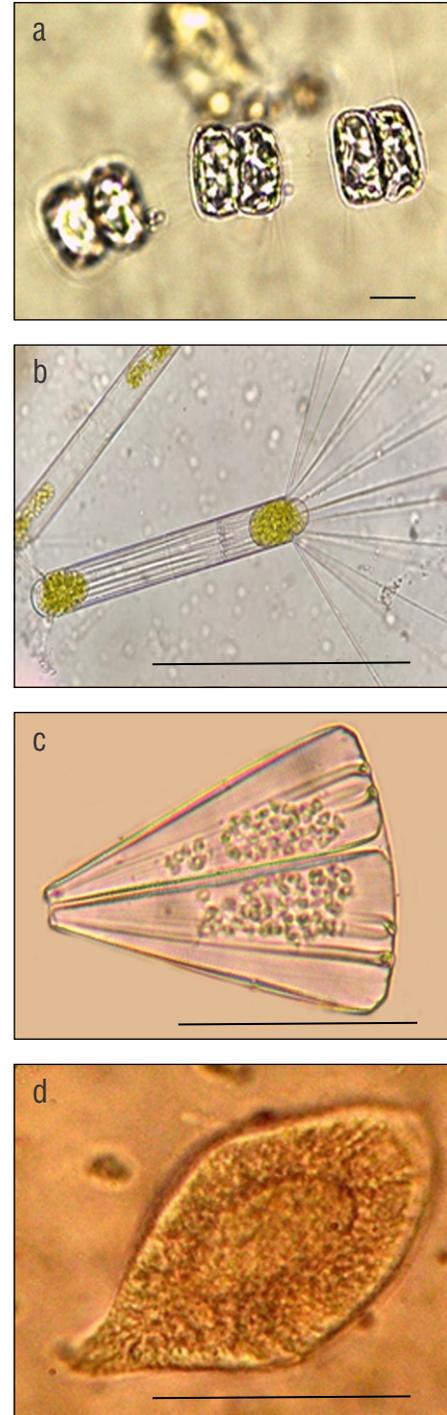


Figura 3. Especies de fitoplancton más frecuentes reportadas en la campaña ANTAR XXVII, verano austral 2020. (a) *Porosira glacialis*, (b) *Corethron criophilum*, (c) *Licmophora antarctica*, (d) *Gyrodinium* sp. (a) La barra de escala del microscopio óptico es de 10 μm , (b-d) la barra de escala del microscopio óptico es de 50 μm .

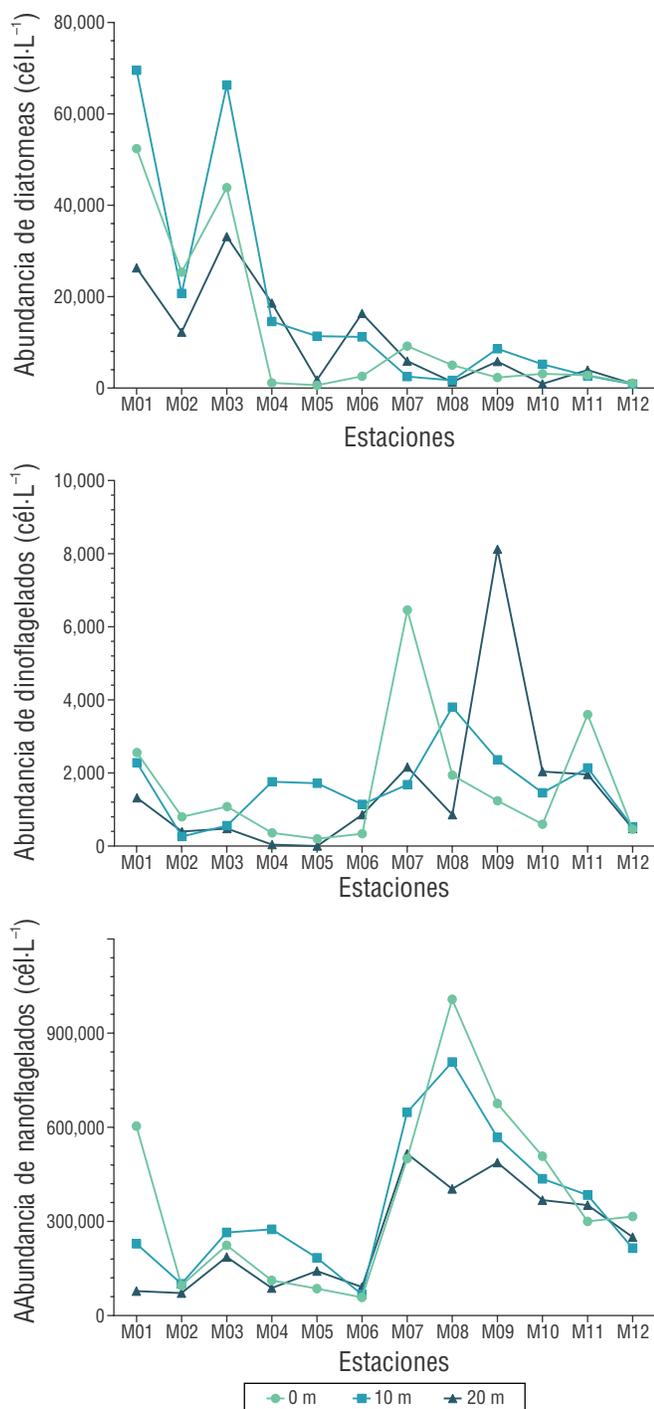


Figura 4. Abundancia de grupos de fitoplancton en las 12 estaciones de muestreo, y en la columna de agua durante el verano austral 2020, en la Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge.

de la abundancia de las 3 profundidades que posteriormente se representaron mediante un dendrograma. Con base en la composición y abundancia de las especies, se distinguen 3 conglomerados principales. En la Figura 8, se aprecia que el conglomerado “A” agrupó solo a la estación más

cercana a la costa (M01). El conglomerado “B” agrupó 6 estaciones lejanas (M07 a M12). El conglomerado “C” agrupó a 5 estaciones cercanas a los glaciares (M02 a M06). El análisis de PERMANDEVA entre estos conglomerados evidenció que existían diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los 3 conglomerados, siendo mayor entre “B” con “A” ($P = 0.001$) y “C” ($P = 0.001$) y menor entre “A” y “C” ($P = 0.018$).

El gráfico del análisis de componentes principales se realizó con las principales especies y estaciones de muestreo (Fig. 9). Se muestra la varianza explicada de los 2 componentes principales: el primer componente principal explica un 29.51% de la variación total de los datos originales y el segundo componente explica un 22.91%. Conjuntamente, los 2 componentes principales explican alrededor del 52.42% de la variación total (un porcentaje aceptable). Además, el análisis reveló 3 agrupaciones claras e iguales a las obtenidas por el análisis de conglomerados; sin embargo, se observó un grupo adicional integrado por una estación lejana. El primer grupo se compone de las estaciones cercanas M02, M03, M04, M05 y M06; el segundo de las 5 estaciones lejanas (M07, M08, M09, M10 y M11); el tercero de la estación M01, y el cuarto de la estación M12.

Contribución de las especies a la disimilitud media entre grupos

Los resultados del análisis SIMPER para evaluar las especies de fitoplancton que contribuyeron significativamente a la disimilitud entre los conglomerados generados (A, B y C) se muestran en la Tabla 4. Se evidencia que 9 especies contribuyeron con más del 50% de la disimilitud entre los conglomerados analizados, de las cuales *L. marina* y diferentes especies de diatomeas son las que contribuyeron más. La disimilitud entre el conglomerado A y B estuvo influenciada por la mayor contribución del nanoflagelado *L. marina* (3.29 %), seguida por las diatomeas *C. criophilum* (2.52%) y *F. cylindrus* (2.41%). En el caso de A y C, las diatomeas *T. antarctica* (2.91%), *H. trompii* (2.62%) y *F. cylindrus* (2.59%) fueron las más influyentes. Entre B y C, las especies que contribuyeron en mayor grado a la disimilitud fueron *L. marina* (5.26 %), *T. antarctica* (2.38%) y el dinoflagelado *Gyrodinium* sp. (2.35%).

Relación entre el índice de diversidad y la distancia al frente glaciario

Para establecer la relación entre la diversidad de especies (promedio de cada estación) y la distancia promedio al frente glaciario (Tabla 1), se realizaron regresiones lineales y polinomiales. El modelo que se ajustó mejor a los datos fue el polinomial de cuarto grado (Fig. 10a) con un coeficiente de determinación (R^2) de 35.40%. Este resultado refleja un aumento progresivo de la diversidad desde la costa, con

valores máximos a los 3-4 km del frente glaciar y valores más bajos en las estaciones más lejanas.

La estación M01 se encontraba más cerca de la costa, pero a una distancia mayor al glaciar próximo en comparación con las otras estaciones cercanas al frente glaciar, como la estación M02, que recibió aporte directo de los glaciares circundantes. Por otro lado, las estaciones M04 y M05 (cercanas a los glaciares) presentaron una disminución marcada de la diversidad con relación a las otras estaciones de la zona. Las fotografías aéreas de estas estaciones (Fig. 10b) mostraron que ambas presentaban grandes plumas de sedimentos en la capa superficial del agua que probablemente podrían haber afectado la abundancia en estas estaciones, a diferencia de las otras estaciones cercanas a estas. Por lo cual, se observaron variaciones de la diversidad en las estaciones cercanas

a glaciares (M01-M06) a medida que disminuía su distancia al glaciar, en cambio, para las estaciones lejanas, se observó un patrón más estable de la diversidad que disminuye conforme aumenta la distancia al glaciar.

DISCUSIÓN

En los últimos años, se han detectado cambios considerables en la estructura y biomasa de la comunidad de fitoplancton del Océano Austral (Deppeler y Davidson 2017). En particular, se ha evidenciado una frecuencia notable de floraciones de nanoflagelados, especialmente en las zonas costeras antárticas (Kopczyńska 2008, Pan et al. 2020, Jeon et al. 2023). La Antártida es uno de los lugares que sufre las tasas más altas de cambio climático y donde se han reportado eventos

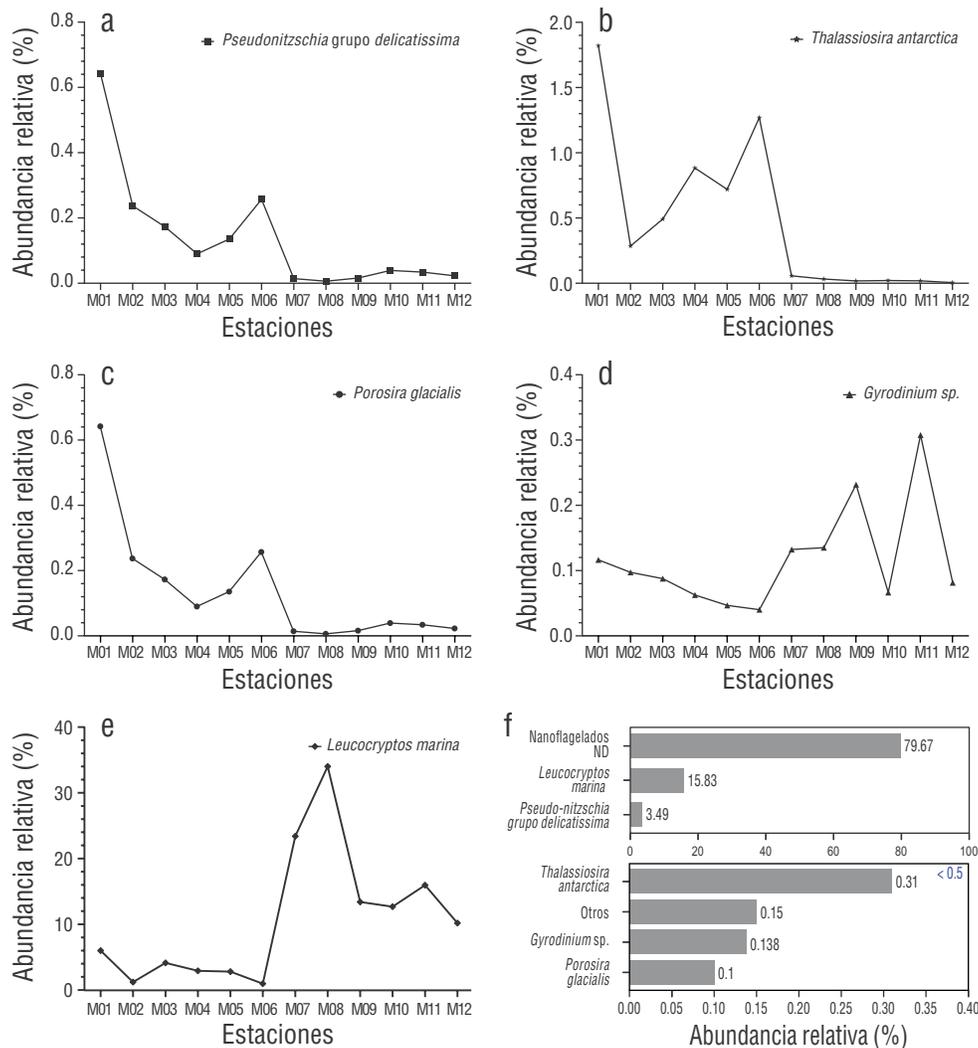


Figura 5. Abundancia relativa (%) de especies de fitoplancton del promedio de las tres profundidades (0, 10 y 20 m) durante el verano austral 2020, en la Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge. (a) *Pseudo-nitzschia grupo delicatissima*, (b) *Thalassiosira antarctica*, (c) *Porosira glacialis*, (d) *Gyrodinium sp.*, (e) *Leucocryptos marina*, (f) Abundancia relativa total de especies de fitoplancton. ND: no identificados.

Tabla 2. Abundancia (AB), índices de Chao-1 (Chao), diversidad de Shannon-Wiener (H') y de equidad de Pielou (J), registrados para la campaña ANTAR XXVII (verano austral 2020).

Estación	Profundidad											
	0 m				10 m				20 m			
	AB	Chao	H'	J	AB	Chao	H'	J	AB	Chao	H'	J
M01	658,960	17	0.58	0.2	300,840	16	1.04	0.38	105,640	14	0.87	0.33
M02	122,160	10	0.6	0.26	121,980	11	0.51	0.21	84,660	12	0.67	0.27
M03	268,960	10	0.52	0.23	331,880	11	0.77	0.32	220,660	12	0.68	0.27
M04	113,520	7	0.09	0.05	291,320	11	0.48	0.2	106,640	7	0.52	0.27
M05	86,820	8	0.07	0.03	197,280	15	0.5	0.18	143,800	10	0.21	0.09
M06	60,920	14	0.25	0.09	79,740	12	0.61	0.25	108,200	18	0.63	0.22
M07	515,660	10	0.54	0.23	652,200	12	0.64	0.26	524,080	9	0.69	0.32
M08	1,014,980	9	0.66	0.3	813,500	9	0.71	0.32	406,200	9	0.68	0.31
M09	679,560	13	0.41	0.16	578,960	12	0.6	0.24	501,940	13	0.44	0.17
M10	511,720	12	0.41	0.17	442,660	12	0.57	0.23	370,960	10	0.32	0.14
M11	306,400	11	0.56	0.23	388,820	9	0.61	0.28	357,920	11	0.4	0.17
M12	317,520	8	0.5	0.24	216,400	10	0.36	0.16	251,420	7	0.15	0.08

de temperaturas extremas (frío/calor) (Hobday et al. 2016). Estos eventos son los principales factores que provocan las olas de calor marinas (OCM) que afectan la estructura de las comunidades marinas en todos los niveles tróficos (Hobday et al. 2016, Smale et al. 2019). En Caleta Potter, ubicada también en Isla Rey Jorge, se reportaron OCM durante varios días en el verano austral de 2020. Estas condiciones generaron cambios en la biomasa de la mayoría de las especies de plancton, propiciando la dominancia de los nanoflagelados no identificados (Latorre et al. 2023). En este estudio realizado en Bahía Almirantazgo durante el verano austral de 2020, los nanoflagelados fueron numéricamente el grupo más abundante, lo que proporciona más evidencia de esta tendencia en la temporada de verano y que podría estar relacionado con los efectos de las OCM.

Además, resultados similares se reportaron por Baylón et al. (2019) en Ensenada Mackellar durante el verano austral de 2012 y por Ochoa et al. (2016) en Estrecho de Bransfield durante el verano austral de 2006. Asimismo, algunos reportes han evidenciado la dominancia durante todo el año de nanoflagelados sobre las diatomeas en Bahía Almirantazgo. Esta dominancia de los nanoflagelados se puede atribuir a la estabilidad de la columna de agua debido a la distribución casi homogénea de la temperatura y salinidad (Kopczyńska 2008, Baylón et al. 2019). Biggs et al. (2019) atribuyen la reducción de la biomasa total de fitoplancton y el cambio del fitoplancton grande (diatomeas) a las especies flageladas

más pequeñas, los cambios asociados con salinidades bajas, las temperaturas altas y la fuerte estratificación vertical. En el verano austral de 2020, observamos que los valores físico-químicos fueron casi uniformes en la columna de agua (hasta los 20 m de profundidad), permitiendo la proliferación y dominancia de nanoflagelados. Entre las especies de diatomeas más dominantes, identificamos *P. grupo delicatissima*, *P. glacialis* y *T. antarctica*. Este resultado concuerda con los reportes del verano austral de 2006 (Ochoa et al. 2016) y los veranos australes de 2012 y 2013 (Baylón et al. 2019).

En comparación con lo reportado en los veranos australes de 2012 y 2013 (Baylón et al. 2019), los valores de los índices de diversidad dentro de Ensenada Mackellar (M01, M02, M03 y M04) fueron menores a las que se han reportado para estaciones relativamente cercanas (E03, E09 y E11) (Fig. 1). Esto es debido principalmente a la abundancia de nanoflagelados (<20 μm), en comparación con los otros años. Además, se observa que la salinidad del mar varió entre 34 a 34.51‰ durante el verano de 2012 y varió entre 33.69 a 34.04‰ durante el verano de 2013; estos valores son superiores a los del verano de 2020 (32.80 y 33.10‰). Esto nos sugiere una disminución de la salinidad durante casi una década en zonas puntuales de Ensenada Mackellar. Este cambio en la salinidad podría estar asociado al mayor aporte de agua dulce a causa del retroceso glaciario que podría haber favorecido el aumento de la temperatura y las OCM reportado para el verano de 2020 (Latorre et al. 2023). La escorrentía de agua de deshielo puede

generar cambios en la temperatura del mar y el contenido de materia orgánica disuelta y un aumento de los valores de pH, turbidez y oxígeno disuelto, los cuales han sido reportados en otros fiordos en Bahía Almirantazgo (Osińska et al. 2021). Estos cambios podrían haber favorecido que las especies nanoflageladas aprovechen este nuevo hábitat y se vuelvan

más comunes durante el verano, lo cual podría intensificarse a medida que se incremente la escorrentía de los glaciares.

De los 3 conglomerados formados, uno agrupó a las estaciones lejanas (>3 km), indicando que presentan composiciones similares de fitoplancton, el cual fue corroborado con el análisis previo de PERMANDEVA ($P < 0.05$). Por otro lado, se evidenció que la estación M01, la más cercana a la

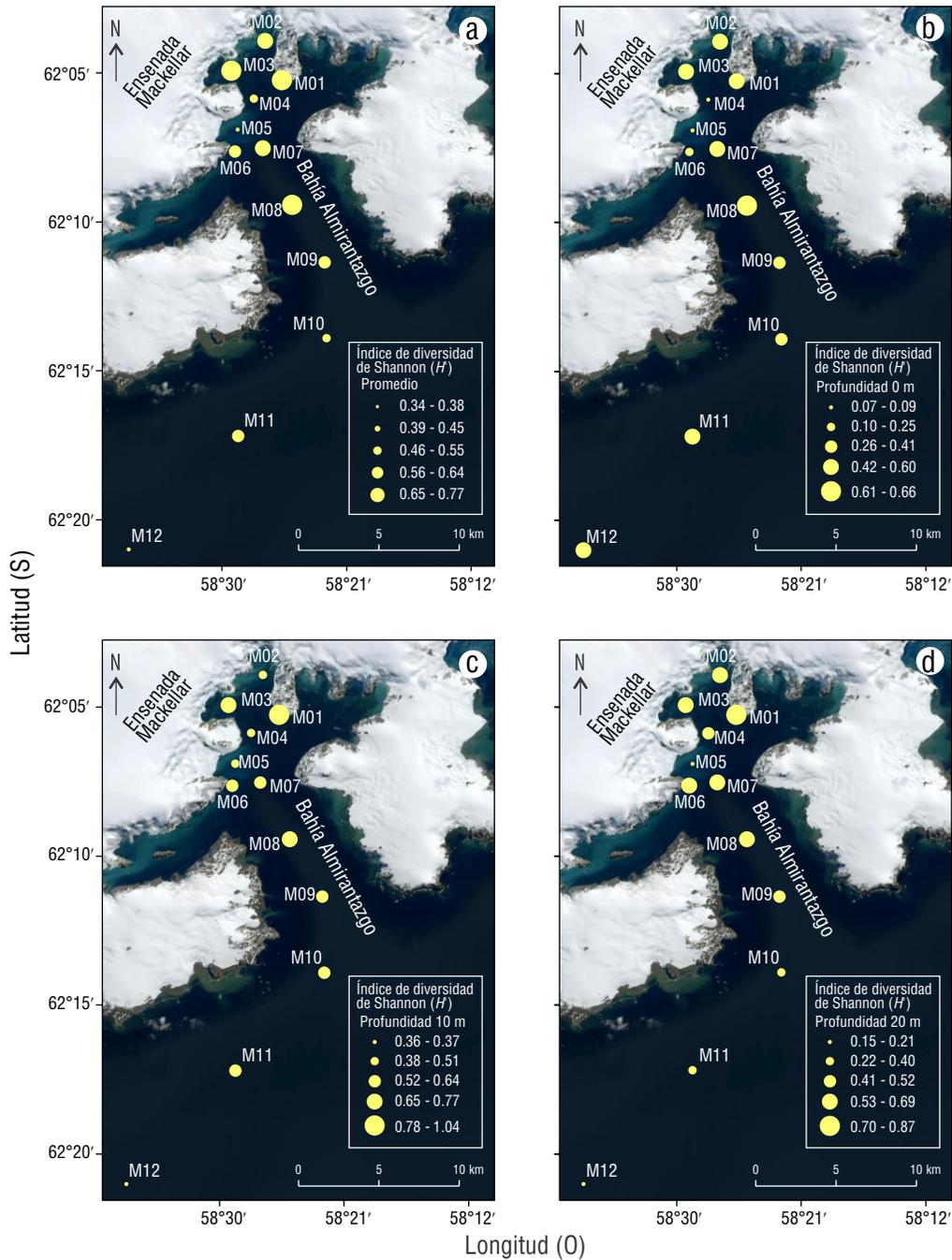


Figura 6. Índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') en la columna de agua (0 m, 10 m y 20 m), registrados para la campaña ANTAR XXVII (verano austral 2020). (a) Índice de diversidad de los datos integrados de cada estación, (b) índice de diversidad a nivel superficial (profundidad 0 m), (c) índice de diversidad a una profundidad de 10 m, (d) índice de diversidad a una profundidad de 20 m.

Tabla 3. Lista de especies de diatomeas, dinoflagelados y nanoflagelados a 3 profundidades en la Bahía Almirantazgo, durante el verano austral 2020.

Código	Especie	Grupo	Profundidad		
			0 m	10 m	20 m
Sp1	<i>Achnanthes brevipes</i>	Diatomeas pennadas	X		
Sp2	<i>Chaetoceros concavicornis</i>	Diatomeas céntricas			X
Sp3	<i>Cocconeis pinnata</i>	Diatomeas céntricas	X	X	X
Sp4	<i>Cocconeis</i> sp.	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp5	<i>Corethron criophilum</i>	Diatomeas céntricas	X	X	X
Sp6	<i>Coscinodiscus</i> sp.	Diatomeas céntricas	X		X
Sp7	<i>Eucampia antarctica</i>	Diatomeas céntricas		X	X
Sp8	<i>Fragilariopsis cylindrus</i>	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp9	<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp10	<i>Gyrosigma fasciola</i>	Diatomeas pennadas			X
Sp11	<i>Haslea trompii</i>	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp12	<i>Licmophora antarctica</i>	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp13	<i>Licmophora</i> sp.	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp14	<i>Navicula</i> sp.	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp15	<i>Navicula directa</i>	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp16	<i>Nitzschia</i> sp.	Diatomeas pennadas			X
Sp17	<i>Pleurosigma</i> sp.	Diatomeas pennadas		X	
Sp18	<i>Porosira glacialis</i>	Diatomeas céntricas	X	X	X
Sp19	<i>Pseudo-nitzschia grupo delicatissima</i>	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp20	<i>Rhizosolenia truncata</i>	Diatomeas céntricas		X	
Sp21	<i>Thalassiosira antarctica</i>	Diatomeas céntricas	X	X	X
Sp22	<i>Thalassiosira</i> sp.	Diatomeas céntricas		X	
Sp23	<i>Tripterion margaritae</i>	Diatomeas pennadas	X	X	X
Sp24	<i>Tropidoneis antarctica</i>	Diatomeas céntricas			X
Sp25	<i>Amphidinium</i> sp.	Dinoflagelados sin armaduras		X	
Sp26	<i>Gymnodinium</i> sp.	Dinoflagelados sin armadura	X	X	X
Sp27	<i>Gyrodinium</i> sp.	Dinoflagelados sin armadura	X	X	X
Sp28	<i>Gyrodinium lachryma</i>	Dinoflagelados sin armadura	X	X	X
Sp29	<i>Pronoctiluca pelagica</i>	Dinoflagelados sin armadura	X	X	X
Sp39	<i>Protoberidinium defectum</i>	Dinoflagelados blindados		X	X
Sp31	<i>Leucocryptos marina</i>	Otros	X	X	X
Sp32	<i>Tetraselmis</i> sp.	Otros		X	
Sp33	Nanoflagelados no identificados	Otros (fitoflagelados)	X	X	X

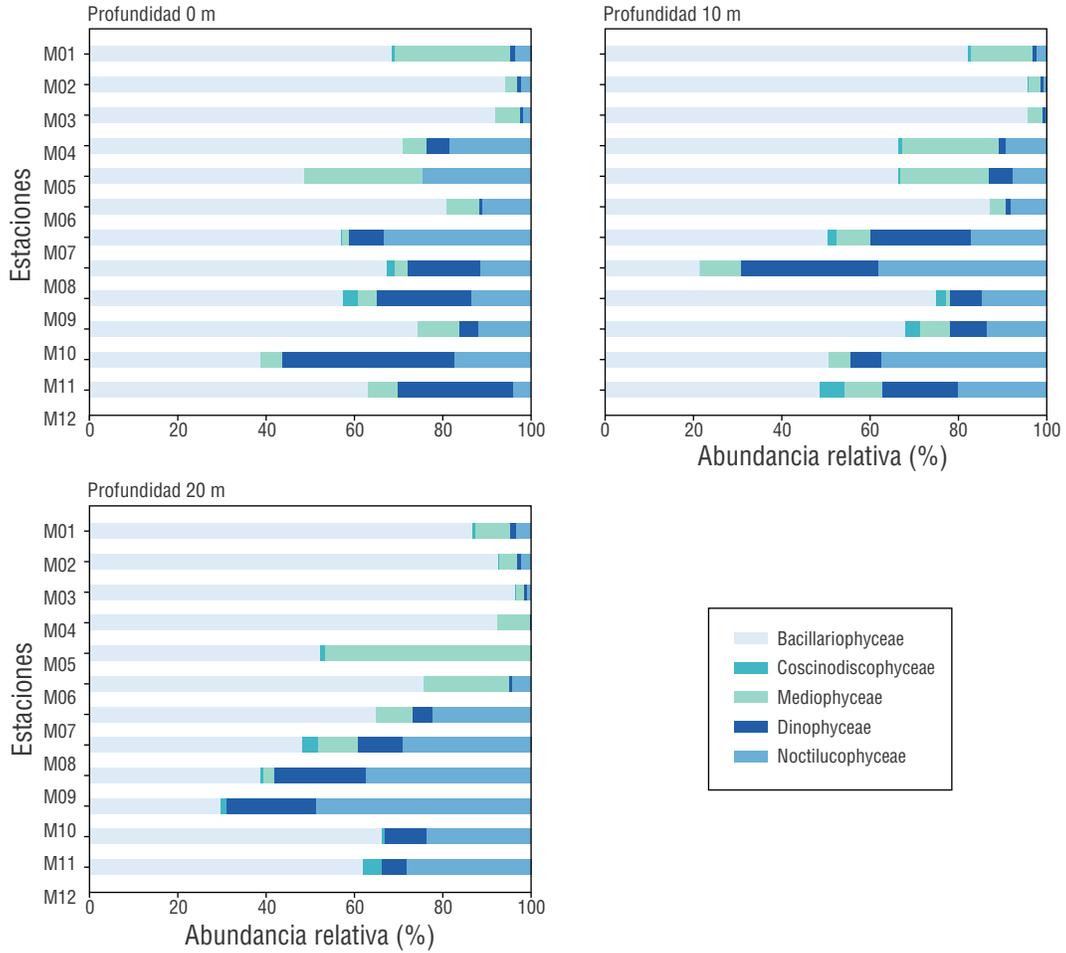


Figura 7. Abundancia relativa de clases de diatomeas y dinoflagelados en las 3 profundidades, durante la campaña científica ANTAR XXVII (verano austral 2020), en la Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge.

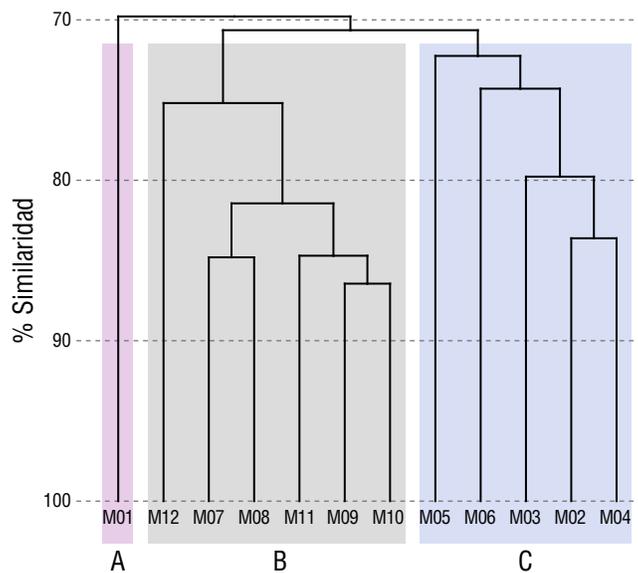


Figura 8. Análisis de la comunidad de fitoplancton en las estaciones de muestreo. Dendrograma de similitud de la comunidad de fitoplancton en todas las estaciones de muestreo.

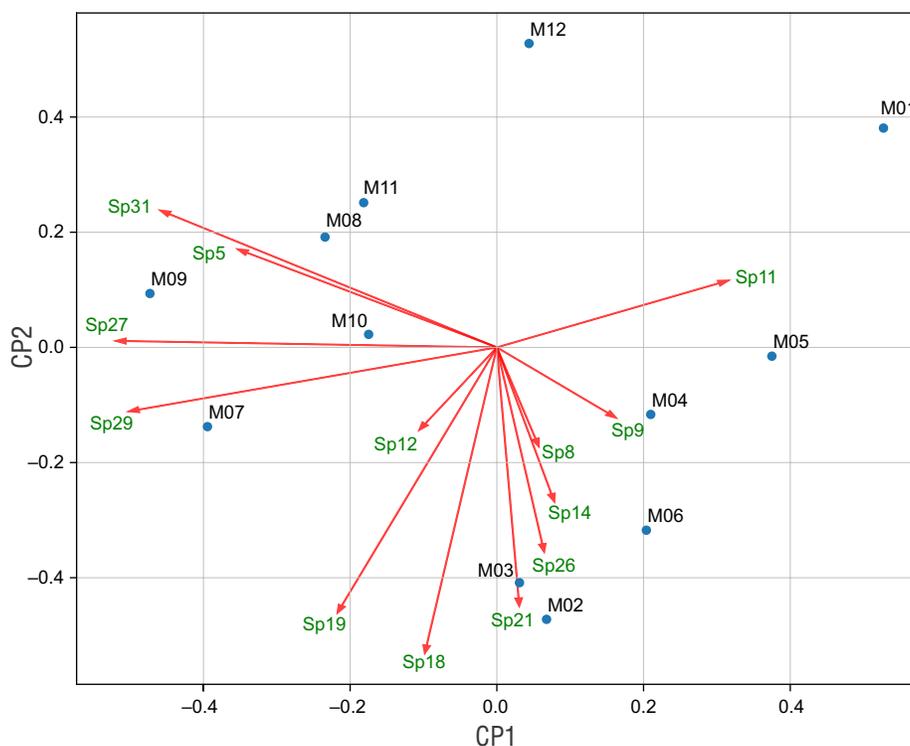


Figura 9. Análisis de componentes principales (ACP) de las principales especies de fitoplancton en las 12 estaciones de muestreo, durante el verano austral 2020, en la Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge.

Tabla 4. Resultado del análisis SIMPER para la contribución de especies a la disimilitud entre los conglomerados generados (A, B y C).

Species	A-B		A-C		B-C	
	%PROM	%CUM	%PROM	%CUM	%PROM	%CUM
<i>Leucocryptos marina</i>	3.29	9.24	-	-	5.26	14.65
<i>Corethron criophilum</i>	2.52	16.3	1.61	51.62	1.91	33.14
<i>Fragilariopsis cylindrus</i>	2.41	23.07	2.59	25.14	-	-
<i>Haslea tropsii</i>	2.32	29.57	2.62	17.14	1.49	46.34
<i>Thalassiosira antarctica</i>	1.84	34.72	2.91	9.02	2.38	21.28
<i>Licmophora antarctica</i>	1.67	39.41	1.62	46.63	1.68	37.83
<i>Gymnodinium</i> sp.	1.65	44.04	1.74	36.51	-	-
<i>Gyrodinium</i> sp.	1.61	48.55	-	-	2.35	27.82
<i>Navicula</i> sp.	1.53	52.84	-	-	-	-
<i>Porosira glacialis</i>	-	-	1.93	31.12	1.47	50.44
<i>Pseudo-nitzschia grupo delicatissima</i>	-	-	1.65	41.62	1.44	54.45
<i>Fragilariopsis kerguelensis</i>	-	-	1.6	56.57	-	-
<i>Pronoctiluca pelagica</i>	-	-	-	-	1.57	42.2

%PROM = Porcentaje de contribución promedio; %CUM = Porcentaje de contribución acumulada.

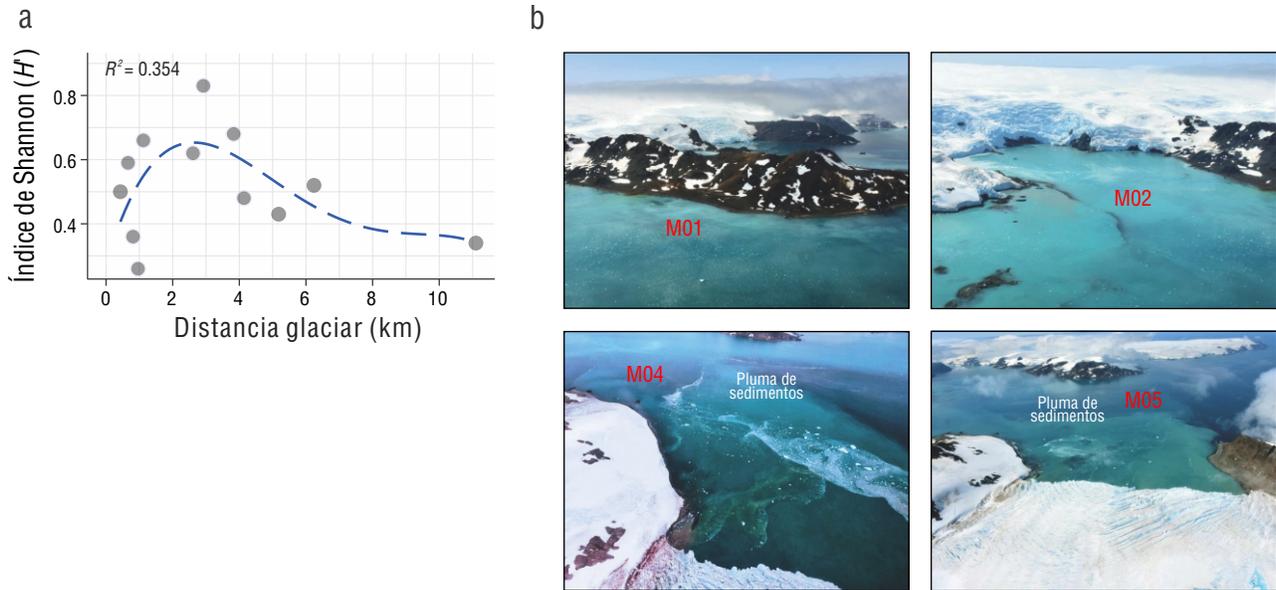


Figura 10. Influencia de la distancia glaciar en la diversidad de fitoplancton. **(a)** Relación entre la distancia media del frente glaciar a las estaciones y el promedio de la diversidad Shannon-Wiener, **(b)** fotos aéreas de las estaciones de muestreo de fitoplancton de la zona interna: M01, M02, M04 y M05.

costa, presentó una pequeña diferencia en la composición de fitoplancton en comparación con las otras estaciones cercanas al glaciar (<3 km). Esta diferencia probablemente se debe al aporte del agua con arrastre del material terrígeno, ya que no se encuentra en contacto directo con el glaciar. Estas diferencias en la composición de fitoplancton entre las estaciones cercanas a la costa y lejanas de esta se han observado alrededor de la Península Antártica, donde las comunidades cercanas a las costas están dominadas en su mayoría por diatomeas bentónicas o pelágicas y presentan altas concentraciones de *Cla*, y en áreas de mar abierto donde los nanoflagelados reemplazan a las diatomeas en las comunidades (Mendes et al. 2012, Lange et al. 2018). En los últimos años, cabe mencionar que se ha observado un cambio en el predominio de los grupos taxonómicos del fitoplancton en las zonas costeras, desde las diatomeas a los fitoflagelados (Lange et al. 2014, 2018), lo que sugiere cambios marcados en la columna de agua.

La abundancia y riqueza de especies fueron muy bajas en las estaciones M04 y M05; estos resultados pueden deberse a la gran pluma de sedimentos turbios provenientes de los glaciares que fue evidente en las fotografías aéreas de las estaciones (Fig. 10b). La erosión subglaciar y superficial progresiva durante las temporadas de deshielo genera columnas de sedimento extensas, principalmente en áreas costeras y glaciares (Monien et al. 2017). El transporte superficial de sedimentos erosionados produce efectos de sombra que afectan a los productores primarios (Pan et al. 2020). Se han documentado que los nanoflagelados generalmente dominan numéricamente en áreas de condiciones de luz atenuada (Kopczynska 1992), en cambio, las diatomeas presentan crecimiento limitado ante esas condiciones de luz (El-Sayed

1978); esta limitación se vio reflejado en las estaciones de menor diversidad donde los valores más bajos de abundancia de diatomeas eran evidentes en la superficie. No obstante, algunas diatomeas pueden estar adaptadas y ser competitivas ante tales condiciones (Biggs et al. 2022), por lo tanto, para poder comprender mejor las causas de la baja diversidad en las estaciones mencionadas, se requerirá profundizar el estudio en diferentes periodos.

En particular, se observó una importante contribución de *F. cylindrus* en el conglomerado A, que incluye a la estación más cercana a la costa, lo cual es consistente con su asociación con aguas de deshielo y condiciones estratificadas, como se ha documentado en la literatura (Hegseth y Von Quillfeldt 2002, von Quillfeldt 2004, Allen y Weich 2022). Además, la presencia de *T. antarctica* es representativa en el conglomerado C, correspondiente a las estaciones cercanas a los glaciares; esta especie se asocia con aguas adyacentes al hielo marino y a las plataformas de hielo (Garrison 1991, Gleitz et al. 1996, Kang et al. 2001, Allen y Weich 2022). Por otro lado, el conglomerado B, que agrupa las estaciones lejanas a los glaciares, se caracteriza por una mayor representación de nanoflagelados, especialmente *L. marina*. Esta alga ha sido reportada como una especie representativa de las comunidades de nanoflagelados predominantes en Estrecho de Bransfield, Isla Elefante, en diferentes veranos australes (Sánchez y Villanueva 2001, Espino et al. 2016, Ochoa et al. 2016). La relación entre la proximidad de los glaciares con respecto a la diversidad presentó un comportamiento polinomial, donde la diversidad presentó un aumento gradual hasta los 3-4 km, a excepción de 2 estaciones de baja diversidad (M01 y M05). El aumento gradual de la diversidad en los primeros 4 km puede

deberse a los nutrientes y metales (hierro biodisponible) liberados por la escorrentía glaciaria que permite la proliferación de ciertas especies de fitoplancton (Arimitsu et al. 2012, Monien et al. 2017). Los nutrientes también pueden estar más concentrados en las aguas de las ensenadas debido a posibles afloramientos (Robakiewicz y Rakusa-Suszczewski 1999) o la mezcla de agua vertical a lo largo de los umbrales de las ensenadas (Etherington et al. 2007).

En 2 sistemas contrastantes (Caleta Potter y Bahía Esperanza) en la Península Antártica se han observado cambios notables en las comunidades de plancton por efecto del agua de deshielo de los glaciares que modifica las características físico-químicas e hidrológicas de la columna de agua (García et al. 2019). Se observó una red trófica microbiana predominante en los sitios cercanos a los glaciares debido a la disminución de la salinidad y estratificación de la columna de agua, lo cual favoreció el desarrollo de pequeñas algas eucariotas. Asimismo, un estudio ecológico durante diciembre de 2015 y abril de 2016 en Bahía Andvord, ubicada en la Península Antártica Occidental, evidenció que la abundancia total de fitoplancton en todo el periodo de estudio presentó una correlación positiva con el agua de deshielo de los glaciares (Pan et al. 2020). Además, confirmó que los flagelados pueden ser el taxón dominante en las aguas cercanas a la costa antártica, lo cual concuerda con lo observado en Bahía Almirantazgo. Estos cambios también alteran las condiciones del hábitat (aumento de partículas en suspensión y disminución de la salinidad) y la calidad de los alimentos disponibles (cambio a pequeñas células de fitoplancton), afectando así la estructura y dinámica del micro y mesozooplancton (Fuentes et al. 2016; García et al. 2016, 2019).

DECLARACIONES FINALES

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a Wilson Carhuapoma Bernabé del Instituto del Mar del Perú por la información complementaria brindada de los parámetros físico-químicos y al Ministerio de Relaciones Exteriores y el Ministerio de Defensa del Perú, por la logística y transporte a la Antártida en la Expedición ANTAR XXVII.

Fondos

Esta investigación fue financiada por el Proyecto CONCYTEC–Banco Mundial: “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE a través de su unidad ejecutora FONDECYT [Contrato N°03-2018-FONDECYTBM-IADT-AV] del Proyecto PantBioGlaciaria y por el Proyecto IAT-Glaciaria [RCUR-703-2022-UNASAM].

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Contribuciones de autor

KM: Conceptualización; Investigación; Metodología; Escritura-Preparación del borrador original; Redacción-revisión y edición. EL: Conceptualización; Investigación; Metodología; Redacción-revisión y edición. SRV: Curación de datos; Investigación; Análisis Formal; Escritura-Preparación del borrador original; Redacción-revisión y edición. MB: Investigación; Redacción-revisión y edición. PT: Adquisición de fondos; Administración de proyecto; Redacción-revisión y edición.

Disponibilidad de datos

Se pueden obtener los datos para este estudio a través del autor de correspondiente bajo petición razonable.

Uso de herramientas de IA

Los autores no utilizaron herramientas de IA para este trabajo.

REFERENCIAS

- Allen CS, Weich ZC. 2022. Variety and distribution of diatom-based sea ice proxies in antarctic marine sediments of the past 2000 years. *Geosci.* 12(8):282. <https://doi.org/10.3390/geosciences12080282>
- Arimitsu ML, Piatt JF, Madison EN, Conaway JS, Hillgruber N. 2012. Oceanographic gradients and seabird prey community dynamics in glacial fjords. *Fish Oceanogr.* 21(2–3):148-169. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2012.00616.x>
- Bae H, Ahn IY, Park J, Song SJ, Noh J, Kim H, Khim JS. 2021. Shift in polar benthic community structure in a fast retreating glacial area of Marian Cove, West Antarctica. *Sci Rep.* 11(1):1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80636-z>
- Balech E. 1944. Contribucion al conocimiento del plancton de Lennox y Cabo de Hornos. *Physis.* 19:423-446.
- Balech E. 1976. Illustrated Key to Antarctic Dinoflagellates. *Publ Inst Antártico Argentino.* 11:1-99.
- Battarbee RW. 1986. Diatom analysis. In: Berglund BE (eds.), *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology.* Chichester (UK): Wiley. p. 527-570.
- Baylón M, Hernández-Becerril D, Indacochea A, Purca S. 2019. Variabilidad espacio-temporal del fitoplancton de la ensenada Mackellar, Bahía Almirantazgo, Isla Rey Jorge, Antártida, durante el verano austral 2012/2013. *Rev Biol Mar Oceanogr.* 54(2):151-165. <https://doi.org/10.22370/rbmo.2019.54.2.1809>
- Bianchi F, Boldrin A, Cioce F, Dieckmann G, Kuosa H, Larsson AM, Nöthig E-M, Sehlstedt P-I, Socal G, Syvertsen EE. 1992. Phytoplankton distribution in relation to sea ice, hydrography and nutrients in the northwestern Weddell Sea in early spring 1988 during EPOS. *Polar Biol.* 12:225-235. <https://doi.org/10.1007/BF00238264>
- Biggs TEG, Alvarez-Fernandez S, Evans C, Mojica KDA, Rozema PD, Venables HJ, Pond DW, Brussaard CPD. 2019. Antarctic phytoplankton community composition and size structure: importance of ice type and temperature as regulatory factors. *Polar Biol.* 42(11):1997-2015. <https://doi.org/10.1007/s00300-019-02576-3>
- Biggs TEG, Rozema PD, Evans C, Timmermans KR, Meredith MP, Pond DW, Brussaard CPD. 2022. Control of Antarctic

- phytoplankton community composition and standing stock by light availability. *Polar Biol.* 45(11):1635-1653.
<https://doi.org/10.1007/s00300-022-03094-5>
- Bonicelli PJ, López PD, Ochoa LN, Shreeve RL. 2008. Fitoplancton y las masas de agua del estrecho de Bransfield y la Isla Elefante durante el verano austral del 2006 zooplankton community structure and its association with the phytoplankton and water masses from the Bransfield Strait and Elephant Island Du. *Ecol Apl.* 7.
- Bown J, Van Haren H, Meredith MP, Venables HJ, Laan P, Brearley JA, de Baar HJW. 2018. Evidences of strong sources of DFe and DMn in Ryder Bay, Western Antarctic Peninsula. *Philos Trans R Soc A Math Phys Eng Sci.* 376(2122).
<https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0172>
- Boyd PW, Jickells T, Law CS, Blain S, Boyle EA, Buesseler KO, Coale KH, Cullen JJ, De Baar HJW, Follows M, et al. 2007. Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: Synthesis and future directions. *Science.* 315(5812):612-617.
<https://doi.org/10.1126/science.1131669>
- Brearley JA, Meredith MP, Naveira Garabato AC, Venables HJ, Inall ME. 2017. Controls on turbulent mixing on the West Antarctic Peninsula shelf. *Deep Res Part II Top Stud Oceanogr.* 139(2017):18-30.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jdsr.2017.02.011>
- Cermeño P, Teixeira IG, Branco M, Figueiras FG, Marañón E. 2014. Sampling the limits of species richness in marine phytoplankton communities. *J Plankton Res.* 36(4):1135-1139.
<https://doi.org/10.1093/plankt/fbu033>
- Deppeler SL, Davidson AT. 2017. Southern ocean phytoplankton in a changing climate. *Front Mar Sci.* 4(FEB).
<https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00040>
- Ducklow HW, Baker K, Martinson DG, Quetin LB, Ross RM, Smith RC, Stammerjohn SE, Vernet M, Fraser W. 2007. Marine pelagic ecosystems: The West Antarctic Peninsula. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 362(1477):67-94.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1955>
- Espino M, Ayón P, Cornejo R, Alarcón J, Vásquez L, Quiñones J, Chang F, Goya E, Villegas P, Velasco F, et al. 2016. Ecosistema marino del Estrecho de Bransfield, Bahía Almirantazgo y alrededores de las Islas Joinville y Elefante. *ANTAR XXII, 2014. Boletín Inst del Mar del Perú.* 31(2):229-294.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29957.96487>
- Estrada M, Delgado M. 1990. Summer phytoplankton distributions in the Weddell Sea. *Polar Biol.* 10(6):441-449.
<https://doi.org/10.1007/BF00233692>
- Etherington LL, Hooge PN, Hooge ER, Hill DF. 2007. Oceanography of Glacier Bay, Alaska: Implications for biological patterns in a glacial fjord estuary. *Estuaries Coasts.* 30(6):927-944.
<https://doi.org/10.1007/BF02841386>
- Freguelli J. 1943. XVIII Contribución al conocimiento de las diatomeas argentinas. *Diatomeas de las Orcadas del Sur. Rev del Mus La Plata Nueva Ser Sección Botánica.* 5(21):221-265.
- Freguelli J, Orlando HA. 1958. Diatomeas y Silicoflagelados del Sector Antártico Sudamericano. *Pub N° 5. Buenos Aires (Argentina): Inst Antártico Argentino.* 13-191 p.
- Fuentes V, Alurralde G, Meyer B, Aguirre GE, Canepa A, Wöfl AC, Hass HC, Williams GN, Schloss IR. 2016. Glacial melting: An overlooked threat to Antarctic krill. *Sci Rep.* 6(December 2015):1-12.
<http://dx.doi.org/10.1038/srep27234>
- García MD, Fernández Severini MD, Spetter C, López Abbate MC, Tartara MN, Nahuelhual EG, Marcovecchio JE, Schloss IR, Hoffmeyer MS. 2019. Effects of glacier melting on the planktonic communities of two Antarctic coastal areas (Potter Cove and Hope Bay) in summer. *Reg Stud Mar Sci.* 30:100731.
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100731>
- García MD, Hoffmeyer MS, López-Abbate MC, Barría de Cao MS, Pettigrosso RE, Almandoz GO, Hernandez MP, Schloss IR. 2016. Micro- and mesozooplankton responses during two contrasting summers in a coastal Antarctic environment. *Polar Biol.* 39(1):123-137.
<https://doi.org/10.1007/s00300-015-1678-z>
- Garrison DL. 1991. Antarctic sea ice biota. *Integr Comp Biol.* 31(1):17-34.
<https://doi.org/10.1093/icb/31.1.17>
- Glantz M, Grossmann S, Scharekm R, Smetacek V. 1996. Ecology of diatom and bacterial assemblages in water associated with melting summer sea ice in the Weddell Sea, Antarctica. *Antarct Sci.* 8(2):135-146.
<https://doi.org/10.1017/s095410209600020x>
- Hasle GR, Syvertsen EE. 1997. Marine Diatoms. In: *Identifying Marine Phytoplankton.* San Diego (USA): Academic Press. p. 5-385.
- Hegseth EN, Von Quillfeldt CH. 2002. Low phytoplankton biomass and ice algal blooms in the Weddell Sea during the ice-filled summer of 1997. *Antarct Sci.* 14(3):231-243.
<https://doi.org/10.1017/s095410200200007x>
- Hobday AJ, Alexander LV, Perkins SE, Smale DA, Straub SC, Oliver ECJ, Benthuisen JA, Burrows MT, Donat MG, Feng M, et al. 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog Oceanogr.* 141:227-238.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>
- Jeon M, Iriarte JL, Yang EJ, Park J, Alves-de-Souza C, Park SJ. 2023. Importance of nanophytoplankton biomass during summer 2019 in a retreating marine-terminating glacier-fjord system, Marian Cove, West Antarctica (62°S). *Front Mar Sci.* 10(August):1-17.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1174722>
- Kang SH, Kang JS, Lee S, Chung KH, Kim D, Park MG. 2001. Antarctic phytoplankton assemblages in the marginal ice zone of the northwestern Weddell Sea. *J Plankton Res.* 23(4):333-352.
<https://doi.org/10.1093/plankt/23.4.333>
- Kasyan VV, Bitiutskii DG, Mishin AV, Zuev OA, Murzina SA, Sapozhnikov PV, Kalinina OY, Syomin VL, Kolbasova GD, Voronin VP, et al. 2022. Composition and Distribution of Plankton Communities in the Atlantic Sector of the Southern Ocean. *Diversity.* 14(11).
<https://doi.org/10.3390/d14110923>
- Kim DU, Khim JS, Ahn IY. 2021. Patterns, drivers and implications of ascidian distributions in a rapidly deglaciating fjord, King George Island, West Antarctic Peninsula. *Ecol Indic.* 125(February):107467.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107467>
- Knox GA. 2007. *Biology of the Southern Ocean.* 2nd ed. Boca Raton (USA): CRC Press. 621 p.
- Kopczynska EE. 1992. Dominance of microflagellates over diatoms in the Antarctic areas of deep vertical mixing and krill concentrations. *J Plankton Res.* 14(8):1031-1054.
<https://doi.org/10.1093/plankt/14.8.1031>
- Kopczyńska EE. 2008. Phytoplankton variability in Admiralty Bay, King George Island, South Shetland Islands: Six years of monitoring. *Polish Polar Res.* 29(2):117-139.
- Lange PK, Ligowski R, Tenenbaum DR. 2018. Phytoplankton in the embayments of King George Island (Antarctic Peninsula): a review with emphasis on diatoms. *Polar Rec (Gr Brit).* 54(2):158-175.
<https://doi.org/10.1017/S0032247418000232>
- Lange PK, Tenenbaum DR, Tavano VM, Paranhos R, De Siqueira Campos L. 2014. Shifts in microphytoplankton species and cell size at Admiralty Bay, Antarctica. *Antarct Sci.* 27(3):225-239.
<https://doi.org/10.1017/S0954102014000571>

- Latorre MP, Iachetti CM, Schloss IR, Antoni J, Malits A, de la Rosa F, De Troch M, Garcia MD, Flores-Melo X, Romero SI, et al. 2023. Summer heatwaves affect coastal Antarctic plankton metabolism and community structure. *J Exp Mar Bio Ecol.* 567(October):20-25.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2023.151926>
- De Lima DT, Moser GAO, Piedras FR, da Cunha LC, Tenenbaum DR, Tenório MMB, de Campos MVPB, Cornejo T de O, Barrera-Alba JJ. 2019. Abiotic changes driving microphytoplankton functional diversity in Admiralty Bay, King George Island (Antarctica). *Front Mar Sci.* 6(OCT):1-17.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00638>
- Lund JWG, Kipling C, Le Cren ED. 1958. The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. *Hydrobiologia.* 11(2):143-170.
<https://doi.org/10.1007/BF00007865>
- Medlin L, Priddle J. 1990. *Polar Marine Diatoms.* Cambridge (UK): British Antarctic Survey. 214 p.
- Mendes CRB, de Souza MS, Garcia VMT, Leal MC, Brotas V, Garcia CAE. 2012. Dynamics of phytoplankton communities during late summer around the tip of the Antarctic Peninsula. *Deep Res Part I Oceanogr Res Pap.* 65:1-14.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.03.002>
- Moline MA, Claustre H, Frazer TK, Schofield O, Vernet M. 2004. Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend. *Glob Chang Biol.* 10(12):1973-1980.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00825.x>
- Monien D, Monien P, Brünjes R, Widmer T, Kappenberg A, Silva Busso AA, Schnetger B, Brumsack HJ. 2017. Meltwater as a source of potentially bioavailable iron to Antarctica waters. *Antarct Sci.* 29(3):277-291.
<https://doi.org/10.1017/S095410201600064X>
- Ochoa N, Gómez O, Baylón M. 2016. Fitoplancton del Estrecho de Bransfield y alrededores de la Isla Elefante durante el Verano Austral 2007. *Bol Inst Mar Perú.* 31(1):114-120.
- Oksanen J, Blanchet FG, Friendly M, Kindt R, Legendre P, McGlenn D, Wagner HH. 2018. *Vegan: Community Ecology Package.* R package version 2.5-2. [accessed 2021 Feb 22]. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.
- Osińska M, Bialik RJ, Wójcik-Długoborska KA. 2021. Interrelation of quality parameters of surface waters in five tidewater glacier coves of King George Island, Antarctica. *Sci Total Environ.* 771.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144780>
- Osińska M, Wójcik-Długoborska K, Bialik RJ. 2023. Annual hydrographic variability in Antarctic coastal waters infused with glacial inflow (in review). *Earth Syst Sci Data.* 15:607-616.
<https://doi.org/10.5194/essd-15-607-2023>
- Osmanoğlu B, Braun M, Hock R, Navarro FJ. 2013. Surface velocity and ice discharge of the ice cap on King George Island, Antarctica. *Ann Glaciol.* 54(63):111-119.
<https://doi.org/10.3189/2013AoG63A517>
- Pan BJ, Vernet M, Manck L, Forsch K, Ekern L, Mascioni M, Barbeau KA, Almandoz GO, Orna AJ. 2020. Environmental drivers of phytoplankton taxonomic composition in an Antarctic fjord. *Prog Oceanogr.* 183(February):102295.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102295>
- Pan JB, Vernet M, Reynolds RA, Mitchell GB. 2019. The optical and biological properties of glacial meltwater in an Antarctic fjord. *PLoS One.* 14(2):1-30.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211107>
- Priddle J, Fryxell G. 1985. *Handbook of the common planktonic diatoms of the Southern Ocean.* Cambridge (UK): British Antarctic Survey. 159 p.
- Von Quillfeldt CH. 2004. The diatom *Fragilariopsis cylindrus* and its potential as an indicator species for cold water rather than for sea ice. *Vie Milieu.* 54(2-3):137-143.
- Robakiewicz M, Rakusa-Suszczewski S. 1999. Application of 3D circulation model to Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Pol Polar Res.* 20(1):43-58.
- Round FE, Crawford RM, Mann DG. 1990. *The diatoms: Biology and morphology of the genera.* Cambridge (UK): Cambridge University Press. 747 p.
- Sánchez S, Villanueva P. 2001. Composición del fitoplancton en el Estrecho de Bransfield e Isla Elefante durante el verano austral de 1999. *Rev Peru Biol.* 1(8):23-37.
- Sánchez S, Villanueva P, Delgado E. 2013. Distribución espacial del fitoplancton en el estrecho de bransfield durante el verano austral 2013. *Bol Inst Mar Perú.* 31:169-182.
- Siciński J, Jazdzewski K, Broyer C De, Presler P, Ligowski R, Nonato EF, Corbisier TN, Petti MAV, Brito TAS, Lavrado HP, et al. 2011. Admiralty Bay benthos diversity-a census of a complex polar ecosystem. *Deep Res Part II Top Stud Oceanogr.* 58(1-2):30-48.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.09.005>
- Smale DA, Wernberg T, Oliver ECJ, Thomsen M, Harvey BP, Straub SC, Burrows MT, Alexander LV, Benthuyesen JA, Donat MG, et al. 2019. Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nat Clim Chang.* 9(4):306-312.
<http://dx.doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>
- Sournia A, Grall JR, Jacques G. 1979. Planktonic diatoms and dinoflagellates along a meridian transect in the Southern Indian Ocean (Campagne 'Antiprod I' du Marion-Dufresne, Mars 1977). *Bot Mar.* 22:183-198.
- Steidinger KA, Tangen K. 1997. Dinoflagellates. In: Tomas CR (ed.), *Identifying marine phytoplankton.* San Diego (USA): Academic Press. p. 387-584.
- Steig EJ, Schneider DP, Rutherford SD, Mann ME, Comiso JC, Shindell DT. 2009. Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature.* 457(7228):459-462.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature07669>
- Szafranski Z, Lipski M. 1982. Characteristics of water temperature and salinity at Admiralty Bay (King George Island, South Shetland Islands Antarctic) during the austral summer 1978/1979. *Pol Polar Res.* 3:7-24.
- Turner J, Barrand NE, Bracegirdle TJ, Convey P, Hodgson DA, Jarvis M, Jenkins A, Marshall G, Meredith MP, Roscoe H, et al. 2014. Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Rec.* 50(3):237-259.
<https://doi.org/10.1017/S0032247413000296>
- Villafañe VE, Helbling EW, Holm-Hansen O. 1995. Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass and taxonomic composition around Elephant Island, Antarctica, during the summers of 1990-1993. *Mar Biol.* 123(4):677-686.
<https://doi.org/10.1007/BF00349110>