



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**



**Delimitación de regiones dinámicas en el Estrecho de Gerlache- Península Oeste
Antártica, con base en una aproximación multisensor: Descripción de su
variabilidad hidrográfica, química, biológica y óptica**

TESIS

**PARA CUMPLIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

DOCTORA EN CIENCIAS EN OCENOGRFÍA COSTERA

PRESENTA

Mary Luz Cañón Páez

Ensenada, Baja California, México

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS**

**Delimitación de regiones dinámicas en el Estrecho de Gerlache-Península Oeste
Antártica, con base en una aproximación multisensor: Descripción de su
variabilidad hidrográfica, química, biológica y óptica**

TESIS

**PARA CUMPLIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE**

DOCTORA EN CIENCIAS EN OCENOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

Mary Luz Cañón Páez

Aprobada por:



**Dr. Eduardo Santamaría del Ángel
DIRECTOR DE TESIS**



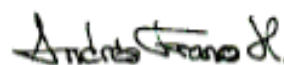
**Dra. Adriana González Silvera
SINODAL**



**Dr. Jorge Manuel López Calderón
SINODAL**



**Dr. Victor Froylan Camacho Ibar
SINODAL**



**Dr. Andrés Franco Herrera
SINODAL**

Resumen

En este trabajo, se realizó durante el verano austral 2017 y 2018 (enero se tomó como representativo del verano) una regionalización dinámica del Estrecho de Gerlache (EG), ubicado en la Península Oeste Antártica (WAP). A partir de imágenes de color del océano y temperatura superficial de mar de los espectroradiómetros Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS-Aqua, MODIS-Terra) y del Visible and Infrared Imager/Radiometer Suite (VIIRS), se derivó información del coeficiente de absorción específico del fitoplancton satelital ($a^*_{ph(443)Sat}$), de la primera profundidad óptica satelital (FOD_{Sat}) y de la temperatura superficial del mar satelital (SST_{Sat}). Estas variables se consideraron representativas de la dinámica física y biológica del EG. El Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales Estandarizadas (SEOF), fue la aproximación que se usó para delimitar las regiones. En enero de 2017, se delimitaron cinco regiones: la región Danco y Brabant ubicadas en el norte, mientras que las regiones Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck en el sur. Por otro lado, en enero de 2018 se delimitó una región adicional al noroeste de Brabant a la que se denominó Crocker. La regionalización del EG, se validó con información de datos hidrográficos (temperatura y salinidad), químicos (macronutrientes inorgánicos) y biológicos (grupos fitoplanctónicos). Estos datos se tomaron durante dos expediciones realizadas a la Antártida en enero de 2017 (Expedición Almirante Padilla) y en enero de 2018 (Expedición Almirante Tono). Análisis estadísticos, determinaron diferencias estadísticamente significativas entre regiones y periodos estudiados, así como, diferentes asociaciones en respuesta a la variabilidad de las condiciones hidrográficas, de macronutrientes inorgánicos y de la estructura de la comunidad fitoplanctónica. Lo anterior, confirmó la división del EG en regiones. Además, modelos de regresión lineal fueron calculados para determinar las razones de asimilación Si: N y N:P. Estos modelos, definieron para cada región características bioquímicas diferenciadas entre regiones y periodo analizados, con lo cual se reafirmó la regionalización del EG realizada con productos satelitales. Finalmente, un índice para identificar cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica fue desarrollado con datos del coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a^*_{ph(400-700nm)}$). Este índice denominado como TS_{index} , se basó en la reconstrucción del espectro de $a^*_{ph(400-700nm)}$ y mostró cambios tanto en la magnitud como en la forma del espectro de ($a^*_{ph(400-700nm)}$), que se atribuyeron a la contribución de diferentes tipos y concentraciones de pigmentos fitoplanctónicos. El TS_{index} , se confirma como un método para estudiar cambios en la estructura de la comunidad del fitoplancton. En total, 18 estructuras fitoplanctónicas fueron reconstruidas en el EG para cuatro condiciones: en la superficie y el máximo profundo de clorofila-*a* (MPChl-*a*), durante un periodo cálido (enero de 2017) y uno frío (enero de 2018). Las estructuras reconstruidas con el TS_{index} , en algunos casos fueron características de las regiones, de regiones compartidas o de comunidades cosmopolitas presentes en todo el EG. Este índice se propone como un método complementario en programas de monitoreo del fitoplancton, con la ventaja de ser de bajo costo y con menores tiempo de procesamiento de la muestra en comparación con los recuentos de fitoplancton en microscopio y la cromatografía líquida de alta resolución, además se puede aplicar y validar para otros ambientes costeros tropicales y subtropicales. Por lo tanto, en los tres capítulos de este trabajo se genera información que contribuye de forma relevante para el manejo de áreas especialmente sensibles en la Antártida y proporciona nuevo conocimiento en materia de la planificación espacial marina, así como de índices ecológicos que hasta la fecha no habían sido abordados, de manera que puede ser incorporada en las agendas de investigación de diferentes programas de ciencia en la Antártida.

Dedicatoria

A Dios por permitirme llegar a donde estoy y brindarme unos padres que me dieron la vida y la oportunidad de forjar un futuro.

A Thomas y Melissa porque han sido mis mayores bendiciones y sin duda los más sacrificados en este proceso, pero me motivaron en las ausencias a insistir y cumplir este objetivo.

A Fabián por el tiempo, el apoyo, por cubrir los espacios de mamá y papá cuando no estuve, por la inspiración para continuar cuando no encontraba salida y por el sacrificio que esto ha implicado. Gracias por estar siempre en los momentos difíciles y por tu amor incondicional.

A mis hermanos y sobrinos porque gracias a ellos fue posible ver que cada reto sí se podía alcanzar con trabajo y dedicación.

A Don Olimaco quien siempre quiso ver culminado este proceso y que hoy desde el firmamento nos sigue acompañando.

Al Dr. Eduardo Santamaría, porque siempre me insistió en la importancia de romper paradigmas.

Agradecimientos

A mi comité de tesis, Dr. Eduardo Santamaría, Dr. Jorge López, Dr. Victor Camacho, Dr. Andrés Franco Herrera y Dra Adriana González, por brindarme su apoyo, conocimientos, aportes y orientaciones durante todo el proceso de formación.

A CONACYT por la beca otorgada (No 208078/633423) para cursar el programa de Doctorado de la Facultad de Ciencias Marinas.

A mi tutor, el Dr. Eduardo Santamaría por el tiempo, la disposición para atender las inquietudes, el ánimo para culminar en tiempo y forma el proceso y por entender las dificultades de llevar el proceso lejos de casa.

Al Dr. Jorge López Calderón y al Dr. Roberto Millán Núñez por su apoyo para el análisis de pigmentos y orientación en el manejo del CHEMTAX.

Al Dr. Victor Camacho y su equipo de trabajo, por el apoyo para el análisis de las muestras de nutrientes.

A la Dirección General Marítima, por el tiempo de licencias concedido para cursar el programa y al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, por el apoyo para incluir dentro del Proyecto ICEMAN este trabajo y con el cual fue posible la participación en las Expediciones científicas Almirante Padilla y Almirante Tono a la Antártida.

Al Programa Antártico colombiano y la tripulación del ARC 20 de Julio de la Armada de Colombia, por el apoyo para facilitar el trabajo de campo durante las Expediciones.

A AMERIGEOS, por la contribución en materiales para la toma y traslado de muestras desde la Antártida hasta la Universidad.

Agradezco especialmente a mis amigos del grupo POPEYE, Alejandra, Cristina, Liz y Eddy por su grata compañía, apoyo, compañerismo, amistad incondicional y sobre todo por acogerme en los momentos lejos de casa, siempre los llevaré en mi corazón porque hicieron más agradable el tiempo sin mi familia.

Agradezco también a Stellita por su apoyo y orientación cuando llegue a Ensenada, sin duda el que estuvieras allí, me permitió manejar con más tranquilidad los cambios que conllevó asumir este reto.

Índice

Introducción	1
Objetivo General	5
Capítulo 1.....	6
Resumen	6
1.1. Introducción	6
1.2. Metodología	8
1.3. Resultados	10
1.4. Discusión.....	14
1.5. Conclusiones.....	17
Capítulo 2.....	18
Resumen	18
2.1. Introducción.....	18
2.2. Metodología	20
2.2.1. Muestreo (Expediciones Antárticas).....	20
2.2.2. Determinación y análisis de pigmentos	20
2.2.3. Análisis de nutrientes.....	22
2.2.4. Análisis estadístico.....	22
2.3. Resultados	23
2.3.1. Variables hidrográficas	23
2.3.2. Masas de agua.....	29
2.3.3. Nutrientes	33
2.3.4. Pigmentos y grupos fitoplanctónicos.....	41
2.4. Discusión	53
2.5. Conclusiones.....	58
Capítulo 3	59
Resumen	59
3.1. Introducción.....	60
3.2. Metodología	62
3.2.1. Muestreo	62
3.2.2. Determinación de pigmentos y grupos fitoplanctónicos	62
3.2.3. Determinación del coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a_{ph(\lambda)}^*$)	63
3.2.4. Determinación del índice del espectro tipo	63
3.2.5. Validación de estaciones agrupadas para derivar el espectro tipo	64
3.3. Resultados	65
3.3.1. Periodo cálido en la superficie (enero de 2017).	64
3.3.2. Periodo cálido en el máximo profundo de Chl-a (enero de 2017).....	68
3.3.3. Periodo frío en la superficie (enero de 2018	70
3.3.4. Periodo frío en el máximo profundo de Chl-a (enero de 2018).	73
3.4. Discusión	75
3.5. Conclusiones.....	78
4. Consideraciones Finales.....	80
Referencias	83

Lista de Tablas

Capítulo 1.....	6
Tabla 1.1. Coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a_{ph(443)Sat}^*$), primera profundidad óptica (FOD_{Sat}), temperatura superficial del mar (SST_{Sat}) y concentración de Chl- <i>a</i> (mg/m^3), derivados de compuestas multisensor satelitales en las regiones delimitadas en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017	12
Tabla 1.2. Coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a_{ph(443)Sat}^*$), primera profundidad óptica (FOD_{Sat}), temperatura superficial del mar (SST_{Sat}) y concentración de Chl- <i>a</i> (mg/m^3), derivados de compuestas multisensor satelitales en las regiones delimitadas en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2018	13
Capítulo 2.....	18
Tabla 2.1. a) Abreviaturas, pigmentos y grupos representados; b) Razones iniciales de pigmentos al total de Chl- <i>a</i> utilizadas en el CHEMTAX	21
Tabla 2.2. Variables hidrográficas de superficie a 200 m de profundidad en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017 y enero de 2018. En la tabla se indica el número de datos (<i>n</i>), el mínimo (<i>Min</i>) y máximo (<i>Max</i>), promedio (<i>Prom</i>) y dispersión de los datos (<i>SD</i> , por su sigla en inglés) de temperatura (<i>Tem</i>) y salinidad (<i>Sal</i>) y de la profundidad de la capa de mezcla durante 2017 y 2018, así como por región .	26
Tabla 2.3. Resultado del Estadístico no paramétrico de Wilcoxon entre regiones de las variables en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017 y enero de 2018. El símbolo # significa que las regiones son diferentes. El α utilizado fue del 5%. La Región Danco está representada por RA, Brabant por RB, Advord-Flandres por RC, Neumeyer por RD, Bismarck por RE y Crocker por RF	27
Tabla 2.4. a) Intervalos de variación de macronutrientes inorgánicos disueltos por región durante 2018. b) Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en las concentraciones de nutrientes en las regiones delimitadas. La tabla incluye el número de datos por región (<i>n</i>), la suma de rangos calculados (R_1 , R_2 calculados), los límites de los valores críticos (Límite Inferir: TL y Superior: TU) y la decisión representada en el signo #, indica que las regiones no son iguales. El α utilizado fue del 5%. La Región Danco está representada por RA, Brabant por RB, Advord-Flandres por RC, Neumeyer por RD, Bismarck por RE y Crocker por RF.....	36
Tabla 2.5. Razones estequiométricas Si: N y N:P para las regiones delimitadas en el Estrecho de Gerlache durante 2018. El estadístico de prueba para probar la significancia de la razón fue la Prueba <i>t</i> y para determinar la significancia global del modelo la Prueba <i>F</i> de Fisher, con un α del 5%. La tabla incluye el número de datos (<i>n</i>) para cada región, los grados de libertad (<i>gl</i>), los valores calculados de las razones (<i>tcal</i>), los valores límite o crítico de las razones (<i>tcrit</i>), el coeficiente de determinación (R^2), el valor calculado para la significancia global del modelo (<i>Fcal</i>) y el valor crítico del modelo (<i>Fcrit</i>). En negritas las razones y modelos que no fueron significativos. Los modelos <i>a</i> y <i>c</i> corresponden a las razones de asimilación hasta los 200 m, mientras que <i>b</i> y <i>d</i> hasta 100 m	39
Tabla 2.6. Concentración de pigmentos (mg/m^3) analizados para cada uno de los cruceros (Expedición Almirante Padilla-enero de 2017 y Expedición Almirante Tono- enero de 2018) en la superficie y el máximo profundo de Chl- <i>a</i> . Los pigmentos relacionados en la tabla corresponden a: Clorofila- <i>a</i> : Chl- <i>a</i> , Fucoxantina: Fuco, Peridinina: Peri, 19'Butanoyloxyfucoxantina: 19'-But, 19'Hexanoyloxyfucoxantina: 19'-Hex, Alloxantina: Allo, Clorofila- <i>b</i> : Chl- <i>b</i>	40
Tabla 2.7. Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en la contribución de grupos del fitoplancton durante las Expediciones de 2017 y 2018. Se indica el número de datos para cada	

Expedición (n), los valores calculados (T_{2017} , T_{2018}), los valores críticos (Límite Inferir: TL y Superior: TU) y el alfa usado fue del 5%. El Signo #, significa que las regiones son diferentes.	44
Tabla 2.8. Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en la contribución de grupos del fitoplancton entre las regiones del 2017. Se indica el número de datos para cada Expedición (n), los valores calculados ($T_{1\text{Región1}}$, $T_{2\text{Región2}}$), los valores críticos (Límite Inferir: TL y Superior: TU) y el alfa usado fue del 5%. El Signo # significa que las regiones son diferentes.	45
Tabla 2.9. Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en la contribución de grupos del fitoplancton entre las regiones del 2018. Se indica el número de datos para cada Expedición (n), los valores calculados ($T_{1\text{Región1}}$, $T_{2\text{Región2}}$), los valores críticos (Límite Inferir: TL y Superior: TU) y la decisión con un intervalo de confianza del 95%. El Signo #, significa que las regiones son diferentes. El α utilizado fue del 5%.	46
Tabla 2.10. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) para evaluar la asociación de las variables al interior de las regiones en la Expedición de 2017. Los números en negrita indican asociación directa (+ y/o -) o inversa (-+) entre las variables en cada componente. La tabla incluye información sobre el eigenanálisis, que indica por región el porcentaje de asociación de las variables explicadas por el modelo y corresponde a los eigenvalores >1	49
Tabla 2.11. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) para evaluar la asociación de las variables al interior de las regiones en la Expedición de 2018. Los números en negrita indican la asociación directa (+ y/o -) o inversa (-+) entre las variables en cada componente. La tabla incluye información sobre el eigenanálisis, que indica por región el porcentaje de asociación de las variables explicadas por el modelo y corresponde a los eigenvalores >1	51
Capítulo 3	57
Tabla 3.1. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) para determinar la asociación de Estaciones en la superficie (a) y el máximo profundo de Chl-a (b) en la condición cálida (enero de 2017) con espectros $a^*_{ph(\lambda)}$. En las primeras tres líneas se encuentra el eigenanálisis de los componentes significativos: El autovalor, la proporción de la varianza explicada por cada componente y la proporción acumulada. Se muestran los componentes seleccionados para cada condición. Los números en negrita indican el vector propio asociado con un componente dado y entre paréntesis el número del espectro tipo reconstruido al que contribuyó la estación.....	63
Tabla 3.2. Resultados del Análisis Discriminante (AD) con el que se validó la agrupación de las estaciones para reconstruir a los espectros tipo en las condiciones: a) En la superficie para un periodo cálido (2017); b) En el MPChl-a para un periodo cálido (2017).	64
Tabla 3.3. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) realizado para determinar la asociación de Estaciones en la superficie (a) y el máximo profundo de Chl-a (b) en la condición fría (enero de 2018) con espectros $a^*_{ph(\lambda)}$. En las primeras tres líneas se encuentra el eigenanálisis de los componentes significativos: El autovalor, la proporción de la varianza explicada por cada componente y la proporción acumulada. Se muestran los componentes seleccionados para cada condición. Los números en negrita indican el vector propio asociado con un componente dado y entre paréntesis el número del espectro tipo reconstruido al que contribuyó la estación.....	68
Tabla 3.4. Resultados del Análisis Discriminante (AD) con el que se validó la agrupación de las estaciones para reconstruir a los espectros tipo en las cuatro condiciones: a) En la superficie para un periodo frío (enero de 2018); b) En el el MPChl-a para un periodo frío (enero de 2018).....	69

Lista de Figuras

Figura 1. Estrecho de Gerlache ubicado en la WAP, con las estaciones de muestreo. Las regiones del sur están representadas por estaciones marcadas con círculos rojo (2017), naranja (2018), círculos verdes oscuro (2017) y verde claro (2018); y las regiones del norte por círculos azul (2017) y violeta (2018)... 3

Capítulo I 6

Figura 1.1. Regiones delimitadas durante enero de 2017 en el Estrecho de Gerlache a partir de compuestas multisensor de temperatura superficial del mar (SST_{Sat}), así como variables de color derivadas: coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a^*_{ph(443)Sat}$) y primera profundidad óptica (FOD_{Sat})..... 11

Figura 1.2. Regiones delimitadas durante enero de 2018 en el Estrecho de Gerlache a partir de compuestas multisensor de temperatura superficial del mar (SST_{Sat}), así como variables de color derivadas: coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a^*_{ph(443)Sat}$) y primera profundidad óptica (FOD_{Sat})..... 13

Capítulo 2 18

Figura 2.1. Secciones latitudinales de temperatura y salinidad en el Estrecho de Gerlache durante el 2017 desde el sur hasta el noreste en inmediaciones de la Isla Trinity (300 km). Los símbolos negro, verde y naranja representan las estaciones más profundas que conectan al Estrecho con el Mar de Bellingshausen 23

Figura 2.2. Distribución de la temperatura y la salinidad en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017 (a, c) y enero de 2018 (b, d) en la profundidad de la capa de mezcla 24

Figura 2.3. Secciones latitudinales de temperatura y salinidad en el Estrecho de Gerlache durante el 2018 desde el sur hasta el noreste en inmediaciones de la Isla Trinity (300 km). Los símbolos negro, verde y naranja representan las estaciones más profundas que conectan al Estrecho con el Mar de Bellingshausen 25

Figura 2.4. Masas de agua identificadas en el Estrecho de Gerlache por región durante enero de 2017 y enero de 2018: Agua Circumpolar Superior modificada (mUCDW), Agua Transicional del Mar de Bellingshausen (TBW) y Agua Transicional del Mar de Weddel (TWW)..... 29

Figura 2.5. Contribución de las masas de agua identificadas en el Estrecho de Gerlache por región durante el 2017: Otros tipos de agua (OM), Agua Circumpolar Superior modificada (mUCDW), Agua Transicional del Mar de Bellingshausen (TBW) y Agua Transicional del Mar de Weddel (TWW)..... 30

Figura 2.6. Contribución de las masas de agua identificadas en el Estrecho de Gerlache por región durante el 2018: Otros tipos de agua (OM), Agua Circumpolar Superior modificada (mUCDW), Agua Transicional del Mar de Bellingshausen (TBW) y Agua Transicional del Mar de Weddel (TWW)..... 31

Figura 2.7. Secciones latitudinales de macronutrientes en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2018. La S corresponde a las estaciones y regiones ubicadas en el sur y la N a las estaciones y regiones ubicadas al noreste de la costa Danco. Las Estrellas, gris, verde y naranja, corresponden a las estaciones cuya profundidad permiten el ingreso de aguas intermedias y profundas del Mar de Bellingshausen en el Estrecho de Gerlache 33

Figura 2.8. Secciones latitudinales de macronutrientes en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017. La C corresponde a la Estación 13 ubicada en el centro del Estrecho y la NW a la estación y región

ubicada al noroeste de la costa Danco. Las Estrellas, gris, verde y naranja, corresponden a las estaciones cuya profundidad permite el ingreso de Aguas del Mar de Bellingshausen en el Estrecho de Gerlache.....	34
Figura 2.9. Modelos de regresión lineal o razones estequiométricas en las regiones delimitadas en el Estrecho, durante enero de 2018; a) Sílice a Nitrógeno (Si: N) y b) Nitrógeno a Fosforo (N:P).....	38
Figura 2.10. Contribución porcentual de grupos del fitoplancton en cada región del Estrecho de Gerlache durante enero de 2017. Las barras corresponden a las estaciones por cada región con la estructura de grupos del fitoplancton. El símbolo negro representa la concentración de Chl-a en mg/m ³	42
Figura 2.11. Contribución porcentual de grupos del fitoplancton en cada región del Estrecho de Gerlache durante enero de 2018. Las barras corresponden a las estaciones por cada región con la estructura de grupos del fitoplancton. El símbolo negro representa la concentración de Chl-a en mg/m ³	43
Capítulo 3	57
Figura 3.1. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS _{index} , durante el periodo cálido en la superficie (2017), con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) en todo el EG; b) y c) Danco-Brabant. En los círculos, los grupos del fitoplancton con contribuciones >10% se representan con colores y OG en negro es la suma del porcentaje con contribuciones de grupos inferiores al 10%.	65
Figura 3.2. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS _{index} , durante el periodo cálido en el MPChl-a, con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) Brabant; b) Bismarck; c) Andvord-Neumeyer; d) Danco y e) Bismarck. En los círculos, los grupos de fitoplancton con contribuciones >10% se representan con colores y OG en negro es la suma del porcentaje con contribuciones de grupos inferiores al 10%	67
Figura 3.3. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS _{index} , durante el periodo frío en la superficie (2018), con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) Brabant-Crocker; b) Danco-Brabant, c) Brabant- Bismarck d) Neumeyer-Danco, e) y f) Danco	70
Figura 3.4. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS _{index} , durante el periodo frío en el MPChl-a (2018), con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) Danco-Crocker; b) Brabant-Neumeyer; c) Brabant; d) Danco-Bismarck	72
Discusión General	77
Figura 4.1. Resumen gráfico del análisis de Wilcoxon que consolida por variables y periodos analizados las diferencias entre las regiones dinámicas delimitadas en el EG. Los símbolos # indican diferencias y los círculos por color representan a las regiones. Los círculos sin símbolo representan parámetros o regiones que no pudieron ser comparados por bajo número de muestras, o porque en el caso de la región Crocker en 2017 (representada en azul claro) estaba fusionada con Brabant.	77

I. Introducción

Naciones Unidas, en 2015 estableció 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (Griggs *et al.*, 2013), dentro de los cuales el entendimiento de procesos oceánicos y climáticos se consideran de importancia estratégica para garantizar acciones de agenda global que reduzcan los impactos de la acción antropogénica sobre los espacios marino costeros a nivel mundial. Algunos de estos impactos, que generan una enorme presión en ecosistemas terrestres y marinos son el cambio climático (Turner *et al.*, 2016), la pérdida de biodiversidad por especies invasoras (Clown *et al.*, 2012), el desbalance de ciclos biogeoquímicos por el incremento en los aportes de fertilizantes (Beusen *et al.*, 2016), la contaminación, el aumento en la magnitud y número de eventos extremos, entre otros (Hughes *et al.*, 2018).

En respuesta a estas problemáticas, ha surgido la necesidad de establecer agendas de investigación y gobernanza conjuntas para entender y tomar acciones frente a dichos impactos (Nilsson *et al.*, 2016). En 2017, Naciones Unidas, a través de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) definió un nuevo escenario para que la ciencia y la política unan esfuerzos y generen acciones que fortalezcan la gestión de los océanos, al que han denominado “El Decenio de las Ciencias Oceánicas” (Ryabinin *et al.*, 2019). En consecuencia, tanto los océanos Austral como Ártico al desempeñar funciones únicas y críticas para el sistema físico de la tierra y la ecología, porque influyen fuertemente en el clima y albergan comunidades biológicas únicas y diversas (Xavier *et al.*, 2013), hoy en día son objeto de grandes programas de investigación (Kennicutt *et al.*, 2015), así como del esfuerzo que promueve ahora la Agenda de Naciones Unidas.

En el caso particular de la Antártida, las actividades humanas (Cook *et al.*, 2013) han impactado su estructura y función ambiental (Turner *et al.*, 2016; Clown *et al.*, 2015). Una de las áreas de mayor afectación y sensibilidad al cambio climático es la Península Oeste Antártica (WAP, por su sigla en inglés), debido al aumento de la temperatura (Henley *et al.*, 2019) y al cambio en la dinámica del hielo (Meredith *et al.*, 2005; 2017). Esto ha provocado el calentamiento de las aguas profundas y superficiales, cambios en la salinidad en la mayor parte de la WAP (Meredith y King 2005), en la estructura de la comunidad fitoplanctónica (Massom y Stammerjhon, 2010; Shofield *et al.*, 2017; Rozema *et al.*, 2017; Mendes *et al.*, 2018) y en los ciclos de nutrientes (Tréguer, 2014; Kerr *et al.*, 2018; Freeman *et al.*, 2020).

El Estrecho de Gerlache (EG), esta ubicado en la WAP al sur del Estrecho de Bransfield y al norte del Estrecho de Bismark aproximadamente entre los 61 - 64°W y 64 - 65°S (Fig. I). El EG, se ha descrito como un canal estrecho de entre 8 a 60 km de ancho, que se extiende 180 km desde las islas Hoseason y Trinity en el norte hasta Anvers en el Estrecho de Bismarck al sur (Isla *et al.*, 2002). En promedio tiene 300 m de profundidad en el sur, entre 600-800 m en el centro a la altura del Canal Schollaert y de 300 a 400 m en el margen noroccidental (Evans *et al.*, 2004); las áreas más profundas se ubican en el sector noroccidental en el Paso Crocker (Isla *et al.*, 2002), con profundidades entre 1000 a 1200 m (Evans *et al.*, 2004). Algunos fiordos y bahías dentro del EG, alcanzan profundidades hasta de 500 m, como por ejemplo Advord (Pant *et al.*, 2019). Del lado opuesto de Advord, el Canal Neumeyer tiene entre 3 a 4 km de ancho con profundidades menores a 400 m (Evans *et al.*, 2004).

El EG está ubicado al noroeste de la WAP, dentro del mar de Bellingshausen y tiene influencia de tres masas de agua: el Agua Superficial Antártica (AASW, por su sigla en inglés), el agua intermedia denominada como Agua Profunda Circumpolar Superior modificada (mUCDW) y el Agua Profunda Circumpolar Inferior modificada (mLCDW) (García *et al.*, 2002). Sin embargo, por la configuración de la batimetría de fondo del EG, la presencia de estas masas de agua es controlada por la dinámica de los mares adyacentes; es decir agua cálida y menos salada, a la que han denominado como Agua Transicional con influencia del mar de Bellingshausen (TBW) o agua más fría y salada, definida como Agua Transicional con influencia del Mar de Weddel (TWW) (García *et al.*, 2002; Sangra *et al.*, 2011; Kerr *et al.*, 2018). Estas masas de agua ocupan la subsuperficie y el fondo del EG. Por otro lado, la circulación superficial en el EG es dominada por la corriente de Gerlache (Zou *et al.*, 2002), cuyo principal flujo es del sur hacia el noroeste (Kerr *et al.*, 2018) y en el norte el EG es influenciado por el sistema de Bransfield (Sangra *et al.*, 2011).

El EG, se considera como un área de aguas costeras con alta productividad porque no tiene limitaciones de hierro (Holm-Hansen *et al.*, 1989), además, los vientos y tormentas tienen menor intensidad (Zou *et al.*, 2002). Estos factores, hacen que tanto los procesos de advección como la profundización de la capa de mezcla se minimicen (Holm-Hansen y Mitchell, 1991). Sumado a lo anterior, los aportes de agua de deshielo, aumentan la estabilidad de la columna de agua superficial y favorecen el desarrollo de importantes florecimientos del fitoplancton (Varela *et al.*, 2002; Rodríguez *et al.*, 2002). En consecuencia, Varela *et al.* (2002), definieron al EG como un área dominada por las diatomeas, con alta productividad primaria ($2.1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y alta concentración de Chl-a ($165 \text{ mg Chl-a m}^{-2}$).

Sin embargo, estudios recientes documentan el cambio en la estructura de la comunidad (Shofield *et al.*, 2017; Seyboth *et al.*, 2017; da Cunha *et al.*, 2018) de diatomeas a criptofitas (Mendes *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2020), en áreas del EG en las que la capa de mezcla es poco profunda y más cálida; es decir en el sector noroeste. Además, se han asociado a áreas frontales de baja salinidad (Moline *et al.*, 2004), por lo que el incremento o aporte de aguas de deshielo favorecen su crecimiento. Otros grupos, como *Phaeocystis antarctica* y diatomeas pequeñas también se denotan como componentes importantes de la estructura en el EG (Mendez *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2020). De acuerdo con los estudios de García *et al.* (2002), Varela *et al.* (2002), Rodríguez *et al.* (2002) y los más recientes (Shofield *et al.*, 2017; Mendes *et al.*, 2018; Torres *et al.*, 2020) se propone para el EG, que la estructura de la comunidad fitoplanctónica puede asociarse a distintas regiones biogeoquímicas, donde las características físicas y químicas de cada una ejercen una influencia significativa. Hasta ahora, el EG no ha sido objeto de investigaciones en este sentido. Además, se le ha considerado como una región productiva y con alta cobertura de nubes. Por ello, se plantearon como preguntas de investigación las siguientes: ¿al ser el EG un área pequeña, productiva, con alta cobertura de nubes y bajos gradientes de temperatura, es posible regionalizarlo con sensores remotos?, Son los procesos físicos, químicos, biológicos o una combinación de estos determinantes en la delimitación de regiones en el EG?. Para responder a esto, el objetivo es delimitar regiones dinámicas y describir su variabilidad en términos hidrográficos, biológicos, químicos y ópticos, así como establecer variables indicadoras de cambios en la estructura de la comunidad en respuesta a la variabilidad ambiental.

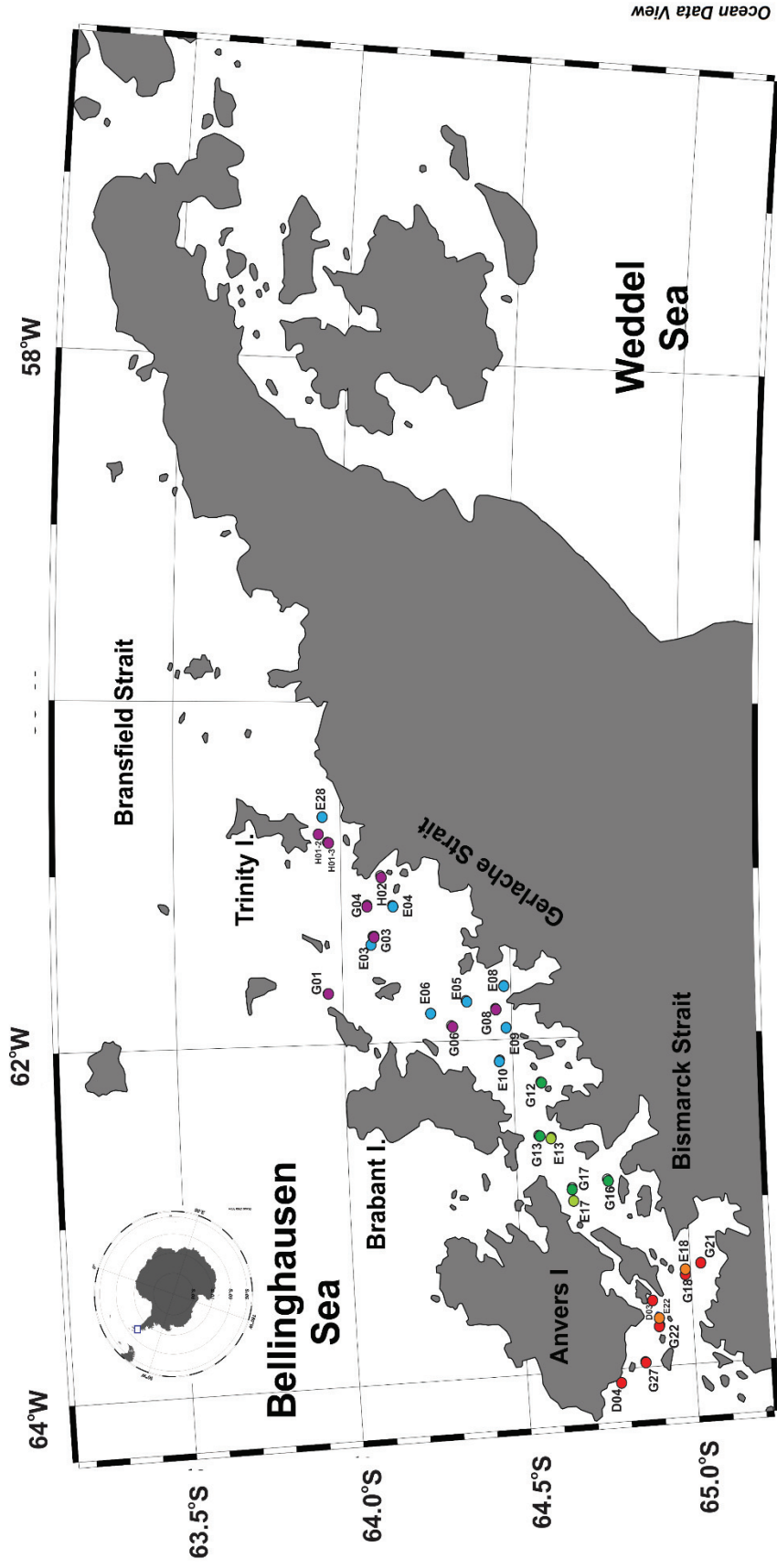


Figura 1. Estrecho de Gerlache ubicado en la WAP, con las estaciones de muestreo. Las regiones del sur están representadas por estaciones con círculos rojo (2017), naranja (2018), círculos verdes oscuro (2017) y verde claro (2018); y las regiones del norte las estaciones con círculos azul (2017) y violeta (2018).

Para ello, este trabajo se estructuró en tres capítulos. En el capítulo I, con información de color de océano y SST_{Sat} derivada de sensores remotos, se evaluó si el EG estaba dividido en regiones, considerando que se trata de un área pequeña, con alta cobertura de nubes y bajos gradientes de temperatura. El concepto de la dinámica de los límites entre las regiones se abordó mediante la comparación de dos periodos (enero de 2017 y enero de 2018).

En el capítulo II, con datos de dos cruceros oceanográficos realizados en enero de 2017 y enero de 2018, se evaluó si las regiones delimitadas con la aproximación multisensor del capítulo I, eran iguales o diferentes en términos hidrográficos, químicos y biológicos y se describió su variabilidad.

En el capítulo III se presenta un índice para evaluar el espectro de absorción de luz específico por el fitoplancton, el TS_{index} (por su sigla en inglés), como una forma de evaluar de manera indirecta cambios en la estructura de la comunidad del fitoplancton en las regiones del EG, en respuesta a cambios ambientales. Esta aproximación usó información de propiedades ópticas inherentes (POI). Las POIs, estudian las propiedades de absorción $a_{(\lambda)}$ y dispersión $b_{(\lambda)}$ del agua y sus constituyentes, pero su magnitud y variación no dependen del ángulo de incidencia de la luz (Kirk, 2011); la POI que se usó en el TS_{index}, fue del coeficiente de absorción específico del fitoplancton. Por esto, se presenta como una herramienta complementaria en programas de monitoreo del fitoplancton.

II. Objetivo General

Delimitar y describir regiones dinámicas en el Estrecho de Gerlache con datos de sensores remotos, hidrográficos, químicos, biológicos y ópticos, así como establecer variables indicadoras de cambios en la estructura de la comunidad en respuesta a la variabilidad ambiental.

Objetivos Específicos

Delimitar regiones dinámicas en el EG a partir de una aproximación multisensor con variables de color y temperatura del océano, durante enero de 2017 y enero de 2018.

Describir la variabilidad espacio-temporal de las condiciones hidrográficas, la dinámica de nutrientes y de la estructura de la comunidad fitoplanctónica de las regiones delimitadas, con datos de campo de enero de 2017 y enero de 2018.

Describir y proponer al TS_{index} como método para identificar cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica en el EG, a partir de la reconstrucción del espectro de absorción específico del fitoplancton.

Capítulo 1

Delimitación de regiones dinámicas del Estrecho de Gerlache a partir de una aproximación multisensor

Resumen

Se llevó a cabo en el Estrecho de Gerlache (EG) una delimitación de regiones dinámicas, a partir de la combinación de variables de color del océano y temperatura superficial del mar de tres espectroradiómetros (aproximación multisensor), en enero de 2017 y enero de 2018. Los espectroradiómetros usados para delimitar las regiones fueron, el MODIS-Aqua, el MODIS-Terra y el VIIRS. Compuestas mensuales de temperatura superficial del mar (SST_{Sat} , por su sigla en inglés), así como variables derivadas como el coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a_{ph(443)Sat}^*$) y de la primera profundidad óptica (FOD_{Sat} , a partir del coeficiente de atenuación de la luz- kd_{490}), fueron generadas a partir de imágenes diarias de 1 km de resolución. La Primera Función Empírica Ortogonal Estandarizada ($SEOF_1$) fue calculada para delimitar las regiones. En enero de 2017, el EG fue dividido en cinco regiones, mientras que en enero de 2018 en seis. Tres regiones se delimitaron en el norte del EG: Danco, Brabant y Crocker y tres en el sur: Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck. Las regiones delimitadas se asociaron con los patrones de circulación, la batimetría y la configuración de las bahías. La aproximación multisensor permitió tener imágenes con menor cobertura de nubes, mientras que el empleo de otros productos ópticos como FOD_{Sat} y el $a_{ph(443)Sat}^*$, solucionó los bajos gradientes de SST observados en el EG. Por lo tanto, la aproximación multisensor y la exploración de nuevos productos satelitales, demostraron ser útiles para delimitar áreas pequeñas y complejas, con potencial para ser aplicados en áreas costeras tropicales, lugares donde la alta cobertura de nubes y los bajos gradientes de SST generan inconvenientes a la hora de utilizar sensores remotos para regionalizar espacios marino-costeros.

1.1. Introducción

En la última década, métodos nuevos para identificar la naturaleza dinámica de los sistemas oceánicos han sido implementados. Dentro de éstos, el uso de datos y productos derivados de color del océano constituyen una herramienta de alta versatilidad para inferir la función ecológica del ecosistema oceánico en escalas espacio-temporales muy altas. Cabe mencionar que, a diferencia de los ecosistemas terrestres, en los sistemas marinos la biota es predominantemente microscópica y la distinción entre tipos de hábitats es menos evidente (IOCCG, 2009). Esto ocurre porque los flujos ecológicos y biogeoquímicos en el océano no actúan a la misma velocidad y con la misma intensidad. Por esto, se conoce que el ecosistema oceánico comprende un conjunto de regiones contiguas y autónomas cuya estructura y función biológica son distintivas y representan sistemas o estructuras complejas (en tiempo y espacio) por las interacciones entre los organismos y su medio (Hardman-Mountford, *et al.*, 2008). Lo anterior, permite

diferenciar unas regiones de otras (Longhurst, 1995), donde al interior de las regiones, la magnitud de los parámetros es controlada por procesos internos y no por las interacciones entre regiones (IOCCG, 2009).

Dentro de los enfoques metodológicos para generar divisiones del océano se puede optar por dos caminos: (a) mediante el empleo de datos de campañas oceanográficas (aproximación directa “AD”) o (b) a través de información tomada por sensores remotos (aproximación indirecta “AI”) (IOCCG, 2009; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011). Cada una tiene ventajas y desventajas; la AD requiere programas de monitoreo continuo en áreas con cobertura amplia y preestablecida (IOCCG, 2009). Por lo tanto, los costos de las operaciones de monitoreo son altos y como resultado, el número de sitios disponibles para regionalizar es limitado. Por otro lado, la AI se utiliza para áreas con baja cobertura y monitoreo continuo, aunque su principal limitación es que representa información de distintas profundidades, por ejemplo, los datos de color representan la FOD es decir la capa donde ocurre la fotosíntesis (Kirk, 2011), mientras que la SST solamente las 11 primeras micras superficiales (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011; Callejas-Jiménez *et al.*, 2012).

Pese a la limitación de la aproximación indirecta, varios trabajos (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994; Longhurst *et al.*, 1995; González-Silvera *et al.*, 2004; Devred *et al.*, 2007; Hardman-Mountford, *et al.*, 2008), consideraron a la variabilidad espacio-temporal de la Chl-*a* y la SST como base del análisis, debido a que estas dos variables representan procesos biológicos y físicos dentro del ecosistema pelágico. Longhurst (1995; 2006), fue uno de los primeros en llevar a cabo estudios de división de los océanos y su trabajo se basó en identificar elementos comunes de procesos físicos que influyen de manera significativa a los procesos del fitoplancton. Sus resultados representaron una de las divisiones más completas de la biota pelágica, pero el esquema fue de utilidad limitada en los complejos sistemas de aguas costeras (Spalding *et al.* 2007).

Por lo anterior, la propuesta de Spalding *et al.* (2007) resolvió la limitación del esquema de Longhurst (1998) y estableció un sistema de clasificación biogeográfica global para áreas costeras y de plataformas en el que definió 12 reinos, 62 provincias y 232 ecoregiones. Dentro de este análisis, a la Antártida la clasificó en 4 provincias y 21 ecoregiones. Otros esquemas como el de Hooker *et al.* (2000), presentaron aproximaciones enfocadas en la división vertical y no horizontal del océano; estos autores definieron una capa de mezcla cercana a la superficie y una capa estratificada más profunda. Bajo el mismo enfoque, tanto Araujo *et al.* (2017) como Carvahlo *et al.* (2017) evaluaron la relación entre la capa de mezcla y la distribución vertical de fitoplancton como medida estándar y ecológicamente relevante para definir el límite vertical inferior de la distribución del fitoplancton.

Es preciso indicar, que tanto la información de la SST_{Sat} como Chl-*a*_{Sat}, proceden de diferentes profundidades y además que la Chl-*a*_{Sat} es proporcionada en escala logarítmica, esto hace que en zonas oligotróficas (océano) las concentraciones se muestren en gran detalle, mientras que en las zonas eutróficas (costeras) sean aproximadas. Por otro lado, los gradientes de SST_{Sat} en altas latitudes no son marcados, lo cual conlleva que se generen dificultades al usar la SST_{Sat} para delimitar regiones. Sin embargo, otros estudios (Cañon-Páez, 2010; Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011; Callejas-Jiménez *et al.*,

2012), emplearon nuevos productos derivados de color de océano, para solucionar la limitación de los gradientes. Estos trabajos usaron las radiancias normalizadas ($nL_w(\lambda)$), en las longitudes de onda 412 nm y 488 nm, para delimitar regiones en el mar Caribe y el Golfo de México, porque los gradientes de SST y Chl-a son bajos para estas dos áreas. Por ejemplo, en temperatura no varían más de 5°C por época (Rueda-Roa y Muller-Karger, 2013). De otro lado, Werdell y McClain, (2019), definieron a las $nL_w(\lambda)$ como el flujo de energía emitida por el agua excluyendo la luz reflejada en la superficie.

La $nL_w(\lambda)$ captura características que son suficientemente distintas con respecto a las regiones adyacentes, por lo que es posible delimitar áreas asociadas a propiedades ópticas características, bajo la influencia de diferentes fuentes de absorción y dispersión como son los pigmentos de fitoplancton, detritos, minerales y las sustancias disueltas coloreadas (IOCCG, 2009). Es así como, la selección de la $nL_w(412\text{ nm})$, es porque representa a la señal de la materia orgánica disuelta (CDOM, por su sigla en inglés), frecuentemente asociada con la influencia costera y de la $nL_w(488\text{ nm})$ porque es el área del espectro donde todos los componentes del agua absorben menos, de manera que con éstos productos es posible delimitar aguas costeras de aguas oceánicas (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011; Callejas-Jiménez *et al.*, 2012).

Para la WAP, son escasos los trabajos documentados en cuanto a delimitación de regiones (Spalding *et al.*, 2007). Sumado a lo anterior, el problema de la falta de gradientes marcados en SST, así como la alta cobertura de nubes o el suministro de luz restringido a uno pocos meses del año, son aspectos que se deben considerar a la hora de establecer la delimitación de regiones. Pese a ello, estas limitaciones pueden ser abordadas y constituirse en una herramienta para el entendimiento de los procesos biológicos, químicos, ópticos y físicos que gobiernan áreas como éstas.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue delimitar regiones dinámicas (RBGDs) en el EG, a partir de una aproximación multisensor (con el MODIS-Aqua, el MODIS-Terra y el VIIRS), lo cual permite contar con mayor número de píxeles con información. Además, el uso del $a_{ph(443)Sat}^*$, representativo de procesos biológicos y a la FOD_{Sat} , por ser la propiedad de la columna de agua en la que ocurre la fotosíntesis (Kirk, 2011), así como de la SST_{Sat} , deja de lado los bajos gradientes de SST y permite considerar la influencia de los procesos físicos que modulan a los procesos biológicos para delimitar el EG.

1.2. Metodología

Una matriz de datos de $Chl-a_{Sat}$, SST_{Sat} , Kd_{490Sat} y propiedades ópticas inherentes ($a_{ph(443)Sat}$) se generó para el EG (Fig. 1.1), a través de composiciones mensuales multisensor del mes de enero de 2017 y enero de 2018. El total de imágenes utilizadas para obtener las compuestas fue de 9576 imágenes de los sensores MODIS-Aqua, el MODIS-Terra y el VIIRS. Para cada sensor se procesaron pases en Local Area Resolution (LAC 1 km pixel size), usando los algoritmos estándar en el SEADAS 7.5. Los datos para este procesamiento fueron obtenidos <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> y se consideraron las banderas de

calidad marcadas en los reprocesamientos MODIST_v2014.0, MODISA_v2014.0, MODIS-Aqua, MODIS-terra, VIIRS, con resolución espacial de 1 km/Pixel (LAC).

Las composiciones mensuales se elaboraron de acuerdo con los criterios de Kahru *et al.* (2012; 2015) y con estas se construyeron matrices para cada enero con las siguientes variables seleccionadas: ópticas:

$$a^*_{ph(443)Sat} = \frac{a_{ph(443)sat}}{chl-a_{sat}} \quad \text{Eq. (1)}$$

Donde $a^*_{ph(443)Sat}$, corresponde a la absorción específica del fitoplancton. Por otro lado, como variables físicas se consideró a la compuesta de SST_{Sat} , y a la razón:

$$FOD_{Sat} = \frac{1}{Kd_{490}} \quad \text{Eq. (2)}$$

A partir de cada matriz de datos originales se extrajeron los pixeles de cada compuesta, los cuales se seleccionaron con base en la retícula de estaciones muestreadas en enero de 2017 y enero de 2018 (Fig. 1) (Matriz M1).

Para identificar las regiones en el EG, la Primera Función Empírica Ortogonal Estandarizada ($SEOF_1$) fue calculada al combinar los datos de $a^*_{ph(443)Sat}$, SST_{Sat} y FOD_{Sat} (Santamaría-del-Ángel *et al.* 2011), este proceso consistió en:

a) Estandarizar las variables con la transformación Z (Matriz M2), la cual se considera como:

$$Z = \frac{(X_i - \bar{X})}{SD_x} \quad \text{Eq. (3)}$$

donde X_i , representa el valor de cada observación por variable, $\bar{X}$ y SD_x , corresponden al promedio y la desviación estándar de la variable.

b) Con la matriz de datos estandarizada (Matriz M2), se agruparon las variables que mostraron patrones de variación simultáneos, a través del coeficiente de correlación lineal de Pearson (Matriz M3):

$$r_{Pearson} = \frac{Cov_{AB}}{SD_A * SD_B} \quad \text{Eq. (4)}$$

Cov_{AB} , corresponde a la covariancia de las variables A y B; SD_A y SD_B , a las desviaciones estándar de A y de B; r_{Person} , representa el porcentaje del total de variabilidad de los datos que pueden ser explicados por el modelo (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011).

c) Resuelta la matriz ortogonalmente (M3) se definieron los valores propios (eigenvalores) y los vectores propios (eigenvectores) para realizar la delimitación del EG; los eigenvectores de la $SEOF_1$ son expresados como un polinomio de primer grado de orden j; como:

$$SEOF_1 = -1[* (b_{a^*_{ph(443)Sat}} * Z_{a^*_{ph(443)Sat}}) + (b_{SSTS_{Sat}} * Z_{SSTS_{Sat}}) + (b_{FODS_{Sat}} * Z_{FODS_{Sat}})] \quad \text{Eq. (5)}$$

Donde $b_{a^*_{ph(443)Sat}}$, $b_{SSTS_{Sat}}$ y $b_{FODS_{Sat}}$ corresponden a las contribuciones de las variables y $Z_{a^*_{ph(443)Sat}}$, $Z_{SSTS_{Sat}}$ y $Z_{FODS_{Sat}}$, a las variables estandarizadas. Así, la $SEOF_1$, es la mejor combinación numérica de las tres variables y explica el mayor porcentaje de la variabilidad del eigenespacio; los valores numéricos de la $SEOF_1$, son adimensionales y permiten la definición de límites entre regiones (Callejas-Jiménez *et al.*, 2012). Estos valores se agruparon de acuerdo con el número de desviaciones estándar, por ello en este trabajo el cero de la $SEOF_1$ permitió separar áreas con anomalías espaciales positivas de áreas con anomalías espaciales negativas y fueron la base para definir las regiones del EG, porque involucra a todos los componentes del polinomio que operan en el promedio. Finalmente, la $SEOF_1$, se graficó en el Ocean Data View para identificar el número de regiones en cada periodo analizado (enero de 2017 y enero de 2018).

1.3. Resultados

En enero de 2017 se delimitaron cinco regiones (Fig. 1.1) mientras que, en enero de 2018, fueron seis (Fig. 1.2). Los límites de las regiones identificadas se establecieron con base en el valor cero “0” de la $SEOF_1$, ya que este valor considera a todos los componentes del polinomio que operan en el promedio y hace la diferencia entre regiones.

En enero de 2017, se delimitaron dos regiones en el norte del EG, denominadas como región Danco; entre la costa noreste de Danco y el centro del EG y la región Brabant ubicada entre el centro y noroeste de Isla Brabant. Otras dos regiones se identificaron entre el centro y el sur del EG, a las que se les denominó Advord-Flandres porque abarcó las bahías de Advord y Flandres en el sureste y la región Neumeyer en la costa oriental de la Isla Anvers. A la última región delimitada en el Estrecho de Bismarck al sur del EG, se identificó con el mismo nombre (Fig. 1.1).

Las regiones Danco y Advord-Flandres están influenciadas por la dinámica costera de los fiordos y glaciales ubicados en la costa este del EG, mientras que las regiones Brabant, Neumeyer y Bismarck lo están por la dinámica oceánica del mar de Bellingshausen.

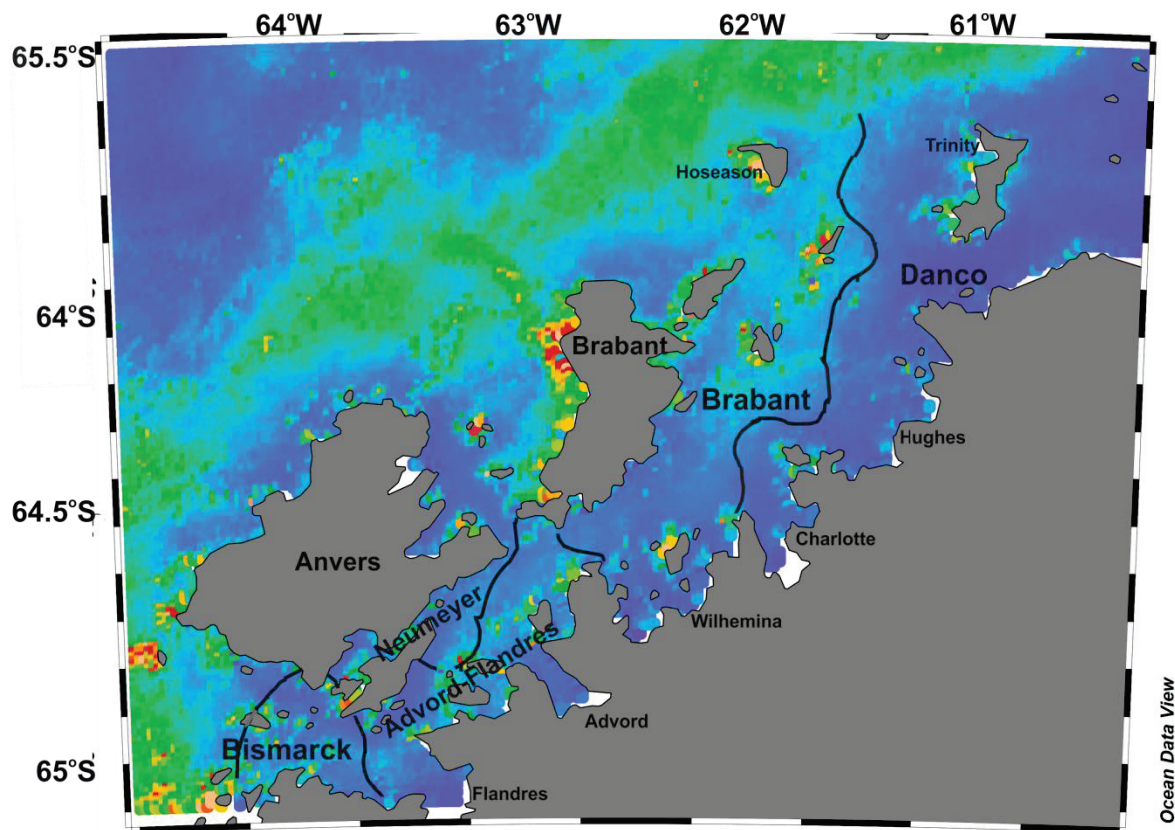


Figura 1.1. Regiones delimitadas durante enero de 2017 en el EG a partir de compuestas multisensor de temperatura superficial del mar (SST_{Sat}), así como variables de color derivadas: coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a^*_{ph(443)Sat}$) y primera profundidad óptica (FOD_{Sat}).

La Región Danco, fue la única región en la cual se identificó que las tres variables analizadas operaron por arriba del promedio (Tabla 1.1), con los valores de $Chl-a_{Sat}$ y SST_{Sat} más bajos (0.31 mgm^{-3} ; 0.63°C) y el valor más alto de FOD_{Sat} (15.08 m). Brabant que se delimitó al costado oeste de Danco, también registró valores de FOD_{Sat} altos, además en promedio tuvo la SST_{Sat} más alta (1.18°C). Advord-Flandres que se ubicó entre el costado oriental de la Isla Wiencke y la costa sureste, registró valores del $a^*_{ph(443)Sat}$ altos (Tabla 1.1). De otro lado, Neumeyer se ubicó del lado opuesto de Advord-Flandres, en la costa este de la Isla Anvers. En Neumeyer, se observaron los valores más bajos de FOD_{Sat} (9.09 m), el valor más alto de $a^*_{ph(443)Sat}$ (0.16) y el segundo valor después de Bismarck en concentración de $Chl-a_{Sat}$ (0.43 mg/m^3). Por último, la región Bismarck, se localizó entre la costa de la Península de Kiev y el sur de la Isla Anvers; esta región reportó las concentraciones promedio más altas de $Chl-a_{Sat}$, mientras que del $a^*_{ph(443)Sat}$ fueron bajos (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a^*_{ph(443)Sat}$), primera profundidad óptica (FOD_{Sat}), temperatura superficial del mar (SST_{Sat}) y concentración de Chl-a (mg/m³), derivados de compuestas multisensor satelitales en las regiones delimitadas en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017.

2017	Danco				Brabant			
	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD
$a^*_{ph(443)Sat}$	0.07	0.11	0.10	0.01	0.05	0.13	0.10	0.01
FOD _{Sat}	13.12	17.86	15.07	1.63	10.48	15.19	12.20	0.91
SST _{Sat}	0.00	1.80	0.63	0.35	0.60	1.95	1.18	0.34
Chl-a _{Sat}	0.20	0.47	0.31	0.09	0.29	0.60	0.39	0.07
	Advord				Neumeyer			
	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD
$a^*_{ph(443)Sat}$	0.08	0.58	0.12	0.09	0.08	1.15	0.16	0.18
FOD _{Sat}	6.94	15.48	9.46	2.19	3.06	11.76	9.09	2.62
SST _{Sat}	0.60	1.20	0.88	0.23	0.45	1.20	0.74	0.19
Chl-a _{Sat}	0.16	0.53	0.39	0.09	0.16	0.53	0.43	0.09
	Bismarck							
	Min	Max	Prom	SD				
$a^*_{ph(443)Sat}$	0.02	0.18	0.10	0.01				
FOD _{Sat}	3.91	14.12	10.92	2.75				
SST _{Sat}	0.45	1.50	0.91	0.34				
Chl-a _{Sat}	0.26	1.30	0.47	0.28				

Para describir la dinámica de las regiones delimitadas, la regionalización se realizó para el mismo periodo (verano austral- en enero) pero de 2018. A diferencia del año anterior, en enero de 2018 una región adicional, denominada como Crocker fue delimitada en el noroeste del Estrecho (Fig. 1.2). Danco se redujo hacia la costa este, Brabant ocupó la mayor parte del sector norte del Estrecho y se ubicó entre Danco y Crocker; Advord-Flandres se redujo en el sur de la Isla Wiencke hacia el este de la costa; Neumeyer se amplió hacía el este de norte a sur y Bismarck se amplió hacia el suroeste de la Isla Anvers.

Las regiones delimitadas al norte (Danco, Brabant y Crocker), presentaron los valores más altos de FOD_{Sat} (Tabla 1.2). Un aspecto importante a observar es que en las regiones Danco y Advord-Flandres el patrón de variabilidad fue opuesto con respecto al periodo 2017, es decir el patrón de anomalías se invirtió. De igual modo, las regiones del sur (Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck) registraron al igual que en 2017 las concentraciones más altas de Chl-a_{Sat}, las más bajas SST_{Sat} y Neumeyer mantuvo el valor del $a^*_{ph(443)Sat}$ más alto (Tabla 1.2).

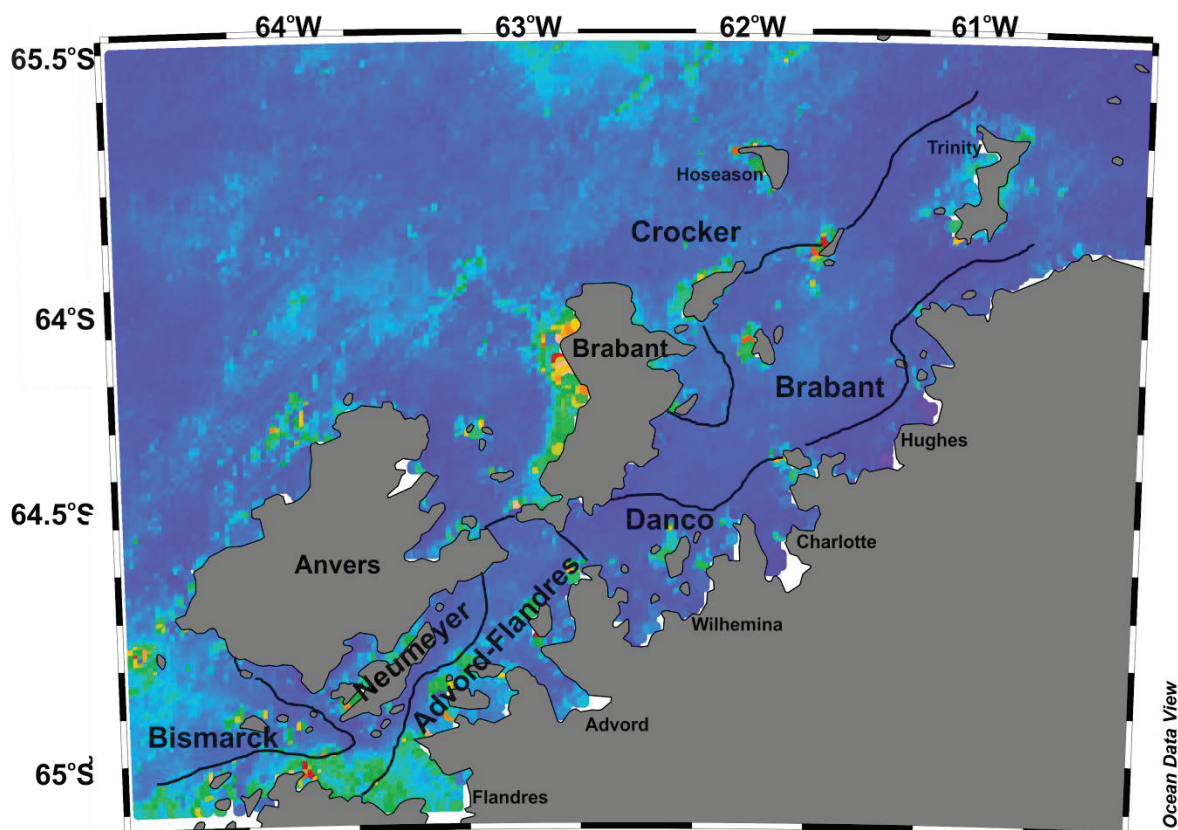


Figura 1.2. Regiones delimitadas durante enero de 2018 en el Estrecho de Gerlach a partir de compuestas multisensor de temperatura superficial del mar (SST_{Sat}), así como variables de color derivadas: coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a^*_{ph(443)Sat}$) y primera profundidad óptica (FOD_{Sat}).

Tabla 1.2. Coeficiente de absorción específico del fitoplancton ($a^*_{ph(443)Sat}$), primera profundidad óptica (FOD_{Sat}), temperatura superficial del mar (SST_{Sat}) y concentración de Chl-a (mg/m^3), derivados de compuestas multisensor satelitales en las regiones delimitadas en el Estrecho de Gerlach durante enero de 2018.

2018	Danco				Brabant			
	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD
$a^*_{ph(443)Sat}$	0.09	0.12	0.10	0.00	0.08	0.13	0.11	0.01
FOD_{Sat}	10.66	20.16	15.57	1.84	12.92	19.50	15.16	1.14
SST_{Sat}	0.54	1.65	0.64	0.54	-0.15	1.35	0.70	0.31
$Chl-a_{Sat}$	0.03	0.33	0.24	0.03	0.20	0.37	0.29	0.03
	Advord				Neumeyer			
	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD
$a^*_{ph(443)Sat}$	0.04	0.13	0.09	0.01	0.05	0.33	0.13	0.04
FOD_{Sat}	4.44	11.39	8.06	2.39	6.30	16.12	11.40	2.96
SST_{Sat}	0.30	1.35	0.66	0.34	-0.15	0.90	0.48	0.27
$Chl-a_{Sat}$	0.32	0.89	0.51	0.19	0.21	0.58	0.35	0.10

	Bismarck				Crocker			
	Min	Max	Prom	SD	Min	Max	Prom	SD
$\alpha^*_{ph(443)Sat}$	0.04	0.17	0.09	0.01	0.08	0.11	0.10	0.00
FOD _{Sat}	5.21	14.41	12.08	2.35	13.81	18.93	16.03	1.61
SST _{Sat}	0.15	1.05	0.77	0.24	0.15	0.75	0.39	0.19
Chl-a _{Sat}	0.27	1.30	0.47	0.24	0.23	0.37	0.28	0.04

En el capítulo II a partir de datos hidrográficos, de macronutrientes inorgánicos disueltos y grupos del fitoplancton se describe la variabilidad entre las regiones identificadas en cada periodo estudiado.

1.4. Discusión

El resultado obtenido con la aproximación multisensor, como propuesta nueva para delimitar regiones permitió resolver la problemática de la cobertura de nubes, porque se garantizaron imágenes con mayor número de píxeles válidos o con información de las variables a analizar. La ventaja de utilizar la combinación de tres sensores distintos para obtener una imagen compuesta por cada variable analizada, permitió contar con información completa para todo el EG, en particular para enero de 2018 que se caracterizó por mayor cobertura de nubes. Además, con productos nuevos de color del océano se sortearon los bajos gradientes de SST y se incorporó información de otras variables representativas de procesos biológicos y físicos para definir las fronteras entre regiones. Por otro lado, al utilizar imágenes con resolución espacial de 1 km de píxel, se omitió enmascarar las regiones en un área tan pequeña y de alta complejidad como el EG.

Las variables seleccionadas para delimitar las regiones en este trabajo y describir su variabilidad con el análisis de $SEOF_1$, permitieron explicar la integración de las características biológicas y ópticas con las físicas en el EG. Además, mostró que el proceso puede realizarse con más de dos variables predictoras. Por lo anterior, la aproximación multisensor constituye una herramienta de utilidad práctica para entender que la dinámica interna del EG responde a procesos físicos, biológicos, químicos y ópticos que no se distribuyen de manera uniforme, en donde la magnitud de los parámetros en cada región responde a procesos internos y no a las interacciones entre regiones (IOCCG, 2009).

Por ejemplo, las regiones delimitadas al norte (Danco, Brabant y Crocker) están dominadas por la influencia de masas de agua del régimen del Estrecho de Bransfield (Torres *et al.*, 2020), mientras que las del sur (Andvord-Flandres, Neumeyer y Bismarck), por la masa de agua mUCDW y del mar de Bellingshausen (García *et al.*, 2002; Sangra *et al.*, 2014; Lundesgaard *et al.*, 2020; Torres *et al.*, 2020). Otro aspecto que se observó, fue que las regiones del norte están separadas de las del sur por un frente térmico que se ubicó a la altura del Canal Shollaert. Esta estructura, se genera por efectos de la fricción lateral e inferior que favorece el transporte Ekman (Pond y Pickard, 1983) en el norte del EG (Torres *et al.*, 2020).

La naturaleza dinámica de las regiones, se observó en la migración de los límites entre enero de 2017 y enero de 2018. En 2018 por ejemplo, la región Danco se redujo en extensión hacia la costa y el

cambio estuvo asociado a la respuesta del entorno físico, químico, biológico y óptico que caracterizó a cada periodo analizado (ver tabla 1.1 y capítulo II). Particularmente en enero de 2017, se caracterizó por presentar temperaturas más altas (da Cunda *et al.*, 2018; Torres *et al.*, 2020), respecto a 2018.

Por lo tanto, desde el punto de vista físico las diferencias en la amplitud de las regiones en 2017 y 2018, se puede atribuir por ejemplo a la variabilidad del Módulo Anular del Sur (SAM) en sus fases positivas y negativas; aspecto documentado por varios estudios en la región (Shofield *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2018; Ruiz-Barlett *et al.*, 2018; Santamaría-del-Ángel *et al.*, en preparación). Se conoce que el SAM afecta las fracciones del agua mUCDW que ingresan por el Estrecho de Bismarck, pero que restringen su ingreso al EG por la batimetría a la altura de Bahía Flandres (Torres *et al.*, 2020). En consecuencia, las regiones Advord-Flandres y Neumeyer estuvieron poco influenciadas durante 2017 (fase negativa del SAM) en comparación con 2018 (fase positiva del SAM) por la mUCDW.

Las regiones Danco y Brabant, también se ven afectadas por la disminución de la fracción de mUCDW que ingresa por el Canal Schollaert y por el norte de la isla de Lieja, lo que favorece la intrusión de aguas de fondo como la Transicional del Mar de Weddel (TWW) a través de las cuencas profundas ubicadas al norte del Estrecho (Ruiz-Barlett *et al.*, 2018). Sumado a lo anterior, Zou *et al.* (2002) demostraron que la fuerza del viento, modulado por el SAM (Saba *et al.*, 2014; Torres *et al.*, 2020) y el transporte de Ekman son mecanismos locales importantes al interior del EG que influyen el flujo del mUCDW.

La regionalización del EG, además coincide con los cambios en la batimetría, la geometría de las bahías y el tamaño de las cuencas de drenaje al interior de este (Evans *et al.*, 2004). En Danco, por ejemplo, la extensión de la región abarcó las bahías y fiordos de la costa noreste del EG, desde el suroeste de la bahía Wilhemina e incluyó a las bahías Charlotte y Hughes hasta el noreste del Estrecho Orleans, con profundidades menores a 300 m (Kerr *et al.*, 2018). En esta región, el flujo superficial de masas de aguas que predomina es hacia el noreste con bajas concentraciones de nitratos y fosfatos, temperaturas >2°C y con eventos productivos en inmediaciones de Bahía Hughes (Domack y Ishman, 1993). La configuración de sus bahías alberga glaciares de gradiente longitudinal variable más extensos que los de la región Neumeyer, razón por la cual las áreas de fusión son mayores (William *et al.*, 1989).

Por el contrario, Brabant se delimitó en la región central del EG hacia la costa oriental de la Isla Brabant y desde el suroeste de la Isla Brabant hasta el norte la Isla Two Hummock, es la región que presentó en promedio la batimetría más profunda con 500 m en el suroeste hasta 1200 m alrededor de las Islas Liege y Two Hummock (Evans *et al.*, 2004). A diferencia de Danco, la geometría de las bahías de Brabant es menos accidentada y los tamaños son más reducidos (William *et al.*, 1989); esta configuración determina menores aportes de aguas de deshielo. Las fuentes de enriquecimiento de nutrientes (Hudson *et al.*, 2019), esta disminuida en las capas superficiales y los tiempos de residencia de las masas de agua son menores por procesos de mayor circulación (Cape *et al.*, 2019) en comparación con las regiones delimitadas del sur.

En consecuencia, los florecimientos del fitoplancton no son tan significativos en la región Brabant (RB) en comparación con las del sur. Su amplitud en 2018 hacia el este, fue favorecida por el menor aporte del agua de deshielo de los fiordos y bahías de la Región Danco, el cual fue mayor en 2017 como consecuencia de los aumentos de temperatura atmosférica y oceánica reportados para ese año (Blunden y Arnt, 2018).

En Advord-Flandres, región que se extendió desde el Canal Schollaert hacia el suroeste rodeando el lado este de la Isla Wienche hasta el sur de la Bahía Flandres, en 2017 registró mayor extensión en comparación con 2018. El cambio en el límite está asociado a la mayor contribución de aguas de deshielo de los glaciares ubicados en Flandres y Advord (Pan *et al.*, 2019). Estas aguas contribuyen con la modificación de las características físicas y químicas en las capas superficiales (Jenkins y Jacobs, 2008), por ejemplo, en la dinámica de macronutrientes y hierro (Dinniman *et al.*, 2011; Hudson *et al.*, 2019) y en la productividad biológica (Clarke, 2008).

De acuerdo con Pan *et al.* (2019), los glaciares al interior de la bahía Advord aportan entre el 2.5 al 3 % de aguas de deshielo en enero, con baja concentración de partículas (10 mg/L), sin afectar significativamente el campo de luz subacuática (Hernando *et al.*, 2015). Por lo tanto, la estratificación de la columna de agua aumenta hasta la zona fótica y junto con la baja influencia del viento (Lundesgaard *et al.*, 2020), hacen que se cree el ambiente ideal para el crecimiento del fitoplancton (Pan *et al.*, 2019).

En esta región, por la configuración de su plataforma, se inhibe la influencia directa del agua cálida mUCWD por lo que predominan aguas relativamente frías (Lundesgaard *et al.*, 2020). Temperaturas bajas se observaron en los datos de la serie de SST_{Sat}, en comparación con las demás regiones durante enero de 2017 y enero de 2018 (Fig 1.2 y 1.3). Además, la circulación superficial está dominada por una corriente que fluye hacia el noreste (Beardsley *et al.*, 2004); y la presencia de los canales Ehrre y Aguirre contribuyen con fuertes flujos de marea. En consecuencia, en Advord-Flandres se mantienen regímenes de mezcla más activos o de alta energía cinética turbulenta hasta de 10^{-6} Wkg⁻¹, proporcionando un mecanismo de suministro de nutrientes (Lundesgaard *et al.*, 2020).

Durante 2017, la variabilidad de la temperatura en la columna de agua superior fue alta porque excedió los 2.0 °C (Lundesgaard *et al.*, 2020, Torres *et al.*, 2020) y superó el valor promedio característico del Agua Superficial Antártica (AASW) (Klinck *et al.*, 2004). Este cambio en la temperatura, explica la variación del límite de la región observado en enero de 2017 con respecto a enero de 2018.

Por otro parte, Neumayer ubicada al oeste de la Isla Wiencke ocupó la mayor parte del Canal Neumayer. La extensión del Canal Neumayer es de 3 a 4 km de ancho y alcanza menos de 400 metros de profundidad (Evans *et al.*, 2004). Esta región también está influenciada por el frente hidrográfico que se ubica sobre el Canal Schollaert (García *et al.*, 2002). Por lo tanto, la estructura térmica que caracteriza a este frente separa a las regiones del sur de las regiones del norte. De acuerdo con Pan *et al.* (2019), en esta región la incidencia del agua mUCDW esta dada por la conexión que tiene la región con el mar de Bellingshausen a través del Canal Schollaert. Lo anterior, explica la mayor temperatura de Neumayer en comparación con Advord-Flandres, tanto en enero de 2017 como en enero de 2018.

En Bismarck, con profundidades entre 200 y 1000 m (Isla *et al.*, 2002), las condiciones favorables de mayor productividad estan dadas por la contribución de la mUCDW (Hudson *et al.*, 2019) y por procesos de afloramiento que determinan mayor contribución de macronutrientes (Cape *et al.*, 2019). Por lo anterior, en esta región predominan aguas más frías en la superficie y por debajo de la piconclina más cálidas y saladas, lo que conlleva la estratificación en la columna de agua. Esto genera cambios temporales en las concentraciones de oxígeno y nutrientes afectando la productividad del sistema (Kerr *et al.*, 2018).

Crocker delimitada durante el 2018 y fusionada con la Brabant durante 2017, esta ubicada en la zona más profunda del EG en comparación con las demás, en el sector Noroeste sobre el Paso Crocker, el cual tiene alrededor de 1000 a 1200 m (Evans *et al.*, 2004). En particular esta región actua como sumidero de partículas, debido a su alta dinámica, con una capa eufótica menos productiva (Isla *et al.*, 2002) en comparación con las demás.

1.5. Conclusiones

La aproximación multisensor permitió delimitar regiones dinámicas en un área pequeña, de gran complejidad, caracterizada por la alta cobertura de nubes y además con bajos gradientes en superficie de SST. La fortaleza de la aproximación está dada por la combinación de tres espectroradiómetros, así como por el uso de variables distintas ($a^*_{ph(443)Sat}$, FOD_{Sat}) a las tradicionales (SST y Chl-*a*). Esto permitió contar con matrices de datos cuya cantidad de pixeles con información fue mayor, con lo que se evitó que las regiones se enmacararan, además de definir las fronteras y confirmar que es posible regionalizar áreas pequeñas.

En el Estrecho de Gerlache se identificaron seis regiones, las cuales responden a la dinámica interna de cada región, sin embargo, en respuesta a la variabilidad climática regional como fue el caso del 2017 algunas de estas se fusionan, como por ejemplo Crocker y Brabant. Por ello, es necesario extender las observaciones a series de tiempo más largas para evaluar la influencia de la variabilidad regional en los límites de las regiones identificadas.

Este trabajo demuestra la utilidad práctica de los sensores remotos para el monitoreo y gestión de espacios de difícil acceso y cobertura como la Antartida, que puede además ser implementada en regiones tropicales donde los gradientes no solo de temperatura sino también de Chl-*a* limitan la posibilidad de utilizar este tipo de aproximación para la división de áreas marino-costeras. Por lo tanto, la aproximación multisensor constituye una alternativa en los procesos de planificación espacial marina, para delimitar áreas pequeñas y complejas, de manera el esquema de las regiones permita definir prioridades, así como planificar su manejo y conservación.

Capítulo 2

Variabilidad espaciotemporal de las condiciones hidrográficas, químicas y de la estructura de la comunidad fitoplanctónica del Estrecho de Gerlache durante enero de 2017 y enero de 2018

Resumen

En este capítulo, se presenta el análisis de datos hidrográficos, de macronutrientes inorgánicos disueltos y de grupos fitoplanctónicos, recopilados durante dos Expediciones en la Antártida en enero de 2017 y enero de 2018. Los datos de las Expediciones validaron las regiones dinámicas definidas en el capítulo I, en el Estrecho de Gerlache (EG). Análisis estadísticos determinaron que todas las regiones son diferentes por la variabilidad de las condiciones hidrográficas, químicas y biológicas, además mostraron diferentes asociaciones entre variables, regiones y periodos estudiados. Por ejemplo, en las regiones del sur predominaron temperaturas superficiales bajas, bajos macronutrientes y dominaron las diatomeas junto con los flagelados verdes. Por el contrario, en las regiones del norte las temperaturas superficiales fueron más altas, las concentraciones de macronutrientes aumentaron y los grupos del fitoplancton que dominaron fueron dino₂/diato₂, las criptofitas y *Phaeocystis antarctica*. Además, modelos de regresión de Si: N y N: P demostraron que cada región configura regiones bioquímicas únicas. Estos modelos mostraron que las razones de asimilación fueron mayores en los primeros 100 m de la columna de agua respecto a 200 m, lo cual se atribuyó a la respuesta de la actividad biológica asociada a la dinámica de la zona eufótica. Los datos de campo demostraron que los cambios en la estructura hidrográfica, en la concentración de macronutrientes inorgánicos disueltos, en las razones de asimilación Si: N y N: P, así como el cambio en la estructura de la comunidad fitoplanctónica, determinaron características físicas, químicas y biológicas únicas que confirman la regionalización del EG en regiones dinámicas, contiguas, autónomas, propias e independientes.

2.1. Introducción

La variabilidad hidrográfica, de nutrientes y grupos fitoplanctónicos en la Península Oeste Antártica (WAP, por su sigla en Inglés) ha sido objeto de varias investigaciones (Rodríguez *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2002; Zou *et al.*, 2002; Mendes *et al.*, 2012; Saba *et al.*, 2014; Shofield *et al.*, 2017; da Cunha *et al.*, 2018; Torres *et al.*, 2020), debido a que ha sido señalada como una de las regiones del mundo más susceptible al cambio climático (Turner *et al.*, 2005, 2016; Meredith y King, 2005, 2013; Henley *et al.*, 2020) y representa una región de importancia ambiental a nivel global, por lo que su afectación implica cambios en las redes tróficas y en la estructura de la comunidad fitoplanctónica (Moline *et al.*, 2004, 2008; Saba *et al.*, 2014; Mendes *et al.*, 2013, 2018; Shofield *et al.*, 2017). Es así como la interrelación de procesos físicos

y químicos juegan un papel importante en la estructura de la comunidad del fitoplancton y esto hace que se definan áreas continuas pero diferenciadas, porque la respuesta biológica no es igual en todo el océano (IOCCG, 2009).

Pocos trabajos sobre divisiones de áreas costeras en la WAP han sido realizados (Spalding *et al.*, 2007). Debido a su alta dinámica, la cual esta influenciada por la presencia de vientos del oeste y la circulación oceánica asociada (Sangra *et al.*, 2014), se pensaría que estas divisiones cuyos límites son dinámicos se pueden llegar a presentar. En el primer capítulo de este trabajo la división del EG, definió seis regiones dinámicas en 2018 y cinco en 2017. Por ello, contar con datos hidrográficos, de nutrientes, pigmentos y grupos del fitoplancton de dos Expediciones oceanográficas realizadas en enero de 2017 y 2018, permiten confirmar la delimitación del EG en regiones y describir la variabilidad de éstas.

Estudios como el de Saba *et al.* (2014) y los de Kim *et al.* (2016, 2018), han documentado periodos de incrementos de la biomasa fitoplanctónica que se dan de cuatro a seis años para la WAP. Estos eventos son modulados por fenómenos de mesoescala como el Niño y el Modo Anular del Sur (SAM) (Kim *et al.*, 2016). Para el caso particular del EG, mediante un análisis de variabilidad climática realizado con una serie de datos de temperatura superficial del mar de 20 años, a través de una aproximación multisensor y análisis de correlación, se determinaron episodios cálidos y fríos; en la serie 2002 a 2020, el 2017 fue el año más cálido (1.5°C) y el 2018 el más frío (-0.3°C) (Santamaría-del-Ángel *et al.*, en preparación).

En consecuencia, la dinámica física, de ciclos químicos y biológicos en las regiones delimitadas al interior del EG, puede estar afectada por esta variabilidad climática. Recientemente, Torres *et al.* (2020) describieron las condiciones hidrográficas para uno de los periodos analizados en este estudio (enero de 2017). Estos autores, encontraron aguas intermedias hasta los 80 m y profundas por debajo de los 300m. Por tanto, la comunidad fitoplanctónica debe responder a esta dinámica (Varela *et al.*, 2002; Ferreira *et al.*, 2018). De otro lado, Kim *et al.* (2016) estudiaron la dinámica de nutrientes basado en una serie de tiempo de 20 años de información del programa de investigación Palmer. Esta dinámica fue asociada a factores climáticos, aportes de agua de deshielo, mezcla vertical, control biológico. De acuerdo con Isla *et al.* (2002), al interior del EG la magnitud de los factores descritos por Kim *et al.* (2016) puede cambiar en respuesta a la configuración batimétrica del EG.

Además, el EG ha sido definido como un área con amplia variación espacio-temporal de producción del fitoplancton, altas concentraciones de clorofila-a (Chl-a), aguas estratificadas con alta concentración de partículas en las entradas del EG y baja penetración de la luz (Figueroa, 2002). De otro lado, Varela *et al.* (2002), definieron al EG como un área dominada por diatomeas; sin embargo, trabajos recientes (Schofield *et al.*, 2017; Mendes *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2018), sugieren que la estructura de la comunidad fitoplanctónica está cambiando por flagelados pequeños como las criptofitas.

Aunque los procesos físicos, químicos y biológicos ahora son mejor entendidos en la WAP, poco se sabe sobre la variabilidad de estos en las regiones delimitadas en el EG. Por ejemplo, en áreas adyacentes al EG como bahía Margarita ubicada al sur o el Estrecho de Bransfield al norte, la dinámica hidrográfica y de nutrientes ha sido objeto de mayor número de investigaciones (Sangra *et al.*, 2011; Saba

et al., 2014; Mendes *et al.*, 2012; Rozema *et al.*, 2017; Henley *et al.*, 2019). Sin embargo, al interior de EG es menos documentada. Por lo anterior, en este capítulo se valida a partir de datos hidrográficos, químicos y biológicos, tomados en dos Expediciones realizadas en enero de 2017 y enero de 2018, la regionalización dinámica del EG con productos espectralradiométricos. El objetivo entonces, es abordar la variabilidad de los patrones hidrográficos, de macronutrientes inorgánicos disueltos y de la estructura de la comunidad fitoplanctónica entre periodos, enero de 2017 y enero de 2018, así como entre regiones. De esta manera, se presenta información de referencia para entender que la dinámica en un área tan pequeña como el EG, configura patrones complejos localmente, los cuales responden a cambios interanuales.

2.2. Metodología

2.2.1. Muestreo (Expediciones Antárticas)

En el marco del Proyecto: “Investigación Científica Marina para la Seguridad Marítima en la Antártica-ICEMAN” a cargo de la Dirección General Marítima, dos Expediciones oceanográficas fueron realizadas en enero de 2017 (Expedición Almirante Padilla) y enero de 2018 (Expedición Almirante Tono) en el EG. La red de muestreo fue de 41 estaciones hidrográficas y de 30 estaciones tanto biológicas como de macronutrientes (Fig. 1). Se tomaron perfiles en la columna de agua con un equipo CTDO (Sea-Bird SBE19 plus, Sea-Bird SBE25) para registrar información de parámetros hidrográficos como conductividad, temperatura y presión, desde la superficie hasta los 200m. Adicionalmente, muestras de agua se colectaron a través de un sistema de roseta muestreadora con 12 botellas Niskin de 8L cada una; para pigmentos y grupos del fitoplancton, las profundidades de colecta de las muestras fueron la superficie y el máximo profundo de Chl-a (MPChl-a). Entre 1 a 2 L de agua se filtraron a través de filtros GF/F, con un sistema de filtración positiva, para determinar la composición y concentración de pigmentos. Los filtros se guardaron en cápsulas histoprep y en nitrógeno líquido hasta análisis en laboratorio. En la Expedición de 2018 en profundidades definidas desde la superficie hasta los 200 m, muestras de agua se tomaron para el análisis de nutrientes; mientras que, en enero de 2017, solamente en cuatro estaciones ubicadas en las regiones Danco y Brabant se mantuvo el esquema de muestreo de 2018 y en las regiones del sur se tomaron muestras únicamente en la superficie y el MPChl-a.

2.2.2. Determinación y análisis de pigmentos

En el laboratorio, la extracción de pigmentos se realizó con acetona al 100% y vitamina E como estándar interno. La separación de los pigmentos se llevó a cabo utilizando una columna Zorbax eclipse XDM C8 a una temperatura de 60°C, mediante un sistema de dos solventes A y B, siendo A el metanol al

70% con 0.028 M de acetato de tetrabutil de amonio (pH 6.5 al 60%) y el solvente B con metanol al 100% a un flujo de 1.1 ml/min (Thomas, 2012).

La abundancia relativa de los diferentes grupos del fitoplancton se determinó según Mackey *et al.* (1996). Para esto, se usó el CHEMTAX versión 1.95 y las razones iniciales (Tabla 2.1) se tomaron de trabajos para la región (Mendes *et al.*, 2012; Ferreira *et al.*, 2018). Los grupos fitoplanctónicos de entrada al programa fueron: diatomeas, dinoflagelados, *Phaeocystis antarctica*, criptofitas, flagelados verdes y el grupo quimiotaxonómico denominado como difo₂/diato₂. Las razones de entrada en el CHEMTAX para el grupo difo₂/diato₂ fueron los pigmentos Chl-*c*₃, Chl-*c*₂, 19'But-fuco, Fuco y 19'Hex-fuco. Este grupo incluye a los dinoflagelados autotróficos carentes de peridinina y a las diatomeas con Chl-*c*₃ (Wright y Jeffrey, 2006).

Tabla 2.1. a) Abreviaturas, pigmentos y grupos representados; b) Razones iniciales de pigmentos al total de Chl-*a* utilizadas en el CHEMTAX.

a)									
Abreviación	Pigmento	Grupo							
Chl- <i>a</i>	Clorofila <i>a</i>	Todos los grupos							
Chl- <i>c</i> ₂	Clorofila <i>c</i> ₂	Primnesiofitas							
Chl- <i>c</i> ₃	Clorofila <i>c</i> ₃	Primnesiofitas							
Chl- <i>b</i>	Clorofila <i>b</i>	Clorofitas, Prasinofitas							
Fuco	Fucoxantina	Bacillariophyta, Primnesiofitas							
Peri	Peridinina	Dinofitas							
19'But	19'Butanoyloxyfucoxantina	Crisofitas, Primnesiofitas							
19'Hex	19'Hexanoyloxyfucoxantina	Primnesiofitas							
Allo	Alloxantina	Criptofitas							

b)									
Grupo / Pigmento	Chl-<i>c</i>₃	Chl-<i>c</i>₂	Peri	19'But	Fuco	19'Hex	Allo	Chl-<i>b</i>	Chl-<i>a</i>
Diatomeas	0.00	0.11	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00	0.00	1.00
Dinoflagelados	0.00	0.32	0.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
difo ₂ /diato ₂	0.07	0.13	0.00	0.12	0.29	0.25	0.00	0.00	1.00
<i>Phaeocystis antarctica</i>	0.14	0.14	0.00	0.08	0.01	0.92	0.00	0.00	1.00
Criptofitas	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	1.00
Flagelados verdes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.95	1.00

2.3. Análisis de nutrientes

Los macronutrientes ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$; PO_4^{3-} y H_4SiO_4^-), se determinaron a través de un autoanalizador de flujo segmentado, siguiendo los protocolos definidos en el manual de hidrografía GO-SHIP (Hydes *et al.*, 2010).

2.4. Análisis estadístico

Con el fin de evaluar la significancia estadística de las diferencias entre las regiones delimitadas, para las variables hidrográficas, los macronutrientes y los grupos fitoplanctónicos, se utilizó el estadístico no paramétrico de Wilcoxon, suma de rangos, para muestras independientes (Wilcoxon y Wilcoxon, 1964). En esta prueba, la decisión se basa en determinar si los valores calculados están dentro de la zona definida con los valores críticos (TL, TU) (Wilcoxon *et al.*, 1970), en ese caso las regiones son iguales (se acepta la hipótesis H_0), pero si están por fuera del área de los valores críticos, la prueba indica que las regiones son diferentes (se rechaza la hipótesis H_0 , es decir se acepta H_a). El valor α que se usó fue del 5%.

Por otro lado, para determinar razones estequiométricas o de asimilación entre H_4SiO_4^- : $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ y $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$: PO_4^{3-} , se desarrollaron modelos de análisis de regresión lineal por periodo, estaciones y regiones delimitadas hasta los 200 m y 100 m. También, se determinó la significancia estadística de la razón de asimilación mediante la prueba t y del modelo mediante la prueba F de Fisher. En los dos casos (razones de asimilación y modelos), se usó un α del 2.5%. En este caso, si los valores calculados (t_{cal} y F_{cal}) son mayores que los valores críticos (t_{crit} y F_{crit}), tanto las razones como los modelos son estadísticamente significativos (se rechaza la hipótesis H_0). Se precisa indicar que, para este trabajo el N dentro de las razones calculadas corresponden a la sumatoria de las concentraciones de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ y no considera las concentraciones de NH_4^+ , porque para la WAP este macronutriente por debajo de la capa de mezcla registra bajas concentraciones durante el verano (Henley *et al.*, 2017; 2018), las cuales aumentan ($0.7 \mu\text{M}$) al final del verano hacia la capa de mezcla por procesos microbianos (Henley *et al.*, 2020). Por lo anterior, el N se reporta como ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) y no como Nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN, por su sigla en inglés).

Adicionalmente, se realizó un Análisis de Componente Principal (ACP) para determinar la asociación de las variables hidrográficas (temperatura y salinidad), químicas (macronutrientes) y biológicas (grupos fitoplanctónicos) (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011). El análisis se realizó por separado para los periodos estudiados y las regiones delimitadas, con el objetivo de identificar patrones de asociación al interior de cada región. Teniendo en cuenta que las variables tienen diferentes unidades, fue necesario estandarizar el conjunto de datos originales a través de la transformación Z, ya que esta transformación no afecta la distribución original de los datos y permite que sean numéricamente comparables (Santamaría-del-Ángel *et al.* 2011). El criterio para determinar el porcentaje de asociación de los datos por condición fueron los componentes con eigenvalores mayores a uno, debido a que se consideran significativos y expresan la variabilidad de los datos explicada por el modelo.

2.3. Resultados

2.3.1. Variables Hidrográficas

En enero de 2017, la temperatura en la columna de agua hasta los 200 m de profundidad registró valores entre -0.68°C y 3.99°C (Tabla. 2.2). La temperatura fue mayor en las regiones ubicadas en el norte (Danco y Brabant) del EG, respecto a las regiones del sur (Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck). En las estaciones E25, E26, E13 y E12 ubicadas en el centro del EG a la altura del Canal Schollaert, se observó que un frente hidrográfico representado por la isoterma de 0.5°C , separó en los primeros 50 m de profundidad, aguas frías en el sur de aguas cálidas en el norte del EG (Fig. 2.1). Sin embargo, este patrón se invirtió en aguas por abajo de los 50 m de profundidad. De otro lado, la región Brabant presentó el intervalo de temperatura (-0.68 a 3.99°C) y salinidad (33.28-35.52 UPS) más amplio en el EG. En cuanto a la profundidad de la capa de mezcla (PCM), se observó que esta varió entre 7 y 65 m, con promedios de 25 m y se encontró que fue más profunda en las regiones Advord-Flandres y en Bismarck, con 46 y 42 m respectivamente. De otro lado, la salinidad varió ente 33.3 y 35.5 UPS (Fig. 2.1) con promedios de 34.2 UPS y presentó una tendencia de incremento en los valores hacia el norte en las regiones Danco (RA) y Brabant (RB).

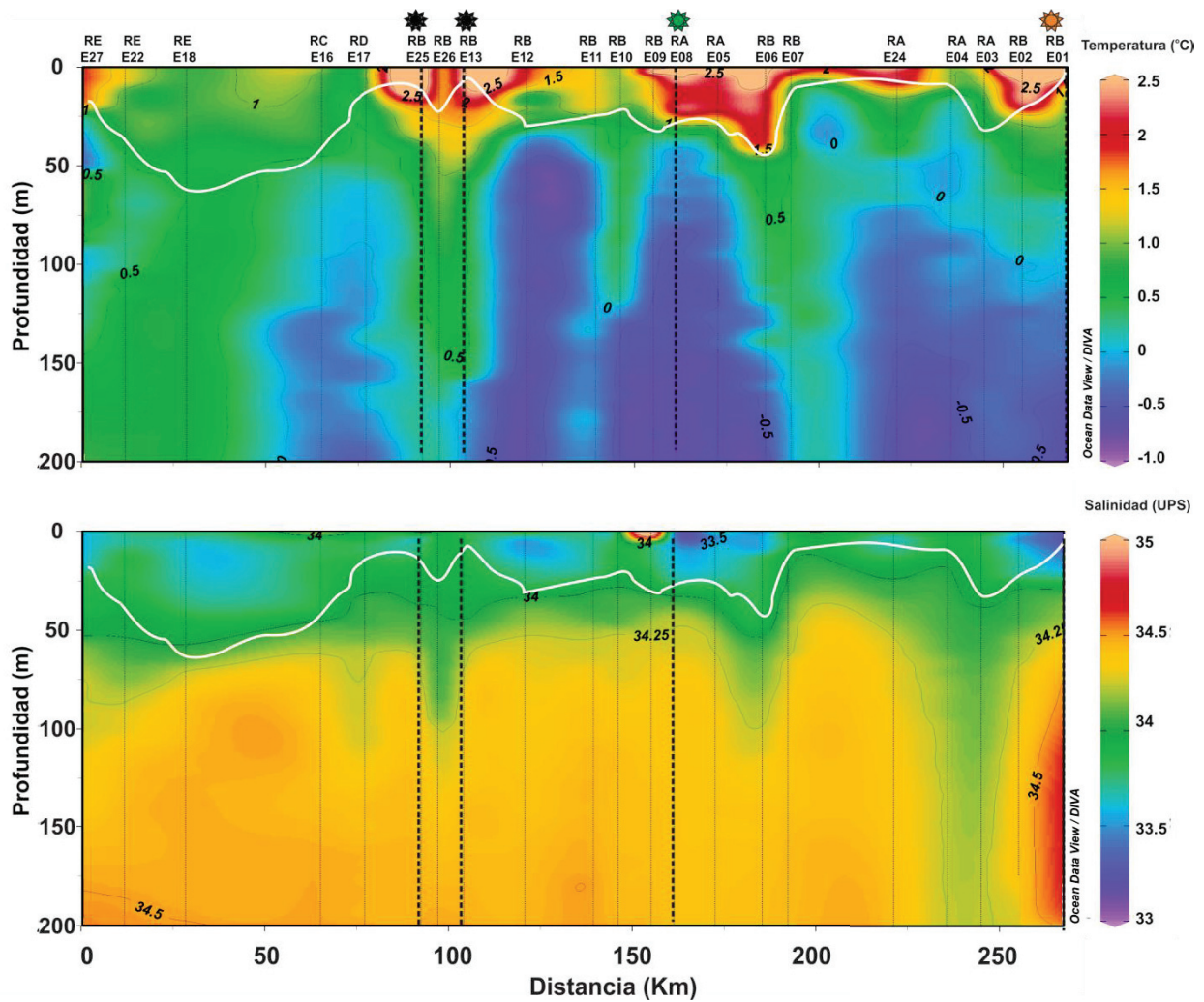


Figura 2.1. Secciones latitudinales de temperatura y salinidad en el Estrecho de Gerlache durante el 2017 desde el sur hasta el noreste en inmediaciones de la isla Trinity (300 km). Los símbolos negro, verde y naranja representan las estaciones más profundas que conectan al EG con el Mar de Bellingshausen. La línea blanca representa la profundidad de la capa de mezca; las estaciones están definidas por la letra E seguida del número de la estación y ubicadas dentro de la región a la que pertenecen: RA; Danco, RB: Brabant; RC: Advord-Flandres; RD: Neumeyer y RE: Bismarck.

La distribución de la temperatura en la PCM mostró el mismo gradiente de temperaturas frías en Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck, mientras que fue de aguas cálidas en las regiones Danco y Brabant (Fig. 2.2a). Por el contrario, el patrón observado en la distribución de salinidad fue mas homogéneo que la temperatura, con valores más altos de salinidad en Advord-Flandres que en Neumeyer y mas altas en Brabant que en Danco (Fig. 2.2c).

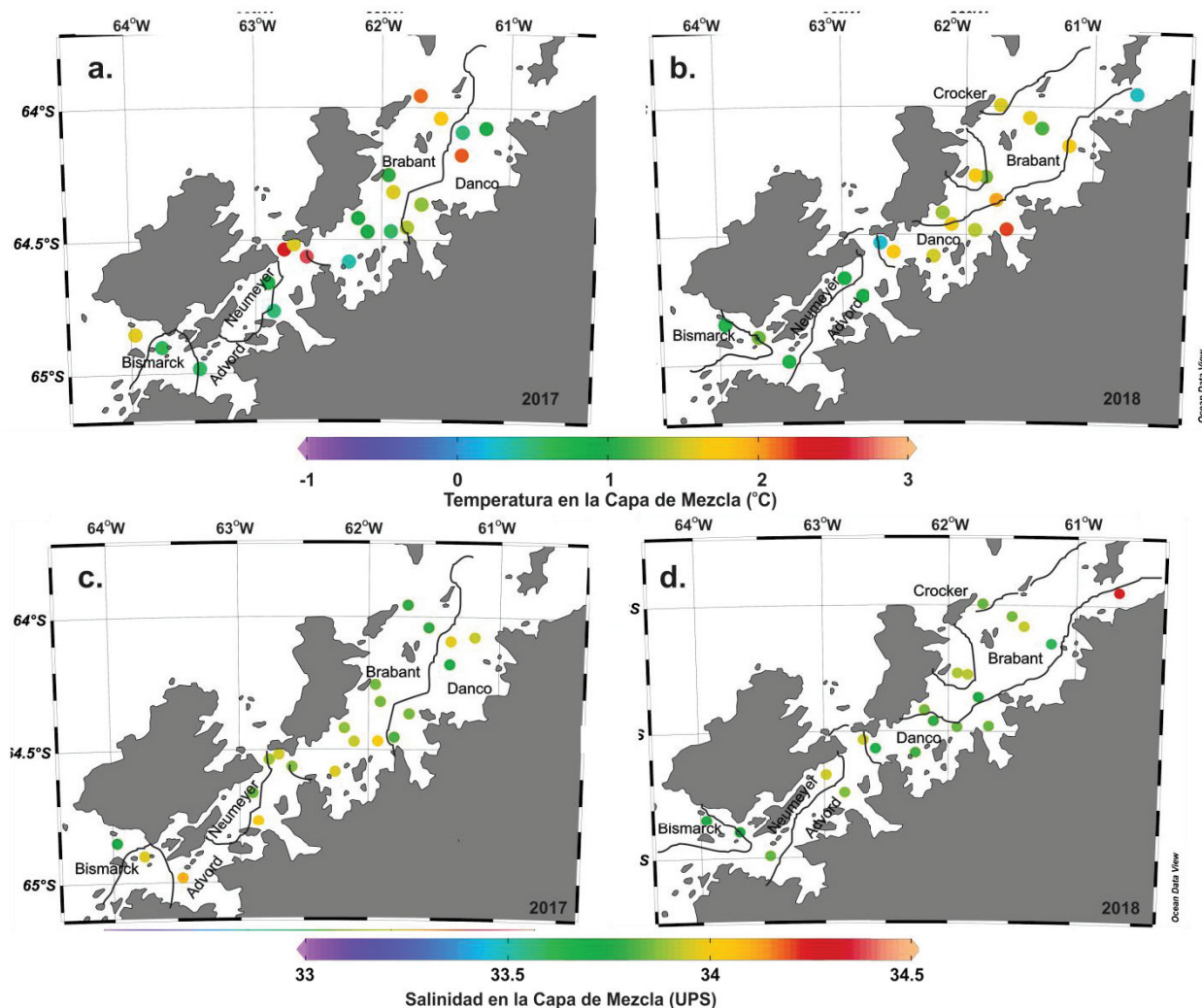


Figura 2.2. Distribución en la profundidad de la capa de mezcla de la temperatura y la salinidad en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017 (a, c) y enero de 2018 (b, d).

En enero de 2018, el intervalo de variación de la temperatura fue menor que en 2017, con valores que oscilaron entre -0.57 y 2.75°C (Fig. 2.3). Sin embargo, el patrón de distribución por arriba de los 50 m de profundidad fue similar, con temperaturas más cálidas en las regiones del norte y menores en las del sur; este patrón se invirtió por abajo de los 50 m de profundidad. El frente hidrográfico a la altura del Canal Schollaert (E26), se mantuvo, por lo que se considera es un indicador que separa en profundidad aguas

cálidas del sur, de las frías del norte. En la región Danco se mantuvo el intervalo más amplio de variación de las cinco regiones, tanto en temperatura como en salinidad. La PCM, en promedio fue menor que 2017 (14 m) y más homogénea, sin embargo, en las estaciones E03, E06 y E18 fue mayor. En cuanto a la salinidad, se observaron concentraciones menores a 34 UPS por arriba de los 50 m de profundidad (Fig. 2.3); si bien el valor promedio fue muy similar a 2017, el intervalo de variación fue menor (Tabla 2.2), aunque el patrón se invirtió para Advord-Flandres con menor salinidad respecto a Neumeyer (Fig. 2.2 d).

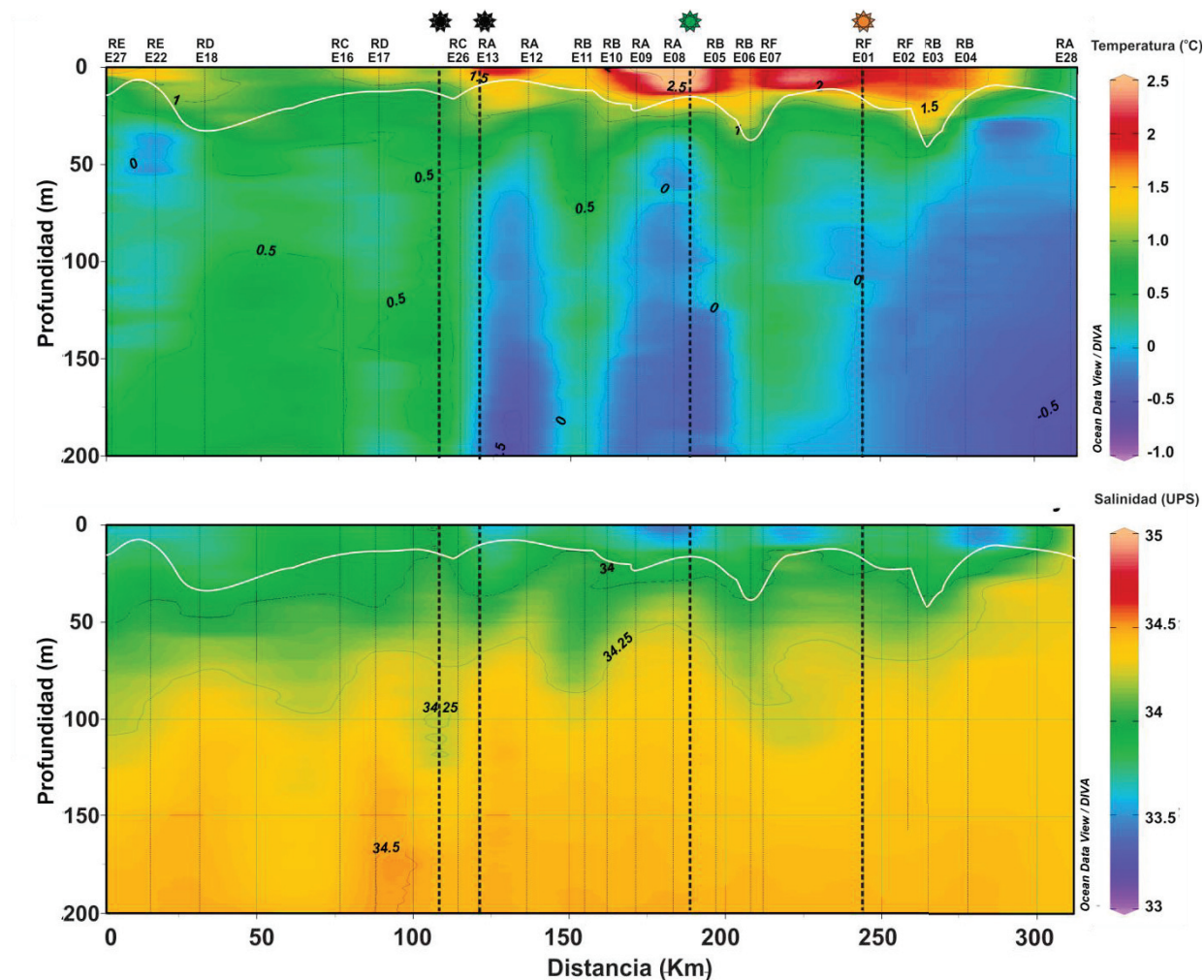


Figura 2.3. Secciones latitudinales de temperatura y salinidad en el Estrecho de Gerlache durante el 2018 desde el sur hasta el noreste en inmediaciones de la isla Trinity (300 km). Los símbolos negro, verde y naranja representan las estaciones más profundas que conectan al EG con el Mar de Bellingshausen. La línea blanca representa la profundidad de la capa de mezcla; las estaciones están definidas por la letra E seguida del número de la estación y ubicadas dentro de la región a la que pertenecen: RA; Danco, RB: Brabant; RC: Advord-Flandres; RD: Neumeyer y RE: Bismarck.

En la PCM, la temperatura mantuvo el patrón de incremento en los valores de las regiones del sur hacia las del norte (Fig. 2.2b), manteniendo el frente hidrográfico en el centro del Estrecho, mientras que la salinidad (Fig. 2.2d) fue muy homogénea en todo el Estrecho.

Tabla 2.2. Variables hidrográficas de superficie a 200 m de profundidad en el EG durante enero de 2017 y enero de 2018. En la tabla se indica el número de datos (n), el mínimo (Min) y máximo (Max), promedio (Prom) y dispersión de los datos (SD) de temperatura (Tem) y salinidad (Sal) y de la profundidad de la capa de mezcla (PCM) durante 2017 y 2018, así como por región.

	n	Min	Max	Prom	Desve
TEM₂₀₁₇	4174	-0.68	3.99	0.26	0.71
SAL₂₀₁₇	4174	33.3	35.5	34.2	0.23
PCM₂₀₁₇	21	7	65	25	14.7
TEM₂₀₁₈	3957	-0.57	2.75	0.31	0.52
SAL₂₀₁₈	3957	33.4	34.5	34.3	0.22
PCM₂₀₁₈	20	4	35	14	8.34
2017					
R_{DancoTem}	600	-0.64	2.78	0.01	0.71
R_{DancoSal}	600	33.29	34.42	34.19	0.21
R_{BrabantTem}	2574	-0.68	3.99	0.25	0.78
R_{BrabantSal}	2574	33.28	35.52	34.24	0.22
R_{AdvordTem}	200	-0.33	1.40	0.12	0.40
R_{AdvordSal}	200	33.78	34.49	34.27	0.25
R_{NeumeyerTem}	200	-0.44	1.15	0.11	0.33
R_{NeumeyerSal}	200	33.79	34.78	34.25	0.20
R_{BismarckTem}	600	-0.31	1.91	0.63	0.34
R_{BismarckSal}	600	33.58	34.54	34.22	0.29
2018					
R_{DancoTem}	1000	-0.57	2.75	0.08	0.59
R_{DancoSal}	1000	33.42	34.48	34.30	0.22
R_{BrabantTem}	1200	-0.40	2.13	0.32	0.57
R_{BrabantSal}	1200	33.50	34.48	34.25	0.22
R_{AdvordTem}	400	0.17	1.31	0.45	0.22
R_{AdvordSal}	400	33.83	34.51	34.27	0.19
R_{NeumeyerTem}	400	0.29	1.11	0.52	0.18
R_{NeumeyerSal}	400	33.71	34.49	34.24	0.22
R_{BismarckTem}	400	-0.16	1.58	0.38	0.28
R_{BismarckSal}	400	33.59	34.47	34.20	0.24
R_{CrockerTem}	557	-0.26	2.04	0.36	0.55
R_{CrockerSal}	557	33.61	34.47	34.24	0.20

Con el objetivo de identificar si las regiones delimitadas eran iguales o diferentes, se realizó un análisis no paramétrico de Wilcoxon a partir de la temperatura y salinidad (Tabla 2.3). En enero de 2017, con un 95% de confianza se determinó que a excepción de la temperatura en las regiones Advord-Flandres

y Bismarck, todas las regiones fueron diferentes. En enero de 2018, también se identificaron diferencias en la temperatura y salinidad entre regiones; sin embargo, para Neumeyer y Advord-Flandres, así como Danco y Brabant no hubo diferencias en cuanto a la temperatura. De otro lado, para Neumeyer y Bismarck no hubo diferencias respecto a la salinidad (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Resultado del estadístico no paramétrico de Wilcoxon entre regiones de las variables temperatura (Tem) y salinidad (Sal), en el EG durante enero de 2017 y enero de 2018; donde el símbolo #, significa que las regiones son diferentes. El α utilizado fue del 5%. La Región Danco está representada por RA: Brabant por RB, Advord-Flandres por RC, Neumeyer por RD, Bismarck por RE y Crocker por RF.

Regiones	Variable	n		Valor calculado		Valor crítico		Ho
		R1	R2	R1	R2	TL	TU	
RARB2017	Tem	14	6	76	60	42	84	=
	Sal	6	6	42	36	28	50	=
RARC2017	Tem	10	5	78	41	26	54	#
	Sal	6	4	31	24	14	30	#
RARD2017	Tem	10	3	75	16	10	32	#
	Sal	6	3	29	7	8	22	#
RARE2017	Tem	10	7	86	67	45	81	#
	Sal	6	6	47	31	28	50	#
RBRC2017	Tem	6	6	39	27	28	50	#
	Sal	6	4	24	31	14	30	#
RBRD2017	Tem	6	3	35	10	8	22	#
	Sal	6	3	23	13	8	22	#
RBRE2017	Tem	6	7	45	46	29	55	=
	Sal	6	7	44	34	29	55	=
RCRD-17	Tem	5	3	24	12	6	21	#
	Sal	4	3	14	7	4	18	=
RCRE-17	Tem	5	7	30	48	20	45	#
	Sal	6	4	32	23	14	30	#
RDRE-17	Tem	3	7	13	42	8	25	#
	Sal	3	6	23	21	8	22	#
RARB2018	Tem	8	6	59	47	31	59	#
	Sal	8	6	57	49	31	59	=
RARC2018	Tem	8	4	54	24	15	37	#
	Sal	8	4	55	23	15	37	#
RARD2018	Tem	8	4	56	22	15	37	#
	Sal	8	4	52	26	15	37	#
RARF2018	Tem	8	4	49	29	15	37	#
	Sal	8	4	52	26	15	37	#
RBRC2018	Tem	6	4	37	18	14	30	#
	Sal	6	4	38	17	14	30	#
RBRD2018	Tem	6	4	37	18	14	30	#

	Sal	6	4	36	19	14	30	#
RBRF2018	Tem	6	4	32	23	14	30	#
	Sal	6	4	34	21	14	30	#
RCRD2018	Tem	4	4	21	15	11	25	=
	Sal	4	4	21	15	11	25	=
RCRF2018	Tem	4	4	11	25	11	25	#
	Sal	4	4	11	25	11	25	#

2.3.2. Masas de agua

Cuatro masas de agua fueron identificadas en el Estrecho de Gerlache de acuerdo con el diagrama TS (Fig. 2.4): a) Agua Circumpolar Superior modificada (mUCDW, por su sigla en inglés), b) Agua Transicional del Mar de Bellingshausen (TBW) y c) y Agua Transicional del Mar de Weddel (TWW) y otro tipo de agua no identificada (OT).

En enero de 2017, la masa TBW con temperatura $>0.5^{\circ}\text{C}$, salinidad entre 33.83 a 34.35 UPS y densidad $<27.64 \text{ kg/m}^3$, predominó en Advord-Flandres, Neumeyer y Brabant, regiones que conectan al EG con el Mar de Bellingshausen en las estaciones E25, E13, E08 y E01 (Fig. 2.4a). La contribución de la TBW fue del 25.5%. Por otro lado, la mUCDW contribuyó con solo el 6% en Bismarck; fue en la única región donde se observó la presencia de esta masa de agua con temperatura $>0.5^{\circ}\text{C}$ y salinidad > 34.5 UPS (Fig. 2.5). El agua de fondo TWW estuvo presente con un 10.3% del total; predominó en las regiones del Norte en Brabant (14%) y Danco (13%), con menor contribución en Neumeyer y ninguna contribución en las regiones del Sur, Advord-Flandres y Bismarck (Fig. 2.5).

En enero de 2018, las mismas masas de agua fueron identificadas (Fig. 2.4b) aunque la fracción mUCDW aumentó en tres regiones (Fig. 2.6) y su mayor contribución se observó en la región Bismarck (28%). Con excepción de Neumeyer, en las demás regiones la contribución de la TBW aumentó y solamente en Danco se observó la presencia de TWW, con la mitad de la contribución que se registró en 2017 (Fig. 2.6).

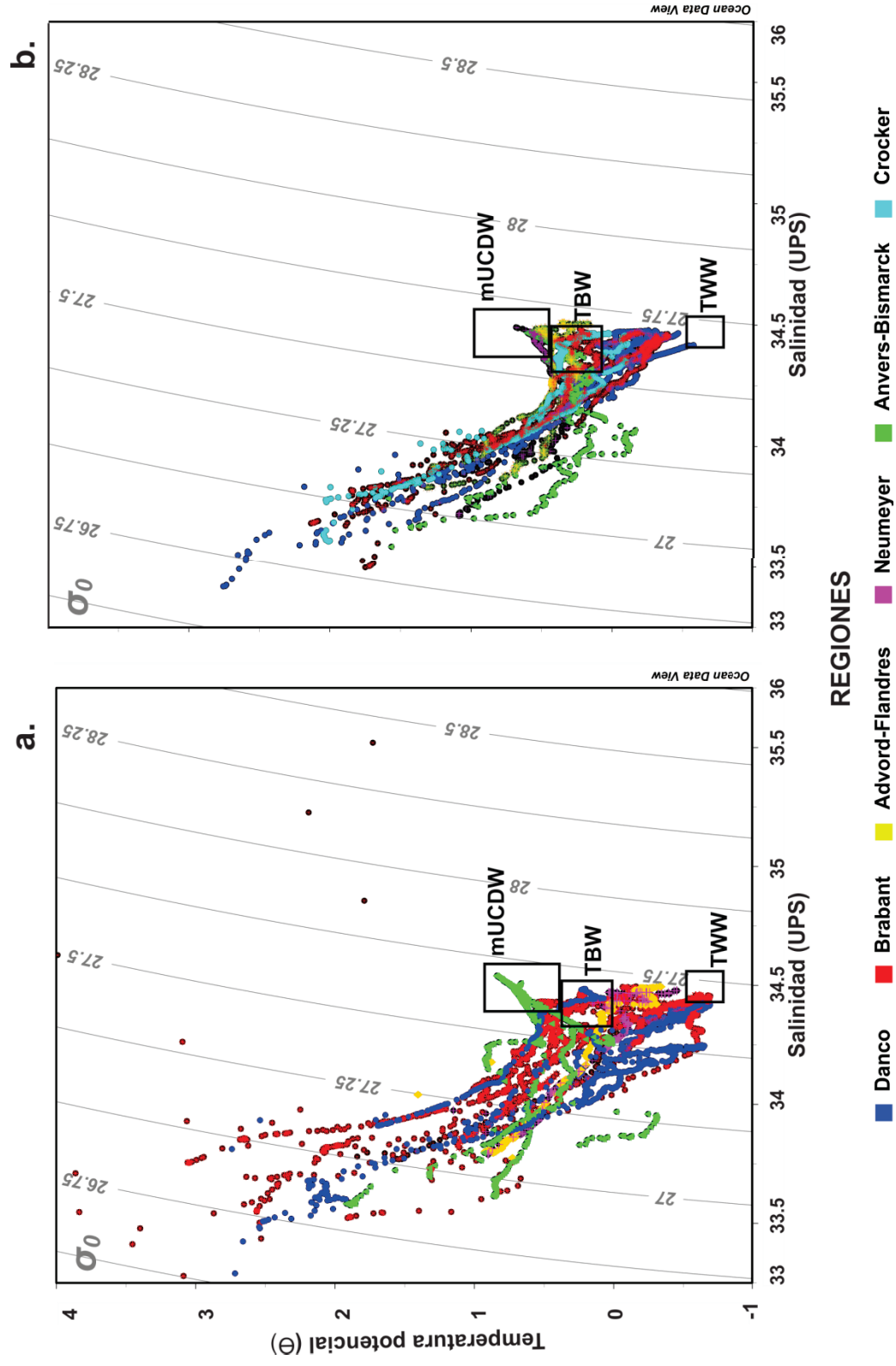


Figura 2.4. Masas de agua identificadas en el Estrecho de Gerlache por región durante enero de 2017 y enero de 2018: Agua Circumpolar Superior modificada (mUCDW), Agua Transicional del Mar de Bellingshausen (TBW) y Agua Transicional del Mar de Weddel (TWW).

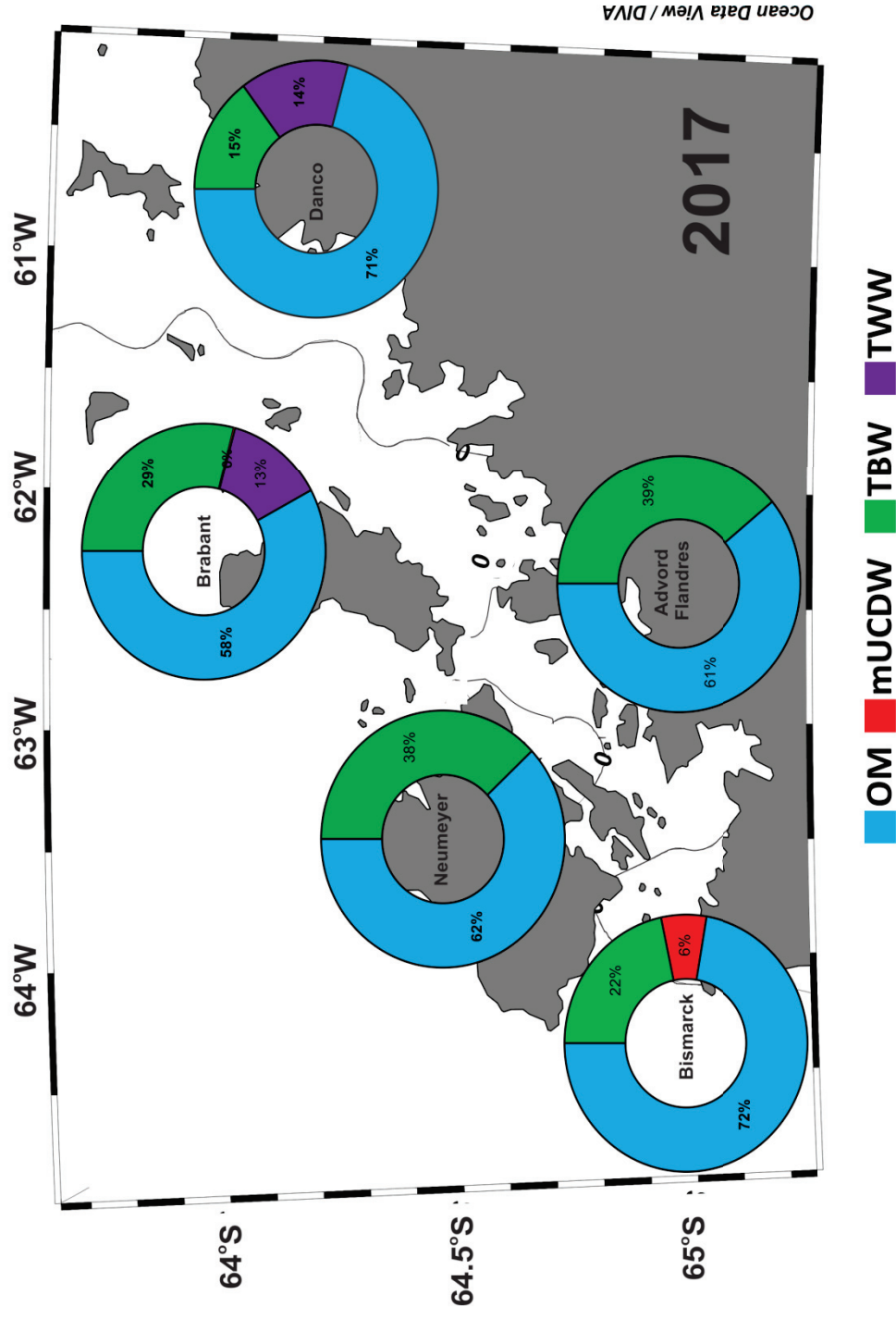


Figura 2.5. Contribución de las masas de agua identificadas en el Estrecho de Gerlache por región durante el 2017: Otros tipos de agua se representan como OM, Agua Circumpolar Superior modificada (mUCDW), Agua Transicional del Mar de Bellingshausen (TBW) y Agua Transicional del Mar de Weddel (TWW).

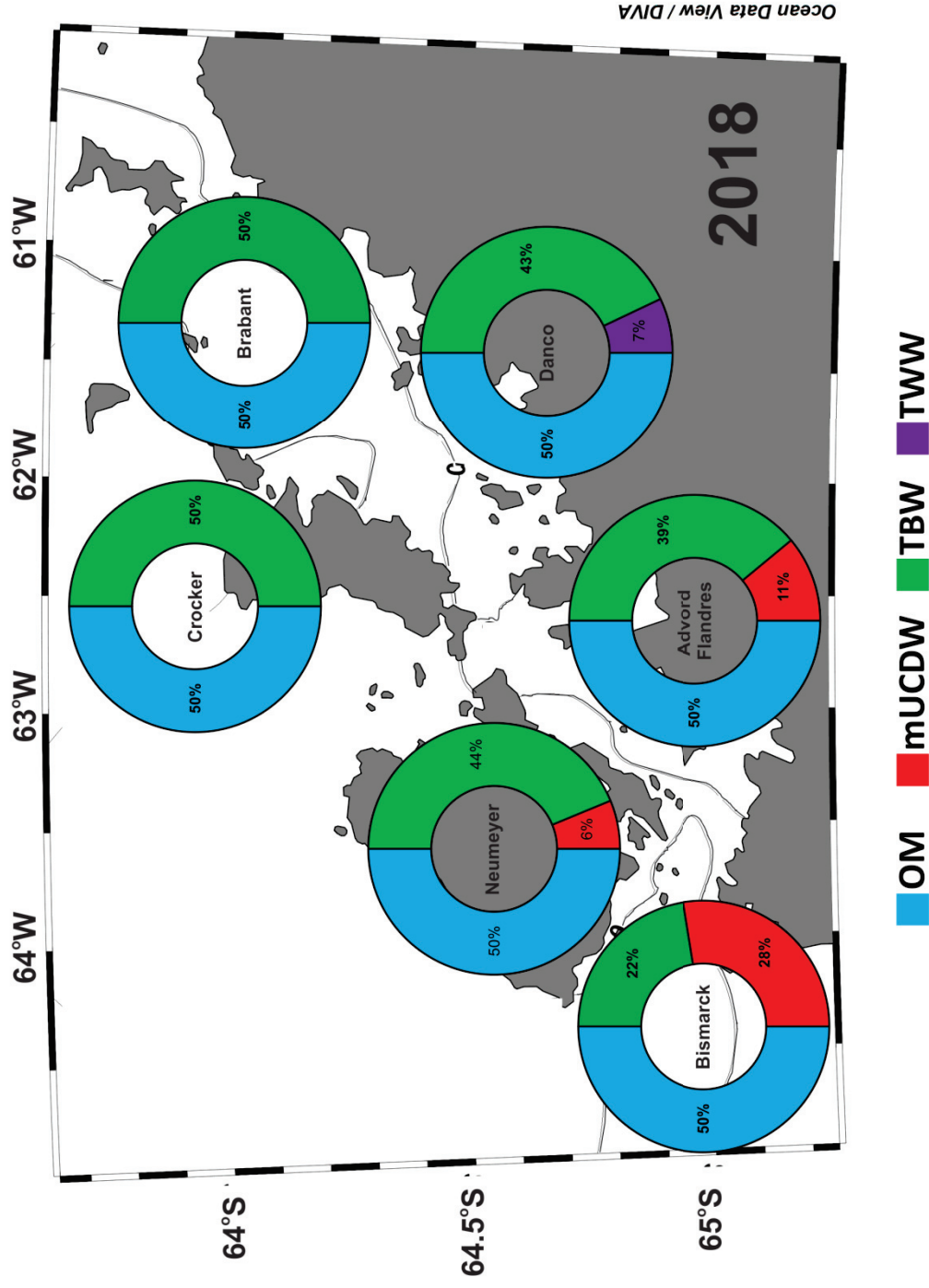


Figura 2.6. Contribución de las masas de agua identificadas en el Estrecho de Gerlache por región durante el 2018, otros tipos de agua se representan como OM, Agua Circumpolar Superior modificada (mUCDW), Agua Transicional del Mar de Bellingshausen (TBW) y Agua Transicional del Mar de Weddel (TWW).

2.3.3. Nutrientes

Secciones latitudinales desde el sur del Estrecho en Bismarck hasta el norte en inmediaciones la de Isla Trinity, muestran la distribución de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, PO_4^{3-} y H_4SiO_4^- (Fig. 2.7) durante enero de 2018. Solamente para cuatro estaciones en enero de 2017 (E13, E06, E01 y E03), ubicadas en las regiones Brabant y Crocker al noroeste, se presenta la distribución de estos nutrientes (Fig. 2.8). Todos los nutrientes fueron relativamente bajos en la superficie y aumentaron con la profundidad después de los 80 m aproximadamente. Con excepción del ácido silícico en las estaciones E13, E06 y E01 (Fig. 2.7), las concentraciones en profundidad fueron bajas (ver isolínea de 27.5 y 2.0 μM para $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ y PO_4^{3-}).

El máximo de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, fue variable en profundidad y en las regiones identificadas. Este máximo en Advord-Flandres y Neumeyer se localizó alrededor de los 100 m, así como en las estaciones E08 y E09 ubicadas dentro de la región Danco. En Bismarck el máximo se identificó por debajo de los 200 m. Por el contrario, para Crocker y Brabant, así como para las estaciones ubicadas al noreste de Danco no se observó este máximo. En promedio en las regiones del norte se encontraron mayores concentraciones que en las regiones del sur (ver Tabla No 2.4).

El PO_4^{3-} , presentó una distribución homogénea a lo largo de la sección, con máximos por debajo de los 200 m. En promedio, la región que presentó la concentración más alta fue Bismarck (2.10 μM), mientras que Advord-Flandres registró la más baja (1.8 μM).

Por otro lado, las mayores concentraciones de H_4SiO_4^- en las regiones del sur se observaron entre los 100 a 200 m, mientras que en las regiones del norte (Danco, Brabant y Crocker) no se observaron (Fig. 2.7). Las concentraciones en promedio de H_4SiO_4^- por región, fueron más bajas tanto en Bismarck como en Nemeyer y las más altas en Advord-Fladres. Cabe mencionar que en estas regiones la dispersión de los datos también fue mayor (Ver tabla 2.4).

En términos generales en enero de 2018, las concentraciones de los tres macronutrientes fueron menores en las regiones del sur respecto a las del norte. Durante enero de 2017, el patrón de distribución de los macronutrientes en Brabant y Danco fue similar a enero de 2018, con concentraciones de ácido silícico de 80 μM entre los 100 y 200 m (Fig. 2.8), aunque las de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ y PO_4^{3-} , disminuyeron (30 y 2 μM).

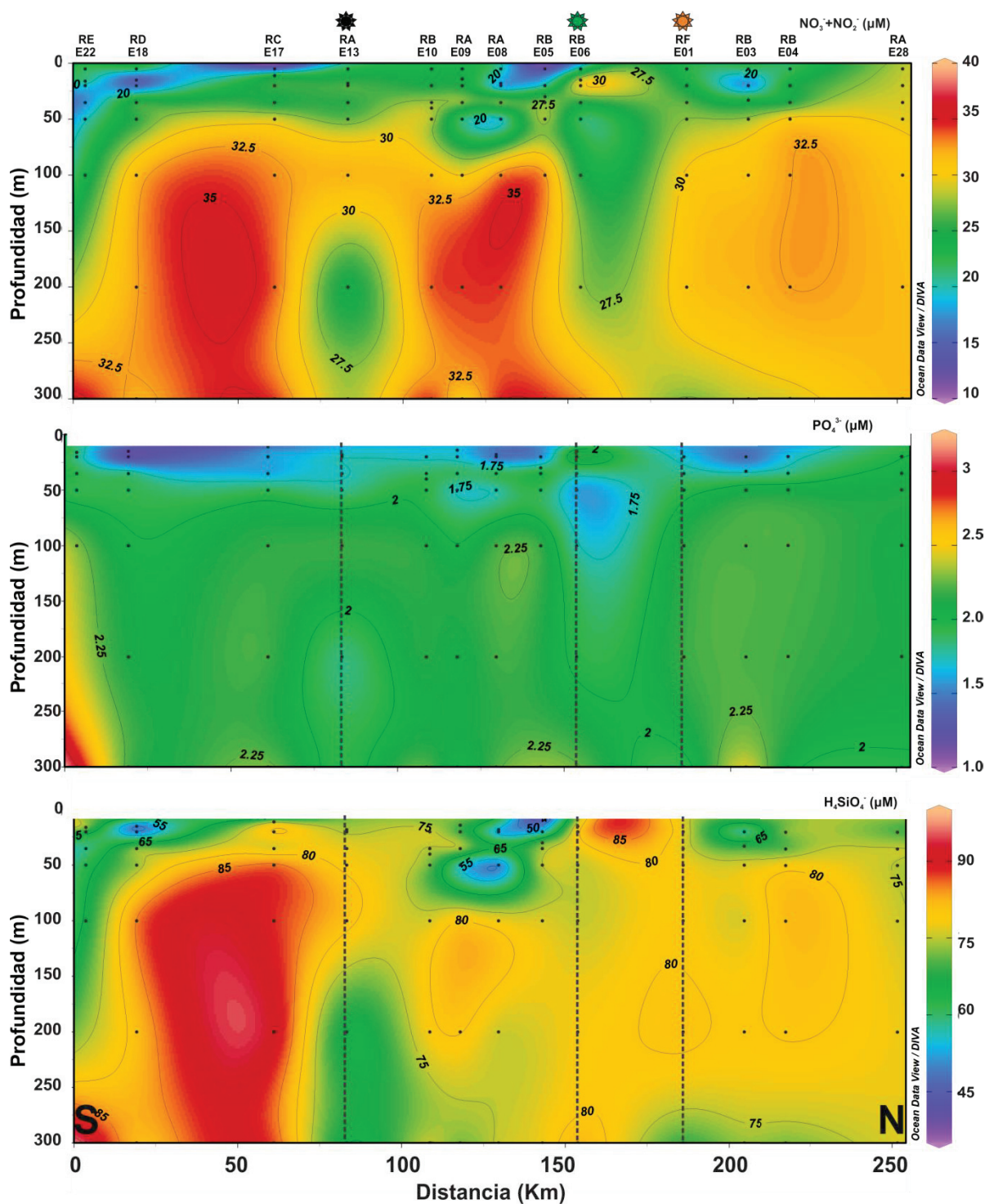


Figura 2.7. Secciones latitudinales de macronutrientes en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2018. La S, corresponde a las estaciones y regiones ubicadas en el sur y la N a las estaciones y regiones ubicadas al noreste de la costa Danco. Las estrellas gris, verde y naranja corresponden a las estaciones cuya profundidad permite el ingreso de aguas intermedias y profundas del Mar de Bellingshausen en el Estrecho de Gerlache.

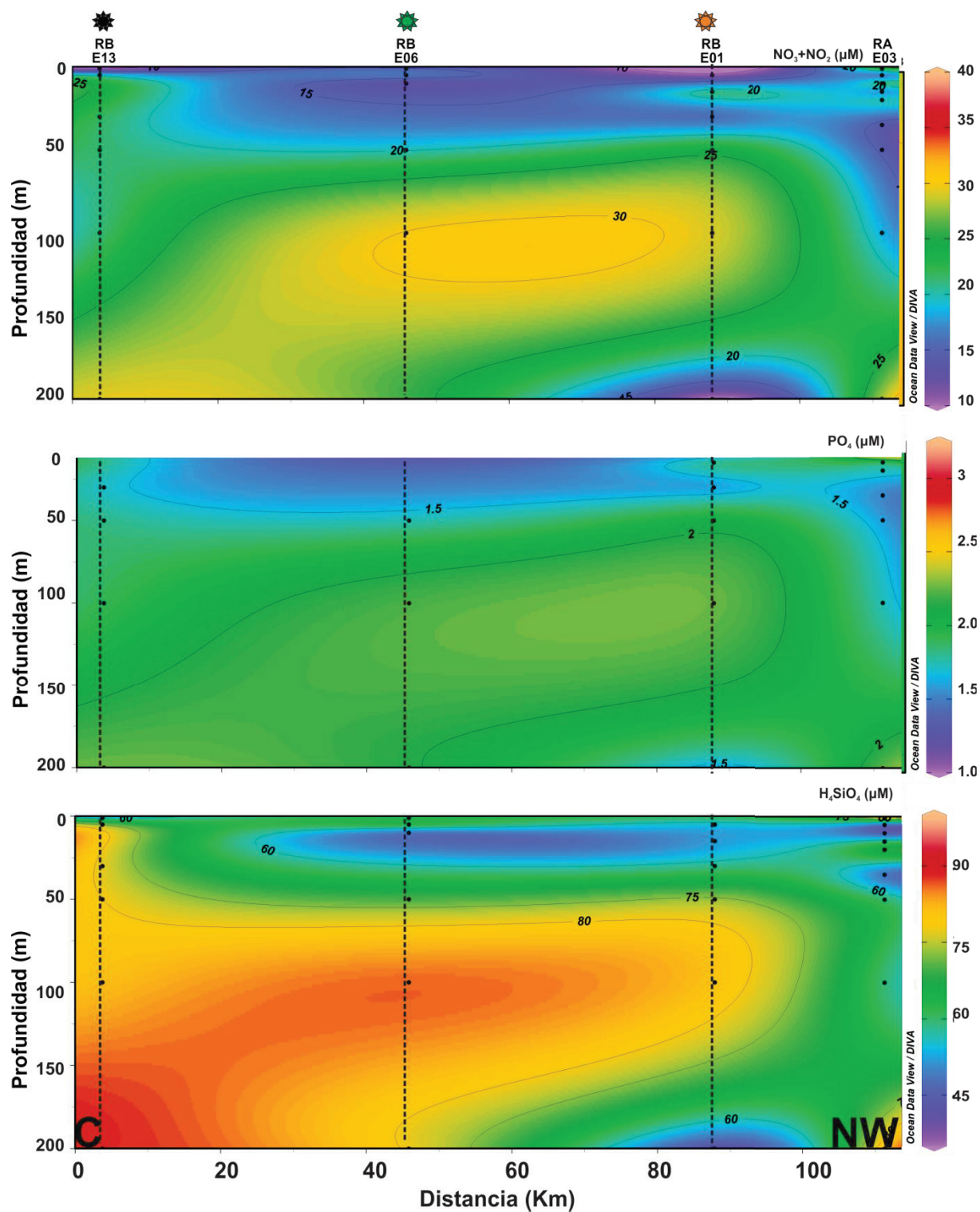


Figura 2.8. Secciones latitudinales de macronutrientes en el Estrecho de Gerlache durante enero de 2017. La C, corresponde a la Estación 13 ubicada en el centro del EG y la NW a la estación y región ubicada al noroeste de la costa Danco. Las estrellas gris, verde y naranja corresponden a las estaciones cuya profundidad permite el ingreso de aguas intermedias del Mar de Bellingshausen en el Estrecho de Gerlache.

Teniendo en cuenta que solo para el 2018 se contó con información de nutrientes de todas las regiones delimitadas hasta los 200 m de profundidad, a partir de esta información se realizó el análisis estadístico con la prueba no paramétrica de Wilcoxon, para determinar si la concentración de nutrientes entre regiones era igual o diferente. Con un nivel de confianza del 95%, se encontró que la concentración de los tres macronutrientes en las regiones Danco y Brabant fue diferente con todas las regiones. Por el contrario, la concentración de PO_4^{3-} en la región Advord-Flandres fue igual con Neumeyer, Bismark y Crocker, mientras que la concentración de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ fue igual con Crocker. La concentración de los tres macronutrientes fue igual en Neumeyer, Bismark y Crocker. (Tabla 2.4b).

El análisis de regresión lineal entre las razones de asimilación $\text{H}_4\text{SiO}_4^- : \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ y $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-}$ en las regiones, mostró para la razón Si: N valores por arriba de las razones definidas (1:1) para la región (Freeman *et al.*, 2019). En Crocker, el modelo explicó solamente 9.9% de asimilación, razón por la cual esta razón no fue estadísticamente significativa. De otro lado, el modelo tampoco fue estadísticamente significativo para esta región (Tabla 2.5). En las demás regiones el coeficiente de determinación estuvo entre el 57 y 93% y se observó que en las regiones Danco y Brabant fueron más bajos (67.8 y 57 %); no obstante, tanto la tasa de cambio como los modelos en estas dos regiones fueron estadísticamente significativos, así como en las regiones del sur.

Por otro lado, las razones de asimilación $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^- : \text{PO}_4^{3-}$, registraron valores entre 12.4:1 a 20.5:1, con coeficientes de determinación entre el 81 y el 99%. En todas las regiones, tanto las razones de asimilación como los modelos fueron estadísticamente significativos (Tabla 2.5).

Tabla 2.4. a) Intervalos de variación de macronutrientes inorgánicos disueltos por región durante 2018. b) Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en las concentraciones de nutrientes en las regiones delimitadas. La tabla incluye el número de datos por región (n), la suma de rangos calculados (R1, R2 calculados), los límites de los valores críticos (Límite Inferior: TL y Superior: TU) y la decisión representada en el signo # que indica que las regiones no son iguales. El α utilizado fue del 5%. La Región Danco está representada por RA, Brabant por RB, Advord-Flandres por RC, Neumeyer por RD, Bismarck por RE y Crocker por RF.

Región	Danco			Brabant			Advord-Flandres			Neumeyer			Bismarck			Crocker		
	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	H ₄ SiO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	H ₄ SiO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	H ₄ SiO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	H ₄ SiO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	H ₄ SiO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	H ₄ SiO ₄ ⁻
Prom	27.09	1.87	71.14	27.19	1.93	73.65	27.43	1.80	80.03	24.89	1.76	70.76	22.55	2.10	70.70	27.19	1.90	77.00
Min	11.18	1.21	40.57	11.92	1.36	37.19	23.30	1.55	73.21	12.77	1.09	43.30	16.53	1.74	57.50	24.20	1.70	68.94
Max	35.03	2.24	82.56	34.88	2.46	82.32	34.50	2.29	93.07	32.25	2.19	86.33	35.33	3.02	94.89	31.21	2.19	81.02
Desv	5.49	0.25	10.16	5.39	0.30	8.85	7.35	0.43	14.65	7.76	0.42	16.38	6.08	0.45	12.67	3.03	0.22	3.95

b. Wilcoxon ($\alpha 5\%$)

Región	n	Valor calculado			Valor crítico	Ho	Región	n	Valor calculado			Valor crítico	Ho
		R1	R2	R1					R1	R2	R1		
RARB	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	31	37	1065	1281	935	RBRF	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	37	7	846	105	#
	PO ₄ ³⁻	31	37	991	1355	935		PO ₄ ³⁻	37	7	848	105	#
	H ₄ SiO ₄ ⁻	31	37	953	1393	935		H ₄ SiO ₄ ⁻	37	7	878	105	#
RARC	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	31	8	605	175	112	RCRD	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	8	8	85	51	#
	PO ₄ ³⁻	31	8	631	149	112		PO ₄ ³⁻	8	8	69	51	=
	H ₄ SiO ₄ ⁻	31	8	545	245	112		H ₄ SiO ₄ ⁻	8	8	86	50	#
RARD	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	31	8	632	148	112	RCRE	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	8	7	78	42	#
	PO ₄ ³⁻	31	8	628	152	112		PO ₄ ³⁻	8	7	54	41	=
	H ₄ SiO ₄ ⁻	31	8	591	189	112		H ₄ SiO ₄ ⁻	8	7	77	43	#
RARE	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	31	7	661	80	92	RCRF	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	8	7	67	53	=
	PO ₄ ³⁻	31	7	575	166	92		PO ₄ ³⁻	8	7	63	57	=
	H ₄ SiO ₄ ⁻	31	7	626	115	92		H ₄ SiO ₄ ⁻	8	7	78	72	#
RARF	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	31	7	661	80	92	RDRE	NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	8	7	72	48	=

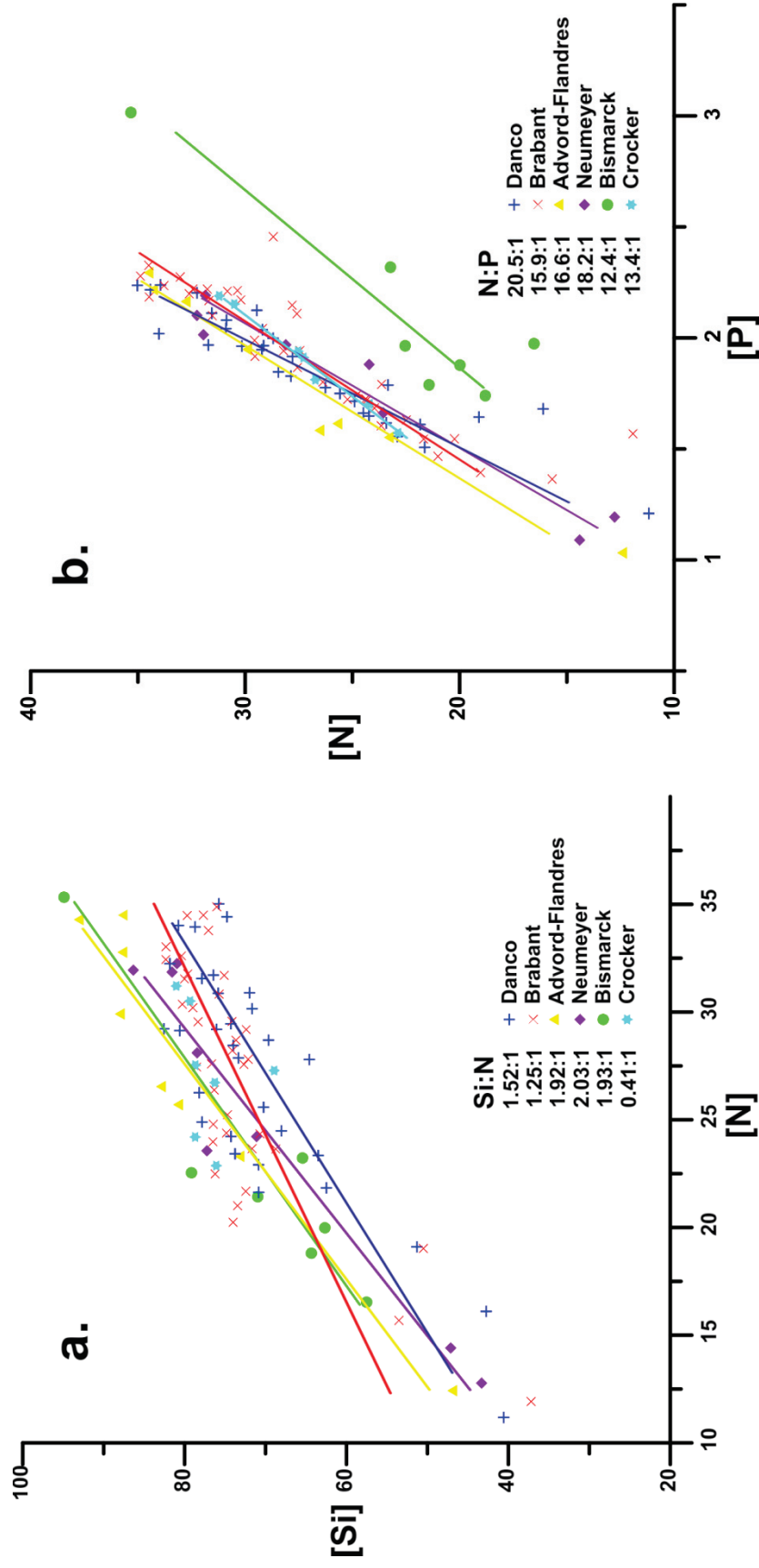


Figura 2.9. Modelos de regresión lineal o razones estequiométricas en las regiones delimitadas en el Estrecho en enero de 2018; a) Sílice a Nitrógeno (Si:N) y b) Nitrógeno a Fósforo (N:P) . Se precisa indicar que el N dentro de la razón corresponde a la suma de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$, no hace referencia a nitrógeno inorgánico disuelto (DIN), por su sigla en inglés) por considerar que las concentraciones NH_4^+ , por debajo de la profundidad de la capa de mezcla son muy bajas durante el verano y su valor no afecta las razones calculadas (Henley *et al.*, 2017; 2018; 2020).

Tabla 2.5. Razones estequiométricas Si: N y N: P para las regiones delimitadas en el Estrecho de Gerlache durante 2018. El estadístico de prueba para probar la significancia de la razón fue la Prueba t y para determinar la significancia global del modelo la Prueba F de Fisher, con un α del 5%. La tabla incluye el número de datos (n) para cada región, los grados de libertad (gl), los valores calculados de las razones (tcal), los valores límite o crítico de las razones (tcrit), el coeficiente de determinación (R^2), el valor calculado para la significancia global del modelo (Fcal) y el valor crítico del modelo (Fcrit). Sin negritas las razones y modelos que fueron significativos y en negritas los que no fueron significativos. Los modelos a y c corresponden a la razones de asimilación hasta los 200 m, mientras que b y d hasta 100 m.

Región	Modelo	Si: N	n	Gl	tcal _(razón)	tcrit	R ²	Fcal	Fcrit
a. 200M									
Danco	Si = 29.9 + 1.52N	1.52	31	29	7.81	2.04	67.8	60.96	5.58
Brabant	Si = 40.4 + 1.24N	1.25	44	42	7.46	2.01	57	55.65	5.40
Advord	Si = 27.4 + 1.92N	1.92	8	6	8.68	2.44	92.6	75.39	8.81
Neumeyer	Si = 20.2 + 2.03N	2.03	8	6	8.7	2.44	92.7	75.72	8.81
Bismarck	Si = 27.1 + 1.93N	1.93	7	5	5.57	2.57	86.1	31.06	10.0
Crocker	Si = 65.7 + 0.415N	0.41	7	5	0.75	2.57	10.2	0.57	10.0
b. 100M									
Danco	Si = 20.6 + 1.95N	1.95	18	16	6.99	2.1	74.2	48.9	6.11
Brabant	Si = 28.0 + 1.76N	1.76	23	21	6.77	2.07	68.6	45.88	5.82
Advord	Si = 17.1 + 2.43N	2.42	5	3	21.38	3.18	99.3	457.16	17.44
Neumeyer	Si = 12.4 + 2.47N	2.47	5	3	7.51	3.18	94.9	56.33	17.44
Bismarck	Si = 0.9 + 3.33N	3.32	5	3	4.39	3.18	86.5	19.28	17.44
Crocker	Si = 72.1 + 0.209N	0.209	4	2	0.47	4.30	9.9	0.22	38.5
c. 200M									
Región	Modelo	N:P	n	Gl	tcal _(razón)	tcrit	R ²	Fcal	Fcrit
Danco	N = - 11.2 + 20.5P	20.5	31	29	12.81	2.04	85	163.99	5.58
Brabant	N = - 3.52 + 15.9P	15.9	44	42	13.23	2.01	80.7	175.1	5.40
Advord	N = - 2.54 + 16.6P	16.6	8	6	11.66	2.44	95.8	135.93	8.81
Neumeyer	N = - 7.17 + 18.2P	18.2	8	6	10.22	2.44	94.6	104.52	8.81
Bismarck	N = - 3.54 + 12.4P	12.4	7	5	5.01	2.57	83.4	25.12	10.0
Crocker	N = 1.79 + 13.4P	13.4	7	5	19.88	2.57	98.5	395.05	10.0
d. 100M									
Danco	N = - 10.1 + 19.8P	19.8	19	17	7.58	2.1	77.2	57.52	6.04
Brabant	N = - 4.74 + 16.5P	16.5	23	21	7.71	2.07	73.9	59.41	5.82
Advord	N = - 6.96 + 19.8 P	19.8	5	3	7.38	3.18	94.8	54.52	17.44
Neumeyer	N = - 4.67 + 16.2 P	16.2	5	3	6.9	3.18	94.1	47.6	17.44
Bismarck	N = 23.4 - 1.9P	-1.9	5	3	-0.15	3.18	0.7	0.02	17.44
Crocker	N = 1.57 + 13.5 P	13.5	4	2	6.43	4.30	95.4	41.4	38.5

2.3.4. Pigmentos y Grupos Fitoplanctónicos

En enero de 2017, la concentración de clorofila-a (Chl-a) varió entre 0.16 y 5.97 mg/m³ con promedio de 1.32 mg/m³ (Tabla 2.6); las regiones ubicadas en el sur presentaron promedios más altos de Chl-a, al igual que de los pigmentos Chl-b y fucoxantina. Por el contrario, las regiones del norte, Danco y Brabant, presentaron mayores concentraciones de alloxantina.

Tabla 2.6. Concentración de pigmentos (mg/m³) analizados para cada uno de los cruceros (Expedición Almirante Padilla-enero de 2017 y Expedición Almirante Tono- enero de 2018) en la superficie y el máximo profundo de Chl-a. Los pigmentos relacionados en la tabla corresponden a: Clorofila-a: Chl-a, Fucoxantina: Fuco, Peridinina: Peri, 19'Butanoyloxy fucoxantina: 19'-But, 19'Hexanoyloxy fucoxantina: 19'-Hex, Alloxantina: Allo, Clorofila-b: Chl-b.

Región	Superficie -enero de 2017							Máximo profundo de Chl-a enero de 2017						
	Chl-a	Fuco	Peri	19'-But	19'-Hex	Allo	Chl-b	Chl-a	Fuco	Peri	19'-But	19'-Hex	Allo	Chl-b
Danco	0.22	0.14	0.00	0.02	0.04	0.01	0.00	0.80	0.24	0.00	0.02	0.06	0.01	0.00
	0.33	0.24	0.00	0.03	0.08	0.07	0.00	0.35	0.26	0.00	0.03	0.08	0.02	0.01
	0.25	0.18	0.00	0.02	0.07	0.05	0.00	0.48	0.31	0.00	0.04	0.12	0.02	0.00
	0.28	0.11	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.75	0.29	0.00	0.02	0.10	0.01	0.03
	0.42	0.11	0.00	0.01	0.05	0.12	0.00	0.39	0.14	0.00	0.03	0.07	0.00	0.00
	0.25	0.23	0.06	0.02	0.05	0.05	0.00	0.47	0.31	0.00	0.03	0.10	0.01	0.02
Brabant	1.30	0.59	0.00	0.00	0.13	0.71	0.00	0.64	0.84	0.00	0.05	0.07	0.05	0.00
	0.16	0.05	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	1.03	0.79	0.00	0.09	0.10	0.28	0.02
	0.78	0.66	0.06	0.05	0.08	0.15	0.01	0.85	0.71	0.00	0.06	0.12	0.13	0.13
	0.86	0.48	0.02	0.06	0.08	0.58	0.02	1.09	0.40	0.00	0.04	0.09	0.02	0.00
	0.50	0.57	0.00	0.04	0.10	0.18	0.00	1.77	0.47	0.00	0.03	0.00	0.04	0.30
Advord	2.88	1.50	0.04	0.00	0.00	0.01	0.60	5.97	4.36	0.00	0.05	0.00	0.01	0.47
	3.17	1.55	0.02	0.00	0.00	0.00	1.04	2.06	0.62	0.00	0.02	0.00	0.00	0.84
	3.66	1.63	0.00	0.05	0.00	0.00	0.47	2.58	1.39	0.00	0.05	0.00	0.01	0.48
Neumeyer	2.41	1.26	0.00	0.00	0.00	0.00	1.12	3.17	1.84	0.00	0.02	0.00	0.00	0.67
	2.77	1.11	0.04	0.04	0.05	0.12	0.05							
Bismarck	0.65	0.57	0.00	0.02	0.03	0.02	0.02	0.80	0.79	0.00	0.06	0.03	0.16	0.00
	1.06	0.59	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.55	0.74	0.00	0.02	0.03	0.02	0.04
	1.34	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	1.84	1.09	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00
Región	Superficie -enero de 2018							Máximo profundo de Chl-a enero de 2018						
Danco	0.45	0.05	0.02	0.00	0.03	0.02	0.17	0.32	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
	0.34	0.03	0.00	0.01	0.03	0.05	0.00	0.23	0.08	0.00	0.03	0.04	0.00	0.00
	0.48	0.12	0.00	0.02	0.05	0.04	0.05	0.67	0.17	0.00	0.03	0.07	0.10	0.00
	0.42	0.11	0.00	0.02	0.10	0.00	0.09	0.19	0.08	0.00	0.02	0.04	0.00	0.02
Brabant	0.22	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.03	0.37	0.07	0.00	0.02	0.08	0.00	0.03
	0.09	0.04	0.00	0.00	0.03	0.05	0.01	0.47	0.13	0.00	0.04	0.15	0.00	0.01
	0.85	0.19	0.00	0.04	0.08	0.09	0.01	0.61	0.18	0.00	0.05	0.13	0.00	0.04

	0.74	0.09	0.00	0.01	0.04	0.10	0.00	0.51	0.14	0.00	0.03	0.09	0.01	0.02
	0.41	0.08	0.00	0.01	0.04	0.05	0.00	1.06	0.20	0.00	0.02	0.11	0.15	0.11
Advord	1.30	0.07	0.01	0.01	0.03	0.03	0.94	1.03	0.11	0.00	0.01	0.05	0.03	0.54
Neumeyer	3.09	0.12	0.03	0.01	0.00	0.00	2.60	2.08	0.11	0.02	0.01	0.00	0.00	1.68
Bismarck	0.35	0.05	0.00	0.01	0.06	0.04	0.00	0.29	0.04	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00
Crocker	0.47	0.07	0.00	0.01	0.04	0.08	0.00	0.48	0.08	0.00	0.02	0.05	0.05	0.01

En enero de 2018, la tendencia fue que la concentración de pigmentos disminuyó en todas las regiones; así por ejemplo el intervalo de variación de la Chl-*a* estuvo entre 0.67 y 3.09 mg/m³. Solamente, en la región Advord-Flandres se encontró un leve incremento en la concentración de 19'Hex (0.04 mg/m³) y en la región Neumeyer de la Chl-*b*, en un orden de magnitud. De otro lado, la tendencia de concentraciones mayores de Chl-*a* y Chl-*b* en las regiones del sur se mantuvo y los demás pigmentos fueron muy homogéneos en las regiones delimitadas (Tabla 2.6).

Por otro lado, el porcentaje de contribución de los grupos del fitoplancton al total de Chl-*a* y estimados mediante el CHEMTAX, resultó en una contribución de 6 grupos fitoplanctónicos: diatomeas, dinoflagelados, dinof₂/diato₂, *Phaeocystis antarctica*, criptofitas y flagelados verdes. En enero de 2017, la contribución más representativa fue del grupo de las diatomeas (Fig. 2.10) con proporciones mayores al 50% en la región Bismarck; este porcentaje se mantuvo o disminuyó entre el 40 y 50% en las regiones Advord-Flandres y Neumeyer. Contribuciones menores al 50 % se observaron en Danco y Brabant. Otro grupo representativo de las regiones del sur fueron los flagelados verdes, con contribuciones de hasta el 50% en Advord-Flandres y Neumeyer. En Brabant, la contribución más alta fue de las criptofitas con un 60% en la estación E01. La contribución de los dinoflagelados en todas las regiones y estaciones fue menor al 5%, con excepción de la E03 ubicada en la región Danco; y un grupo presente en todas las regiones fue el grupo dinof₂/diato₂, cuya contribución más alta se observó en la estación E09, con el 79%.

En enero de 2018, la contribución de las diatomeas y las criptofitas descendió, los flagelados verdes, dinof₂/diato₂ y *Phaeocystis antarctica* aumentaron, mientras que los dinoflagelados se mantuvieron con contribuciones menores al 5% (Fig. 2.11). En las regiones Danco, Brabant y Crocker la contribución de *Phaeocystis antarctica* registró hasta un 30%. La participación más alta de flagelados verdes, se observó en la región Neumeyer con 93% y su distribución se registró hasta la frontera de Danco al norte, con un 46% (Fig. 2.11).

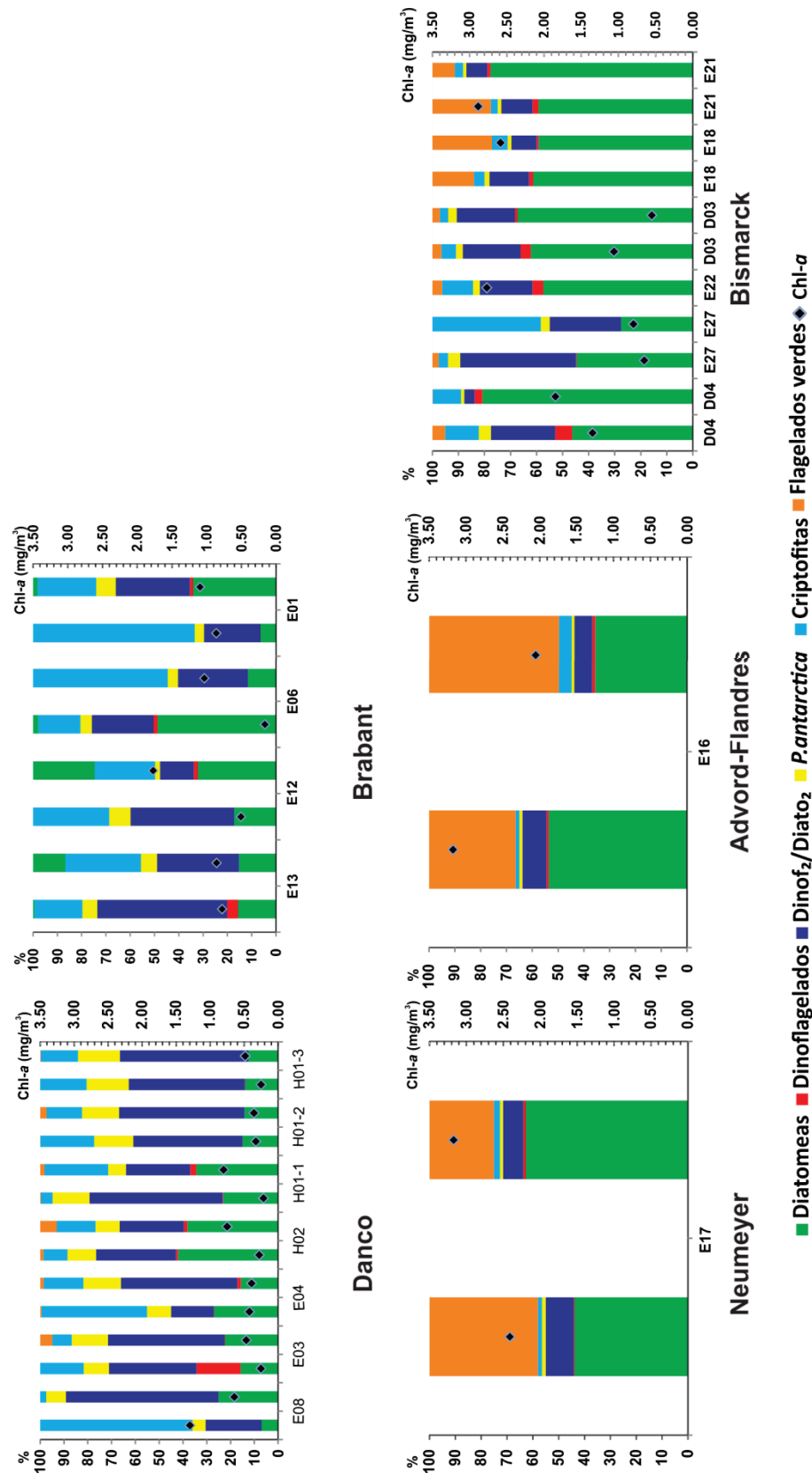


Figura 2.10. Contribución porcentual de grupos del fitoplancton en cada región del Estrecho de Gerlache durante enero de 2017. Las barras corresponden a las estaciones por cada región con la estructura de grupos del fitoplancton. El símbolo negro representa la concentración de Chl-*a* en mg/m³.

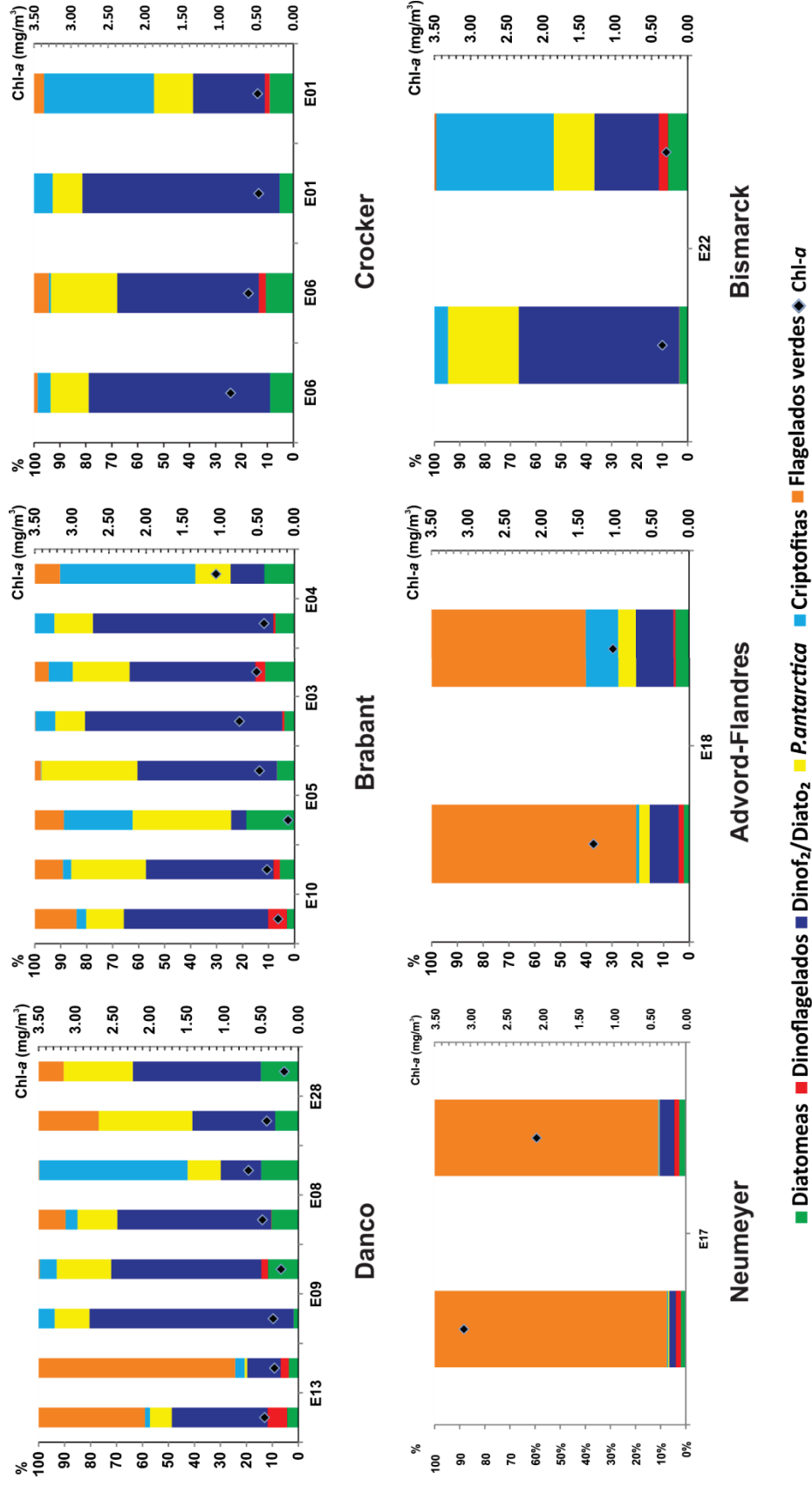


Figura 2.11. Contribución porcentual de grupos del fitoplancton en cada región del Estrecho de Gerlache durante enero de 2018. Las barras corresponden a las estaciones por cada región con la estructura de grupos del fitoplancton. El símbolo negro representa la concentración de Chl-*a* en mg/m^3 .

Para determinar si la contribución de grupos era igual o diferente en las regiones y periodos estudiados, un análisis no paramétrico de Wilcoxon se desarrolló. Con un 95% de confianza se determinó que la contribución de grupos y la concentración de Chl-a, fue diferente entre las dos Expediciones (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en la contribución de grupos del fitoplancton durante las Expediciones de 2017 y 2018. Se indica el número de datos para cada crucero(n), los valores calculados (T_{2017} , T_{2018}), los valores críticos (Límite Inferir: TL y Superior: TU) y el alfa usado fue del 5%. El Signo # significa que las regiones son diferentes.

	Diatomeas	Dinoflagelados	Dinof ₂ /Diat ₂	<i>Phaeocystis antarctica</i>	Criptofitas	Flagelados verdes	Chl-a
Prom-17	0.4	0	0.3	0.1	0.2	0.1	1.3
Min-17	0.1	0	0	0	0	0	0.2
Max-17	0.8	0.2	0.6	0.2	0.7	0.5	6
Desv-17	0.2	0	0.2	0.1	0.2	0.1	1.3
Prom-18	0.1	0	0.4	0.2	0.1	0.2	0.7
Min-18	0	0	0	0	0	0	0.1
Max-18	0.2	0.1	0.8	0.4	0.6	0.9	3.1
Desv-18	0	0	0.3	0.1	0.2	0.3	0.6

Wilcoxon ($\alpha_{5\%}$)							
Grupo	n		Valor calculado		Valor crítico		Decisión
	2017	2018	T_{2017}	T_{2018}	TL	TU	
Diatomeas	37	26	1619	397	713	951	#
Dinoflagelados	37	26	1165	850	713	951	#
Dinof ₂ /Diat ₂	37	26	1043	973	713	951	#
<i>Phaeocystis antarctica</i>	37	26	937	1079	713	951	#
Criptofitas	37	26	1350	666	713	951	#
Flagelados verdes	37	26	1067	949	713	951	#
Chl-a	37	26	1361	665	713	951	#

Por otro lado, para 2017 se encontró que la contribución de grupos o estructura de la comunidad fue diferente entre las regiones Danco-Brabant; Danco- Bismarck y Brabant- Bismarck. Este análisis no se pudo realizar para las regiones Advord-Flandres y Neumayer por el bajo número de muestras disponibles (n=2) (Tabla 2.8).

Tabla 2.8. Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en la contribución de grupos del fitoplancton entre las regiones del 2017. Se indica el número de datos para cada cruce(n), los valores calculados (T1Región1, T2 Región2), los valores críticos (Límite Inferior: TL y Superior: TU) y el alfa usado fue del 5%. El Signo # significa que las regiones son diferentes.

2017	Grupo	n		Valor calculado		Valor crítico		Ho
		1	2	T1	T2	TL	TU	Decisión
Danco-Brabant	Diatomeas	14	8	162	91	67	117	#
	Dinoflagelados	14	8	162	91	67	117	#
	Dinof ₂ /Diat ₂	14	8	184	69	67	117	#
	<i>Phaeocystis antarctica</i>	14	8	184	69	67	117	#
	Criptofitas	14	8	126	127	67	117	#
	Flagelados verdes	14	8	152	101	67	117	#
	Chl-a	14	8	152	129	124	118	#
Danco-Advord/ Flandres	Diatomeas	14	6	108	217	42	84	#
	Dinoflagelados	14	11	145	180	112	174	#
	Dinof ₂ /Diat ₂	14	11	244	81	112	174	#
	<i>Phaeocystis antarctica</i>	14	11	259	66	112	174	#
	Criptofitas	14	11	226	99	112	174	#
	Flagelados verdes	14	11	137	187	112	174	#
	Chl-a	14	11	115	210	112	174	#
Brabant-Advord/ Flandres	Diatomeas	8	11	41	149	77	139	#
	Dinoflagelados	8	11	64	126	77	139	#
	Dinof ₂ /Diat ₂	8	11	108	82	77	139	=
	<i>Phaeocystis antarctica</i>	8	11	114	114	59	101	#
	Criptofitas	8	11	118	72	59	101	#
	Flagelados verdes	8	11	63	127	59	101	#
	Chl-a	8	11	56	134	59	101	#

En el caso de enero de 2018, al no contar con el suficiente número de datos para la región Neumeyer, no se pudo definir si la contribución de grupos era diferente respecto a las demás regiones. En términos generales, entre las regiones se encontraron diferencias con excepción de las regiones Danco y Brabant, donde la contribución de todos los grupos fue igual (Tabla 2.9). Tampoco se identificaron

diferencias en la contribución de los grupos de los dinoflagelados y las criptofitas en Advord –Flandres y Crocker, así como del grupo dinof₂/diato₂, en Brabant y Crocker.

Tabla 2.9. Resultados Wilcoxon no paramétrico para evaluar las diferencias en la contribución de grupos del fitoplancton entre las regiones del 2018. Se indica el número de datos para cada crucero(n), los valores calculados (T1_{Región1}, T2_{Región2}), los valores críticos (Límite Inferir: TL y Superior: TU) y el alfa usado fue del 5%. El Signo # significa que las regiones son diferentes.

2018	Grupo	n		Valor calculado		Valor crítico		Ho
		1	2	T1	T2	TL	TU	Decisión
Danco-Brabant	Diatomeas	8	8	70	66	51	85	=
	Dinoflagelados	8	8	65	71	51	85	=
	Dinof ₂ /Diato ₂	8	8	67	61	51	85	=
	<i>Phaeocytis antarctica</i>	8	8	57	79	51	85	=
	Criptofitas	8	8	56	80	51	85	=
	Flagelados verdes	8	8	73	63	51	85	=
	Chl-a	8	8	62	74	51	85	=
Danco-Advord/ Flandres	Diatomeas	8	4	60	18	15	37	#
	Dinoflagelados	8	4	48	30	15	37	#
	Dinof ₂ /Diato ₂	8	4	66	12	15	37	#
	<i>Phaeocytis antarctica</i>	8	4	64	14	15	37	#
	Criptofitas	8	4	50	28	15	37	#
	Flagelados verdes	8	4	59	19	15	37	#
	Chl-a	8	4	36	42	15	37	#
Danco-Crocker	Diatomeas	8	11	52	26	59	101	#
	Dinoflagelados	8	11	54	24	59	101	#
	Dinof ₂ /Diato ₂	8	11	47	31	59	101	#
	<i>Phaeocytis antarctica</i>	8	11	52	26	59	101	#
	Criptofitas	8	11	47	31	59	101	#
	Flagelados verdes	8	11	59	19	59	101	#
	Chl-a	8	11	41	37	59	101	#
	Dinoflagelados	8	4	64	14	15	37	#

Brabant / Advord-Flandres	Dinof₂/Diat₂	8	4	58	28	15	37	#
	<i>Phaeocystis antarctica</i>	8	4	62	16	15	37	#
	Criptofitas	8	4	60	10	15	37	#
	Flagelados verdes	8	4	54	24	15	37	#
	Chl-a	8	4	36	42	15	37	#
Brabant-Crocker	Diatomeas	8	4	51	27	15	37	#
	Dinoflagelados	8	4	55	23	15	37	#
	Dinof₂/Diat₂	8	4	46	32	15	37	=
	<i>Phaeocystis antarctica</i>	8	4	56	22	15	37	#
	Criptofitas	8	4	54	24	15	37	#
	Flagelados verdes	8	4	59	19	15	37	#
	Chl-a	8	4	46	32	15	37	#
Advord-Flandres/Crocker	Diatomeas	4	4	11	25	11	25	#
	Dinoflagelados	4	4	21	15	11	25	=
	Dinof₂/Diat₂	4	4	10	26	11	25	#
	<i>Phaeocystis antarctica</i>	4	4	10	26	11	25	#
	Criptofitas	4	4	14	22	11	25	=
	Flagelados verdes	4	4	26	10	11	25	#
	Chl-a	4	4	26	10	11	25	#

Teniendo en cuenta que los análisis previos determinaron para las variables hidrográficas, químicas y biológicas que las regiones al interior del EG son diferentes entre sí, se realizó un Análisis de Componente Principal (ACP) por región para evaluar la asociación de las variables al interior de cada una. En enero de 2017, para las regiones Brabant y Bismarck, cuatro componentes fueron significativos y explicaron el 93 y 92 % de la asociación de las variables (Tabla 2.10).

De otro lado, para las regiones Danco, Advord-Flandres y Neumeyer, tres componentes fueron significativos y explicaron el 80 y 100% de la asociación de las variables. En la región Danco, el componente uno asoció de forma directa a *Phaeocystis antarctica* con la salinidad y de forma inversa a las criptofitas, la temperatura y la Chl-a. En el componente dos, las diatomeas se asociaron inversamente con los nutrientes y en el tres el grupo dinof₂/diato₂, se asoció de forma inversa con los flagelados verdes.

En Brabant, ningún grupo fitoplanctónico se asoció con las variables físicas ni con los nutrientes; en Advord-Flandres y Neumeyer se observaron asociaciones directas de los flagelos verdes, los NO₃⁻ + NO₂⁻ y el PO₄³⁻ e inversas con las diatomeas, la Chl-a y la salinidad en el componente uno, mientras que

en el componente dos la asociación fue directa entre $\text{dinof}_2/\text{diato}_2$ con temperatura y en el tres también se encontró una asociación directa de *Phaeocystis antarctica* con el H_4SiO_4^- .

Tabla 2.10. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) para evaluar la asociación de las variables al interior de las regiones en el crucero de 2017. Los números en negrita indican la asociación directa (+ y/o -) o inversa (-) entre las variables en cada componente. La tabla incluye información sobre el eigenanálisis, donde se indica por región el porcentaje de asociación de las variables explicadas por el modelo que corresponde a los eigenvalores >1.

Eigenanálisis	Danco				Brabant				Advord-Flandres; Neumeyer				Bismarck			
	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3	PC4
Eigenvalor	3.64	3.05	1.15		4.16	3.10	1.78	1.17	6.27	2.90	1.81		5.55	2.35	1.22	1.07
Proporción	0.33	0.27	0.19		0.38	0.28	0.16	0.10	0.57	0.26	0.16		0.505	0.21	0.11	0.92
Acumulado	0.33	0.61	0.80		0.38	0.66	0.82	0.93	0.57	0.83	1.00		0.5	0.72	0.83	0.92
Variables	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3		PC1	PC2	PC3	PC4
Diatomeas	0.13	-0.59	0.62		0.39	-0.26	0.84	-0.07	-0.83	0.51	-0.23		0.74	0.55	0.24	-0.24
dinof2/diat2	0.54	0.07	-0.66		-0.07	0.83	-0.01	0.48	-0.49	-0.81	-0.31		-0.77	-0.50	0.26	-0.23
<i>Phaeocystis antarctica</i>	0.82	0.06	-0.38		0.42	0.80	-0.01	0.30	-0.34	-0.60	-0.72		-0.87	-0.31	0.24	-0.22
Criptofitas	-0.78	0.23	0.16		-0.44	-0.03	-0.73	-0.48	0.90	0.37	0.22		-0.59	0.01	-0.37	0.70
Flagelados verdes	0.29	-0.10	0.75		0.24	-0.84	0.07	0.26	0.83	-0.49	0.25		0.67	-0.38	-0.33	-0.13
Chl-a	-0.79	0.00	0.31		0.21	-0.76	-0.49	0.31	-0.93	0.37	0.05		0.66	0.11	-0.60	-0.26
NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	0.04	0.96	0.12		0.95	0.09	0.02	-0.26	0.98	-0.20	-0.06		-0.66	0.70	-0.22	-0.02
PO ₄ ³⁻	0.23	0.94	0.17		0.97	0.02	-0.09	-0.19	1.00	0.03	0.05		-0.73	0.63	-0.04	0.16
H ₄ SiO ₄ ⁻	-0.18	0.90	0.14		0.76	0.23	0.02	-0.47	0.62	0.28	-0.74		-0.60	0.67	0.08	-0.38
Tem	-0.76	-0.06	-0.51		-0.75	0.50	0.16	-0.31	-0.08	-0.97	0.23		-0.84	-0.46	-0.14	-0.11
Salinidad	0.82	0.08	0.42		0.73	0.36	-0.52	0.20	-0.72	-0.20	0.66		0.63	0.10	0.61	0.41

En cada región se observaron asociaciones diferentes; en algunos casos los grupos fitoplanctónicos se asociaron a los nutrientes y factores hidrográficos como por ejemplo en las regiones del sur y en otros no se observaron asociaciones, como fue el caso de Brabant (Tabla 2.9).

Por otro lado, en enero de 2018 la asociación de las variables en las regiones fue superior en todos los casos al 90%; con excepción de Brabant, en las demás regiones tres componentes fueron significativos (Tabla 2.10). En cada región se encontraron deferentes asociaciones, como por ejemplo en Danco las diatomeas y criptofitas se asociaron de forma inversa con la concentración de ácido silico y de forma directa, *Phaeocystis antarctica*, con $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ y PO_4^{3-} ; en las otras regiones esta asociación no se presentó.

En Brabant, ninguno de los grupos del fitoplancton se asoció con las variables hidrográficas ni con los nutrientes; en Advor-Flandres y Nemeyer se asociaron de forma directa en el componente uno, los flagelados verdes con la salinidad, mientras que de forma inversa lo hicieron las diatomeas, $\text{dinof}_2/\text{diato}_2$, *Phaeocystis antarctica* y las criptofitas. Los nutrientes se asociaron en el componente dos de forma inversa con la Chl-a y la temperatura se agrupó en el tercer componente y no se asoció con ninguna variable.

En Crocker asociaciones directas se observaron entre las diatomeas, *Phaeocystis antarctica*, los flagelados verdes, los tres macronutrientes y la salinidad, mientras que de forma inversa las asociaciones se observaron entre la temperatura y el grupo $\text{dinof}_2/\text{diato}_2$, en el componente uno, mientras que las criptofitas y la Ch-a, no se asociaron a otras variables y se agruparon en los componentes dos y tres, respectivamente.

Tabla 2.11. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) para evaluar la asociación de las variables al interior de las regiones en el crucero de 2018. Los números en negrita indican la asociación directa (+ y/o -) o inversa (-) entre las variables en cada componente. La tabla incluye información sobre el eigenanálisis, donde se indica por región el porcentaje de asociación de las variables explicadas por el modelo que corresponde a los eigenvalores >1.

Eigenanálisis	Danco			Brabant				Advord-Flandres; Neumeyer			Crocker		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Eigenvalor	4.88	2.97	2.10	4.23	3.26	1.98	1.00	6.03	3.43	1.52	6.43	2.96	1.59
Proporción	0.44	0.27	0.19	0.39	0.30	0.18	0.09	0.55	0.31	0.14	0.58	0.27	0.14
Acumulado	0.44	0.72	0.91	0.39	0.68	0.86	0.95	0.55	0.86	1.00	0.58	0.85	1.00
Variables	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Diatomeas	0.22	0.85	-0.24	-0.45	0.73	-0.21	-0.26	-0.88	0.01	-0.48	0.78	-0.27	0.57
dinof2/diat2	-0.08	-0.41	-0.90	0.58	-0.63	0.49	-0.10	-0.90	-0.43	0.07	-0.79	-0.60	-0.16
<i>Phaeocystis antarctica</i>	0.60	0.37	-0.55	-0.08	0.82	0.36	-0.26	-0.98	-0.15	0.13	0.78	-0.62	0.06
Criptofitas	-0.51	0.76	0.20	-0.52	0.06	-0.85	-0.02	-0.95	0.11	-0.31	0.34	0.94	0.09
Flagelados verdes	0.17	-0.47	0.85	-0.25	0.43	-0.07	0.86	0.98	0.15	0.11	0.97	-0.20	0.13
Chl- <i>a</i>	-0.69	0.46	0.28	0.20	-0.43	-0.82	-0.23	0.77	0.64	-0.04	-0.27	-0.49	0.83
NO ₃ ⁻ +NO ₂ ⁻	0.96	-0.08	0.22	0.96	0.04	-0.17	0.18	0.40	-0.92	-0.06	0.82	-0.46	-0.33
PO ₄ ³⁻	0.94	0.12	0.11	0.76	0.60	0.02	-0.12	0.34	-0.92	0.21	0.83	-0.48	-0.28
H ₄ SiO ₄ ⁻	0.61	-0.72	-0.09	0.84	-0.47	-0.24	0.13	0.48	-0.88	0.03	0.90	-0.02	-0.44
Tem	-0.87	-0.41	-0.20	-0.78	-0.55	0.25	0.01	-0.24	0.53	0.81	-0.87	-0.32	-0.39
Salinidad	0.87	0.46	0.03	0.72	0.63	-0.14	-0.01	0.69	0.25	-0.68	0.74	0.67	0.03

2.4. Discusión

El EG se ha considerado como un área altamente heterogénea y productiva (Rodríguez *et al.*, 2002; Isla *et al.*, 2002; Kerr *et al.*, 2018; da Cunha *et al.*, 2018) en donde procesos físicos, químicos y biológicos interactúan para generar divisiones al interior de este. Datos de dos Expediciones oceanográficas confirmaron la división del EG en seis regiones, cuya variabilidad responde a la dinámica local de cada región.

En las aguas superficiales asociadas con la variabilidad de las propiedades en la capa de mezcla (Torres *et al.*, 2020), se observó durante las dos Expediciones la presencia de un frente hidrográfico (isoterma de 0.5°C) que separó aguas frías en las regiones del sur de aguas cálidas del norte. Sin embargo, este patrón por debajo de la profundidad de la capa de mezcla se invirtió, es decir en las regiones del norte predominaron aguas frías, mientras que en las del sur fueron mas cálidas. En otros estudios (Kerr *et al.*, 2018; Rodríguez *et al.*, 2002), este patrón lo asociaron con la presencia de un frente térmico subsuperficial que se ubica hacia el centro del EG y presenta algunas variaciones espacio-temporales. El cambio de posición de este frente se ha asociado principalmente con las variaciones de la temperatura y salinidad por abajo de la capa de mezcla (Sangra *et al.*, 2011; García *et al.*, 2002).

En términos hidrográficos, las regiones durante enero de 2017 y enero de 2018 registraron diferencias según el resultado del análisis de Wilcoxon (Tabla 2.2). Estas diferencias permitieron inferir que los procesos biológicos y químicos al interior de cada una de las regiones también cambian, con lo cual se argumenta la naturaleza dinámica entre regiones y periodos analizados. Por otro lado, la profundización de la capa de mezcla en años más cálidos por ejemplo (enero de 2017), contribuye con el aumento en la estratificación de la columna de agua debido al aporte de aguas de deshielo. Otros factores identificados en la reducción de las macronutrientes en la superficie se atribuyen al menor suministro vertical con el tiempo (Freeman *et al.*, 2018) y a la actividad biológica o utilización del fitoplancton en crecimiento (Kim *et al.*, 2016; Hoffman *et al.*, 2008).

El resultado del análisis estadístico de Wilcoxon, también mostró cambios entre regiones y periodos analizados (2017 y 2018) en cuanto a los macronutrientes (Tabla 2.4). Estas diferencias, pueden explicarse por los diferentes mecanismos que han sido sugeridos como responsables en los cambios de la concentración de nutrientes en la columna de agua, como por ejemplo: a) el consumo superficial, b) el aporte glacial, c) las masas de agua que transportan aguas del fondo hacia la superficie y que están influenciada por la batimetría de las cuencas (Hoppema *et al.*, 2015), d) la mezcla de masas de agua, por efectos de dilución (Kim *et al.*, 2016), e) los tiempos de residencia de las masas de agua (Zou *et al.*, 2002); e) la descomposición de la materia orgánica, entre otros. Todos estos mecanismos ocurren al interior del EG (Kerr *et al.*, 2018; Mendes *et al.*, 2017; Rodríguez *et al.*, 2002).

Entonces en términos de la variabilidad de los macronutrientes, se refuerza el argumento de una dinámica local de procesos físicos y biológicos distinta (Rubin, 2003) al interior de las regiones que influye sobre las concentraciones de estos. Además, se encontró que la dinámica de nutrientes mostró un patrón

claro y distinto con mayores concentraciones en las regiones del sur durante enero de 2018 (Fig. 2.7) de $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ y H_4SiO_4 , pero muy homogéneo de PO_4^{3-} ; y entre periodos, enero de 2017 registró menores concentraciones que enero de 2018 (Fig. 2.8).

Durante enero de 2017, temperaturas más cálidas en la superficie incrementaron el aporte de aguas de deshielo (Torres *et al.*, 2020) con aumentos en la biomasa fitoplanctónica en las regiones Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck ubicadas en el sur del EG (Fig. 2.10). Estos factores, explican la menor concentración de macronutrientes en 2017 con respecto a 2018 en la superficie en esas regiones. De otro lado, en enero de 2018, el intervalo de variación de ácido silícico fue menor en las regiones Danco, Brabant y Crocker ubicadas en el norte con respecto a las regiones del sur. Los $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ en las regiones Danco y Brabant, mostraron intervalos de variación similares, pero en Crocker también ubicada en el norte estos intervalos fueron menores; por el contrario, en las regiones del sur (Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck) estos intervalos no fueron tan homogéneos (Tabla 2. 4).

Otros estudios (Prezelin *et al.* 2000; Klinck *et al.* 2004), indicaron que el suministro y el ciclo de macro y micronutrientes inorgánicos y orgánicos en la WAP, está regulado por procesos físicos y biológicos. Dentro de estos, la fuente principalmente de aporte es el Agua de Fondo Circumpolar (CDW) que se introduce en la plataforma desde la Corriente Circumpolar Antártica (ACC) (Shofield *et al.* 2017; Henley *et al.*, 2017). En el caso del EG, son pocos los trabajos que documentan la dinámica de los nutrientes (Kim *et al.*, 2016; Hofer *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2020) por esto la variabilidad interanual y control físico sobre los procesos biogeoquímicos es menos entendido que en la WAP.

El trabajo de Kim *et al.* (2016), es uno de los pocos que documenta a partir de una serie de tiempo (1993–2013) del Programa de Estados Unidos-Palmer, los factores que influyen en la dinámica de los nutrientes en esta área. Kim *et al.* (2016), indicaron que son factores climáticos de gran escala como el Índice Multivariado ENSO (MEI) y el Modo Anular del Sur (SAM), los efectos de dilución por el aporte de agua meteórica, así como el control biológico (florecimientos de primavera y verano), los principales factores que ejercen control sobre los nutrientes en el EG.

Sin embargo, en este estudio la dinámica local constituye un factor que determina la dinámica de los nutrientes en cada región. Es por ello, que en las regiones ubicadas en el sur (Advord-Flandres, Neumeyer y Bismarck) la presencia del mUCDW explica las máximas concentraciones en profundidades por debajo de los 100 m de macronutrientes; a diferencia de las regiones del norte donde las máximas concentraciones se presentaron por debajo de los 200 m y estaría dada por el agua de fondo TWW.

Lo contrario, se observó en la superficie donde los procesos biológicos invierten el patrón con menores concentraciones, aunque en superficie en las regiones del norte se observaron mayores concentraciones con respecto a las del sur, aspecto también observado por García *et al.*, 2002, quienes para los veranos de 1995 y 1996 asociaron un fuerte consumo de nutrientes en aguas superficiales por parte del fitoplancton.

Por otro lado, las razones de asimilación Si: N y N: P observadas en cada una de las regiones (Tabla 2.5), definieron características bioquímicas únicas entre regiones, de manera que desde el punto

de vista químico los modelos de regresión reafirman la división del EG en regiones con excepción de Crocker. Para Crocker, la evidencia estadística sugiere contar con un mayor número de observaciones para poder determinar si las razones de asimilación son diferentes con respecto a las demás regiones. De acuerdo con Henley *et al.* (2017), las razones de asimilación N:P de ~13 en la WAP son indicativas de áreas con una comunidad del fitoplancton dominadas por diatomeas en condiciones de florecimiento, mientras que razones de ~21, son características de áreas dominadas por comunidades con otros grupos diferentes a las diatomeas y en condiciones de menor productividad.

Por otro lado, se observó que las razones de asimilación por arriba de los 100 m son mayores, lo cual sugiere que este estrato de la columna de agua es mucho más activo, en respuesta a la actividad biológica asociada a la dinámica de la zona eufótica. En el caso particular de las altas tasas observadas para Si:N a diferencia de otros lugares en Antártida (Freeman *et al.*, 2019), estas están asociadas a diferentes factores como: (1) la utilización de nitrato, pero no la absorción de ácido silícico, que además es limitada por la disponibilidad de luz en profundidad; (2) el alto contenido de ácido silícico estacional en relación con la utilización de nitrato+nitrato y (3) una remineralización más rápida del nitrógeno que del ácido silícico (Mosseri *et al.*, 2008).

Las diferencias de los patrones hidrográficos y químicos observados (Tablas 2.3 y 2.4) entre regiones y periodos hasta ahora discutidos, explican los cambios de sur a norte en la distribución de grupos del fitoplancton. En donde las diatomeas y los flagelados verdes dominaron las regiones del sur (Advord-Flandres, Nemeyer y Bismarck), mientras que las criptofitas y *Phaeocystis antarctica* dominaron en el norte (Danco, Brabant y Crocker). Sumado a lo anterior, entre periodos (enero de 2017 y enero de 2018), el cambio en la estructura de la comunidad también fue evidente (Figuras 2.10 y 2.11).

Estudios anteriores documentaron tanto la distribución como la composición de la comunidad fitoplanctónica y su relación con las condiciones ambientales en el EG (Rodríguez *et al.*, 2002; Varela *et al.*, 2002; Kozłowski *et al.*, 2011; Mendes *et al.*, 2012, 2013, 2017; Shofield *et al.*, 2017; Henley *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2018). Todos coinciden en indicar que la estabilidad de la columna de agua es uno de los factores que determinan la distribución de la biomasa y composición taxonómica de la comunidad fitoplanctónica en el área (Ferreira *et al.*, 2018), sin embargo, este trabajo es el primero en delimitar regiones al interior del EG con cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica, que responden a diferentes asociaciones de factores hidrográficos y químicos (Tablas 2.9 y 2.10).

Arriba se indicó que el EG se le considera como un sistema altamente productivo (Rodríguez *et al.*, 2002; Mendes *et al.*, 2017; Kerr *et al.*, 2018) durante el verano. Shofield *et al.* (2017) por ejemplo, informaron que para el sur del EG (regiones Anvers-Flandres, Neumeyer y Bismarck en este estudio) la mayor contribución de grupos a la estructura de la comunidad fitoplanctónica correspondió a las diatomeas, criptofitas y dinof₂/diato₂ y plantearon además una segregación de nicho de estos grupos en la columna de agua. En dicha segregación, para el caso de las criptofitas indicaron que su distribución se restringió a la parte más superficial (10.23 m), en áreas de menor salinidad y temperatura que las diatomeas, las cuales se profundizaron a 15.09 m y predominaron en aguas más cálidas con amplios intervalos de salinidad y el

grupo dinof2/diato2, se distribuyó a mayor profundidad (17.60m) con amplios intervalos de temperatura y salinidad.

El estudio de Shofield *et al.* (2017) caracterizó solo a la parte sur del Estrecho, por lo que no es posible observar si este patrón se mantiene a lo largo del EG. Sin embargo, otros estudios (Mendes *et al.*, 2012, 2013, 2018; Ferreira *et al.*, 2018) documentaron una mayor distribución de otros grupos, e informaron que las criptofitas son más dominantes en el norte del EG (Danco, Brabant y Crocker). En este estudio también se observó la mayor distribución de criptofitas en el norte (Fig. 2.10; 2.11), resultado que además fue confirmado con la mayor distribución del pigmento marcador para este grupo, la alloxantina en las regiones Danco y Brabant. Por lo anterior, la segregación de nicho en este trabajo esta dada entre regiones (Fig. 2.10; 2.11) y se confirma en el capítulo III.

En cuanto a periodos analizados (enero de 2017 y enero de 2018), se observó la predominancia de las diatomeas, criptofitas y el grupo dinof2/diato2 en enero de 2017 (Fig 2.10). Sin embargo, en enero de 2018 los flagelados verdes aumentaron al igual que el grupo dinof2/diato2, mientras que las diatomeas y las criptofitas disminuyeron en contribución y predominó un grupo nuevo, *Phaeocystis antarctica* (Fig 2.11). De acuerdo con la argumentación de Shofield *et al.* (2017), la segregación de nicho también se presenta entre periodos analizados, ya que las condiciones ambientales que caracterizaron a cada Expedición se vieron reflejadas en cambios de los grupos fitoplacntónicos.

Este argumento se soporta en la presencia de *Phaeocystis antarctica* en enero de 2018, así como de las diatomeas y criptofitas en enero de 2017, el cual se consideró como un año cálido (Torres *et al.*, 2020). Adicionalmente, estudios como los de Moline *et al.* (2004), Schloss *et al.* (2012) y Rozema *et al.* (2017), también describen esta distribución; aunque el estudio de Arrigo *et al.* (2017) indicó la mayor abundancia de *Phaeocystis antarctica*, durante la primavera. En consecuencia, la segregación de nicho esta dada por la estación del año. Se considera necesario contar con mayor cantidad de muestreos a lo largo de la WAP, en función de las propiedades de las masas de agua y de las condiciones climáticas afectados por eventos de mesoescala para reforzar este argumento.

La asociación de parámetros hidrográficos, químicos y grupos fitoplanctónicos para enero de 2017 y enero de 2018 mostraron relaciones diferenciadas. Por ejemplo, Danco durante 2017 mostró una asociación directa de *Phaeocystis antarctica* con la salinidad y de las criptofitas con la temperatura, pero fue inversa de las diatomeas con los macronutrientes y del grupo dinof2/diato2 con los flagelados verdes (Tabla 2.10). En 2018, asociaciones directas de *Phaeocystis antarctica* con la salinidad e inversa de las diatomeas con $H_4SiO_4^-$ y del grupo dinof2/diato2 con los flagelados verdes se mantuvieron, pero en el caso de las criptofitas con la temperatura y de las diatomeas con $NO_3^-+NO_2^-$ y el PO_4^{3-} no se observaron (Tabla 2.11). El cambio observado en la asociación de las criptofitas entre 2017 y 2018, está relacionado con las diferencias en la temperatura entre periodos, ya que fue mayor en 2017 (Fig. 2.1) y para el EG, estos cambios en el incremento de la criptofitas (Shofield *et al.*, 2017; Mendes *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2020), se ha relacionado con la preferencia de este grupo por aguas menos saladas (32.5–33.75 UPS) y menos cálidas (-1 a 1°C) que las que prefieren las diatomeas (32–34.5 UPS; -1.5 a 2.5° C)

(Moline *et al.*, 2004; Schofield *et al.*, 2017). Por otro lado, la asociación directa de *Phaeocystis antarctica* con la salinidad, confirma la preferencia de este grupo por aguas más saladas y frías, donde el hielo marino superficial favorece su crecimiento (Arrigo *et al.*, 2017).

En Brabant, no se observaron asociaciones de los grupos del fitoplancton con las variables hidrográficas ni con las químicas durante los dos veranos analizados (Tablas 2.10 y 2.11). Sin embargo, en 2017 una asociación inversa entre las diatomeas y las criptofitas fue observada, lo que confirma la segregación de nicho de estos grupos de acuerdo con los planteamientos de Shofield *et al.* (2017) para Brabant.

Por el contrario, en Crocker se observaron asociaciones directas en el primer componente de las diatomeas, *Phaeocystis antarctica* y los flagelados verdes con los nutrientes y la salinidad, e inversas con la temperatura y el grupo dinof₂/diato₂. También se observó que tanto las criptofitas como la Chl-a, en Crocker no mostraron relación alguna con las demás variables al agruparse en el segundo y tercer componente (Tabla 2.11). Al ser considerada como una región que actúa como sumidero de partículas (Isla *et al.*, 2002), se puede entender por qué la Chl-a no presentó relación alguna con las otras variables y se agrupó sola en el tercer componente, de ahí su menor productividad en relación con las demás regiones.

En el caso de Advord-Flandres que se delimitó al suroeste del EG, registró al igual que Neumeyer asociaciones inversas de las diatomeas, la Chl-a y la salinidad con las criptofitas, los flagelados verdes, el NO₃⁻+NO₂⁻ y el PO₄³⁻, en el componente uno (Tabla 2.10). Se precisa recordar que el componente uno es el que explica la mayor co-variabilidad de los datos analizados. Por otro parte, la asociación fue directa del grupo dinof₂/diato₂ con la temperatura en el componente dos y de *Phaeocystis antarctica* con el H₄SiO₄⁻ en el componente tres, durante 2017. En 2018, se registraron asociaciones inversas de los grupos fitoplanctónicos con la salinidad y de la Chl-a con los macronutrientes (Tabla 2.11).

Al respecto, Costa *et al.* (2020) documentaron a las diatomeas como las mayores contribuyentes a la Chl-a y las asociaron con altas concentraciones de macronutrientes para el verano de 2016. En este trabajo, las asociaciones de 2017 sugieren la misma relación en el caso de las diatomeas con la Chl-a, pero diferente para el caso de los macronutrientes y las condiciones analizadas durante 2018. Estas diferencias en las asociaciones se relacionan con el cambio tanto de las condiciones ambientales como de la estructura de la comunidad fitoplanctónica observados en todo el EG, durante los periodos analizados. De otro lado, tanto para Advord-Flandres como para Neumeyer, fueron los flagelados verdes los que contribuyeron con la concentración de Chl-a y no las diatomeas (Fig. 2.10 y 2.11), aspecto que hace la diferencia desde el punto de vista biológico con las regiones del norte y que sustenta la influencia de las condiciones ambientales sobre la composición de grupos.

Sumado a lo anterior, la configuración cerrada de las bahías Advord y Flandres en esta región determinan tiempos de residencia de las masas de agua mayores en relación con las regiones del norte y con velocidades menores de la corriente de Gerlache (Zou *et al.*, 2002). Esto explica la alta productividad de esta región, con mayores concentraciones de Chl-a. Sin embargo, otros estudios (Lundesgaard *et al.*, 2020; Pan *et al.*, 2019), relacionaron como factores ideales para el crecimiento del fitoplancton en Advord-

Flandres, a una mayor estratificación de la columna de agua, la baja influencia del viento y un aporte importante de macronutrientes por fuertes flujos de marea debido a la presencia de los canales Ehrrera y Aguirre. Las regiones que reportaron la mayor PCM fueron Advord-Flandres y Neumeyer (Fig 2.1 y 2.3), de acuerdo con Lundesgaard *et al.* (2020) y Pan *et al.* (2019), esta condición confirma y soporta la mayor concentración Chl-a en estas dos regiones respecto a las del norte.

En Bismarck se observó que en el primer componente las diatomeas, los flagelados verdes, la Chl-a y la salinidad se asociaron de forma inversa con el grupo dinof₂/diato₂, *Phaeocystis antarctica*, NO₃⁻+NO₂⁻, PO₄³⁻ y la temperatura (Tabla 2.10). Lo cual explica la segregación de nicho de las diatomeas respecto a *Phaeocystis antarctica*, por ejemplo, ya que las diatomeas prefieren temperaturas más cálidas (Schofield *et al.*, 2017) que *Phaeocystis antarctica* (Arrigo *et al.* 2017). Además, en esta región las criptofitas no mostraron relación alguna con ninguna de las otras variables analizadas, confirmando su preferencia por las regiones del norte, donde se observó su mayor distribución (Fig. 2.10).

2.5. Conclusiones

Los resultados analizados de los dos cruceros oceanográficos confirmaron la división del EG en regiones dinámicas, contiguas pero autónomas e independientes, con una variabilidad espacio-temporal hidrográfica, química y biológica propia para cada región. Esta variabilidad en las regiones del norte se observó con mayores temperaturas entre la superficie y la capa de mezcla, mientras que las regiones del sur registraron temperaturas más bajas; aunque por debajo de la capa de mezcla este patrón se invirtió. Además, en las regiones del sur se registró la mayor profundidad de la capa de mezcla, la menor disponibilidad en superficie de macronutrientes y la mayor concentración de Chl-a, junto con una contribución de grupos del fitoplancton como las diatomeas y flagelados verdes a diferencia de las regiones del norte donde dominaron las criptofitas y *Phaeocystis antarctica*.

La ventaja de incorporar distintas variables en el análisis, permitió explicar porque dos regiones cercas se dividen. Sin embargo, investigaciones futuras deben incrementar el número de muestras en las regiones del sur para evaluar mejor las diferencias con respecto a las del norte.

Las diferencias en las razones de asimilación Si: N y N:P sugiere regiones únicas desde el punto de vista bioquímico. Por tanto, las interacciones entre la dinámica hidrográfica y de nutrientes al interior de las regiones son los factores que determinan los cambios en la estructura de la comunidad. Estos cambios en la estructura están influenciados además por la luz, así como por la composición y contribución de pigmentos. Se precisan más investigaciones en otros periodos estacionales, para mejorar la comprensión de la biogeoquímica del EG.

La integración de métodos tradicionales basados en mediciones de barcos y de satélites proporcionan programas de observación eficientes, para entender la dinámica e impactos en el EG y la WAP, por lo que se recomienda mantenerlos en el largo plazo.

Capítulo 3

Cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica del Estrecho de Gerlache, basado en la reconstrucción del espectro de absorción específico del fitoplancton durante enero de 2017 y enero de 2018 en la superficie y el máximo profundo de clorofila-a

Resumen

La razón de absorción del fitoplancton por unidad de masa de clorofila-a (Chl-a), denominada como absorción específica del fitoplancton ($a_{ph}^*(\lambda)$) se le ha considerado como un método que permite estudiar cambios en la estructura de la comunidad del fitoplancton, porque la absorción del fitoplancton cambia producto de la variación en la composición, concentración de pigmentos y el tamaño de la célula. En este estudio, con datos de coeficientes de $a_{ph}^*(\lambda)$ medidos en muestra de agua tomadas en el Estrecho de Gerlache (EG) en enero de 2017 y enero de 2018, se presenta el índice TS_{index} , como indicador que identifica cambios en la estructura de la comunidad del fitoplancton. El índice se desarrolló a partir del Análisis de Componentes Principales, con el cual se agruparon los espectros de $a_{ph}^*(\lambda)$ mientras que, con el Análisis de Funciones Empíricas Ortogonales, se realizó la mejor combinación de los espectros asociados y reconstruyó el espectro tipo. Este método además se validó con el Análisis de Discriminante. A partir del TS_{index} , se reconstruyeron 18 perfiles tipo, representativos de estructuras de la comunidad del fitoplancton; tres en la superficie y cinco en el máximo profundo de Chl-a (MPChl-a) para una condición cálida (enero de 2017), mientras que para la condición fría (enero de 2018) se reconstruyeron seis en la superficie y cuatro en el MPChl-a. Cada espectro tipo reconstruido presentó diferentes porcentajes de contribución de grupos fitoplanctónicos: diatomeas, dinoflagelados, $dinof_2/diat_2$, *Phaeocystis antarctica*, criptofitas y flagelados verdes, que explicaron las diferencias tanto en la magnitud como en la forma de los espectros reconstruidos. El índice además confirmó que los espectros de $a_{ph}^*(\lambda)$, pueden usarse para identificar cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica asociados a la ubicación de estas comunidades en la superficie y MPChl-a; por lo tanto, es una herramienta que complementa estudios del fitoplancton y al ser validado en la Antártida se pueden implementar en otras áreas marino costeras como método complementario en estudios del fitoplancton, porque además es sensible a los cambios del medio.

3.1. Introducción

El incremento de la población ejerce una enorme presión sobre las zonas costeras (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2015), resultado inmediato de dicha presión puede ser la presencia de eventos como degradación del ecosistema, contaminación del agua, hipereutroficación, turbidez, entre otros, que son más frecuentes e intensos y pueden tener un efecto negativo sobre los recursos naturales y otros servicios ecosistémicos presentes. De ahí, nace la necesidad de realizar programas de monitoreo que puedan ser implementados de manera rutinaria y que contengan variables que sean sensibles a los cambios del medio.

El fitoplancton, en su calidad de productor primario es responsable de la mitad de la producción primaria a nivel global (Falkowski *et al.*, 1998; Falkowski y Raven, 2007), por lo tanto, su papel es clave en el ciclo global del carbono y el clima porque es la base de la red alimentaria marina y representa una fuente esencial de compuestos elementales y nutrientes en los océanos (Kramer *et al.*, 2018). Debido a lo anterior y considerando que el fitoplancton está constituido por organismos de vida corta, se propone que los cambios de la comunidad fitoplanctónica pueden reflejar los cambios en los ecosistemas de una manera rápida. Estudios sobre la variabilidad de la comunidad fitoplanctónica marina regularmente se realizan basados en muestras de agua y conteos al microscopio (Hu *et al.*, 2014), lo cual lleva un tiempo considerable de análisis.

Existen otros métodos más rápidos para analizar la variabilidad de la comunidad fitoplanctónica, a través de los cambios en las propiedades bio-ópticas de la columna de agua, tales como el coeficiente de absorción del fitoplancton ($a_{ph(\lambda)}$). Desde hace algunas décadas se han realizado estudios de estas propiedades ópticas inherentes y su relación con procesos de autoecología de la comunidad fitoplanctónica (ver Bricaud *et al.*, 1995, 2004; IOCCG, 2006; Platt y Sathyendranath, 2008; Roy *et al.*, 2010; Xi *et al.*, 2015). En este sentido, la relación entre $a_{ph(\lambda)}$ y la concentración de Chl-*a* ha sido objeto de particular interés (Babin *et al.*, 1993, 2003; Bricaud *et al.*, 1995, 2004; Ciotti *et al.*, 2002; Xi *et al.*, 2017). A esta relación, de absorción por unidad de masa de Chl-*a*, se denomina coeficiente de absorción específico del fitoplancton, ($a_{ph(\lambda)}^*$) (Bricaud *et al.*, 1995; Sathyendranath *et al.*, 2004).

Desde la década de los 80, Sathyendranath *et al.* (1987) mencionaron que los valores de $a_{ph(\lambda)}^*$ presentan una alta variabilidad. Es precisamente por esto que se propone que cambios en la estructura fitoplanctónica, como respuesta a la variabilidad ambiental, pueden verse reflejados en el $a_{ph(\lambda)}^*$. Dentro de las causas identificadas de variabilidad del $a_{ph(\lambda)}^*$, se pueden mencionar los cambios en la composición y concentración de pigmentos fotosintéticos (Babin *et al.*, 1993, Bricaud *et al.*, 1995, 2004), los cuales pueden ocasionar que los espectros se aplanen debido a adaptaciones por parte de la comunidad fitoplanctónica a los cambios de luz (Roy *et al.*, 2010; Marra *et al.*, 2000).

También si estos cambios son muy fuertes, podrían originar una sustitución de nicho de algunas especies por otras cambiando así la estructura de la comunidad. Ciotti *et al.* (2002), Cota *et al.* (2003) y

Sathyendranath *et al.* (2004) reportaron que las diferencias en las formas, así como el tamaño (Xi *et al.*, 2015; 2018) del fitoplancton afectan de una manera directa al $a_{ph(\lambda)}^*$.

Uno de los primeros trabajos que trató de relacionar la variabilidad de $a_{ph(\lambda)}^*$, con base en la variabilidad de la estructura de la comunidad fitoplanctónica fue el propuesto por Garver *et al.* (1994); luego Stuart *et al.* (2000) para el Mar de Labrador demostraron que las poblaciones de diatomeas presentaban $a_{ph(\lambda)}^*$ mucho más bajos que los primnesiófitos, debido al aumento en las concentraciones de cloro intracelular en respuesta a la adaptación a bajos niveles de luz, así como al aumento del empaquetamiento del pigmento en las células de diatomeas más grandes. Posteriormente, Ciotti *et al.* (2002) tipificaron espectros de absorción para asociarlos con cambios en la comunidad fitoplanctónica en aguas superficiales, diferenciando entre fracciones del fitoplancton grande y pequeño.

Se ha observado que en regiones costeras la variabilidad del $a_{ph(\lambda)}^*$ puede explicarse con respecto al tamaño del fitoplancton, unido a la composición pigmentaria presente (Babin *et al.* 2003). Bricaud *et al.* (2004), además de los dos factores arriba mencionados, indicaron que la variabilidad de $a_{ph(\lambda)}^*$ es mayor en aguas oligotróficas respecto a aguas eutróficas, ya que está relacionado con el tamaño de las poblaciones, por lo que su trabajo relacionó el papel de los cambios del tamaño celular en la variabilidad observada del $a_{ph(\lambda)}^*$.

Derivado de esos trabajos siguieron otros como los de Cota *et al.* (2003); Sathyendranath *et al.* (2004); Roy *et al.* (2010); Mao *et al.* (2010) y Xi *et al.* (2015; 2017), quienes aportaron más elementos sobre las relaciones entre el $a_{ph(\lambda)}^*$ y la estructura de la comunidad fitoplanctónica, como el historial de luz. Cota *et al.* (2003), hallaron diferencias entre el $a_{ph(\lambda)}^*$ de las diatomeas con respecto a los primnesiófitos debido a las ventajas que tienen las últimas de absorber la luz en la región azul-verde, por lo que encontraron que son más competitivas en capas de mezcla más profundas. Sathyendranath *et al.* (2004) consideraron la variabilidad del $a_{ph(\lambda)}^*$ en seis grupos del fitoplancton para derivar un algoritmo que diferencia poblaciones de diatomeas de poblaciones fitoplanctónicas mixtas.

Por otro lado, Devred *et al.* (2011) reportaron la variabilidad de $a_{ph(\lambda)}^*$ para tres clases de tamaño de fitoplancton reconstruidos a partir de datos de concentración de Chl-a y del $a_{ph(412,443,490,510,555,620,y\ 670)}$, partiendo del supuesto que la principal fuente de variación en la magnitud del $a_{ph(\lambda)}^*$ es el tamaño de la célula. Recientemente Xi *et al.* (2015; 2018) basados en modelos de datos hiperespectrales diferenciaron diferentes grupos de fitoplancton considerando la variabilidad de $a_{ph(\lambda)}^*$. Ferreira *et al.* (2018) trataron de clasificar grupos de fitoplancton agrupando los espectros de absorción de $a_{ph(\lambda)}$ y su variabilidad con el efecto paquete en aguas antárticas.

A pesar del número de investigaciones en las últimas décadas que tratan de relacionar la variabilidad del $a_{ph(\lambda)}^*$ con el cambio de la comunidad fitoplanctónica, se considera que cada estructura de la comunidad fitoplanctónica tendrá un espectro de absorción $a_{ph(\lambda)}^*$ característico. La idea de este capítulo fue desarrollar un índice ecológico basado en espectros de absorción característicos como un indicador

para describir cambios de la estructura de la comunidad fitoplanctónica en la Península Oeste Antártica (WAP), específicamente en el EG.

Este concepto pudo ser probado en la WAP, debido a que las actividades antropogénicas son bajas y porque además ha sido identificada como una de las regiones del mundo más susceptibles al cambio climático (Turner *et al.*, 2005; Henley *et al.*, 2019).

3.2. Metodología

3.2.1. Muestreo

Una grilla de 19 estaciones ubicadas a lo largo del EG fueron muestreadas en enero de 2017 y 12 estaciones en enero de 2018 (Fig. 1). Estos muestreos se realizaron en el marco de las Expediciones Almirante Padilla y Almirante Tono de Colombia a la Antártida y del Proyecto "Investigación Científica Marina para la Seguridad Marítima en la Antártida-ICEMAN" liderado por la Dirección General Marítima. A través de perfiles de fluorescencia se identificó el máximo profundo de Chl-*a* (MPChl-*a*), con un fluorómetro WetLabs ECO FLNTU acoplado a un SB 19 Plus CTD. El MPChl-*a*, se ha definido como la profundidad de la columna de agua donde se produce la mayor concentración de Chl-*a* (Kiefer *et al.*, 1976, Cullen 1982; Cullen *et al.*, 2015).

Las muestras de agua se tomaron en la superficie y en el MPChl-*a*, a través de un sistema de roseta oceanográfica que incluía 12 botellas de 8 L cada una. Estas muestras se utilizaron para determinar la concentración de pigmentos y los coeficientes de absorción por material particulado ($a_{p(\lambda)}$). Un volumen de 1 a 2 L de agua de mar para cada variable y cada profundidad se filtró con un sistema de presión positiva, a través de filtros Whatman GF/F de 25 mm (IOCCG, 2014). Los filtros para la determinación de la concentración de pigmentos se almacenaron en papel de aluminio, mientras que los filtros para determinar el $a_{ph(\lambda)}^*$ se almacenaron en cápsulas histoprep. Ambos tipos de filtros se mantuvieron en nitrógeno líquido hasta su análisis en laboratorio.

3.2.2. Determinación de pigmentos y grupos fitoplanctónicos

La concentración de pigmentos fitoplanctónicos se determinó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC), según Thomas (2012). La contribución relativa de grupos fitoplanctónicos al total de Chl-*a*, se calculó a partir de los pigmentos marcadores para cada uno de los grupos (Mackey *et al.*, 1996), mediante el CHEMTAX v 1.95.

Este programa requiere como entrada la concentración de pigmento, así como la razón pigmento: Chl-*a* (razón inicial) asociada a cada grupo. Las razones de pigmento iniciales (Tabla 2.1) se derivaron de investigaciones previas en la región (Mendes *et al.*, 2012; Ferreira *et al.*, 2018). Seis grupos de fitoplancton

fueron considerados para este trabajo: diatomeas, dinoflagelados, *Phaeocystis antarctica*, criptofitas, flagelados verdes y el grupo quimiotaxómico denominado dinof₂/diato₂. Cabe señalar que la razón de entrada del grupo dinof₂/diato₂ fueron los pigmentos Chlc₃, Chlc₂, 19'But-fuco, Fuco y 19'Hex-fuco e incluye a los dinoflagelados autotróficos carentes de peridina y a las diatomeas con Chlc₃ (Wright y Jeffrey, 2006). Este trabajo consideró como Chl-a total (TChl-a), a la suma de Chl-a más la Divinyl-Chl-a, y se utilizó para estimar el $a_{ph(\lambda)}^*$.

3.2.3. Determinación del coeficiente de absorción específico del fitoplancton

$$(a_{ph(\lambda)}^*)$$

En el laboratorio, los filtros se analizaron según el protocolo de Mitchell *et al.* (2002), utilizando un espectrofotómetro UV-Visible Cary 100 con una esfera integradora. Para calcular el $a_{ph(\lambda)}^*$, primero se midió la densidad óptica del material particulado de las muestras y de filtros blanco en el intervalo de longitud de onda de 400-800 nm cada 1 nm. Luego, los filtros se sumergieron en metanol caliente durante 15 min y se lavaron con agua de mar filtrada para eliminar los pigmentos y obtener la densidad óptica del detrito en el mismo intervalo de longitud de onda. Posteriormente, se calculó el coeficiente de absorción del fitoplancton $a_{ph(\lambda)}$ (Eq. 1) entre la diferencia de $a_p(\lambda)$ y $a_d(\lambda)$:

$$a_{ph(\lambda)} = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad \text{Eq. (1)}$$

Mientras que el $a_{ph(\lambda)}^*$ se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$a_{ph(\lambda)}^* = a_{ph(\lambda)} / TChl - a \quad \text{Eq. (2)}$$

3.2.4. Determinación del índice del espectro tipo

Para determinar el cambio en la estructura de la comunidad del fitoplancton, los datos del $a_{ph(\lambda)}^*$ de la superficie se analizaron por separado de los datos del MPChl-a para enero de 2017 y enero de 2018. Por eso, se determinaron cuatro condiciones de análisis: En un periodo cálido en la superficie (enero de 2017) y en el MPChl-a (enero de 2017) y en uno frío en la superficie (enero de 2018) y en el MPChl-a (enero de 2018). Para calcular el índice del espectro tipo (TS_{index}) se utilizó el intervalo de longitudes de onda de 400 a 700 nm del $a_{ph(\lambda)}^*$; En este proceso se realizaron los siguientes pasos: Los datos del $a_{ph(\lambda)}$ fueron normalizados por el TChl-a. Luego, los espectros $a_{ph(\lambda)}^*$ se estandarizaron por cada longitud de onda de acuerdo con la ecuación 3.

$$Za_{ph(\lambda)}^* = \frac{a_{ph(\lambda)}^* - \overline{a_{ph(\lambda)}^*}}{SD_{a_{ph(\lambda)}^*}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Donde $a_{ph(\lambda)}^*$, corresponde al valor de $a_{ph(\lambda)}^*$ en cada longitud de onda, $\overline{a_{ph(\lambda)}^*}$ es el promedio por longitud de onda de todas las estaciones de la matriz y $SD_{a_{ph(\lambda)}^*}$, es la desviación estándar. Con la finalidad de agrupar las estaciones en cada escenario, los espectros estandarizados $Za_{ph(\lambda)}^*$ se agruparon a partir de un Análisis de Componente Principal (ACP) en su resolución numérica (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2011).

Para determinar los grupos que se asociaron, el criterio fue primero seleccionar los componentes con eigenvalores mayores a 1.0 y luego seleccionar las estaciones con asociación directa por condición. Para cada grupo asociado, el espectro tipo (TS) se calculó con base en la Primera Función Empírica Ortogonal Estandarizada (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2015) a través de la ecuación 4.

$$TS_1 = [(b_{1EA} * Z_{a*ph(\lambda)EA}) + (b_{1EB} * Z_{a*ph(\lambda)EB}) + \dots (b_{1Ej} * Z_{a*ph(\lambda)Ej})] \quad \text{Eq. (4)}$$

En este caso, b_{1A} , b_{1B} , y b_{1J} son los coeficientes del primer eigenvector, mientras que $Z_{a*ph(\lambda)EA}$, $Z_{a*ph(\lambda)EB}$, $Z_{a*ph(\lambda)Ej}$, corresponden a las anomalías estandarizadas de los espectros $a_{ph(\lambda)}^*$ de cada estación (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2015). Por lo tanto, el TS_1 permite reconstruir la forma espectral característica de los $a_{ph(\lambda)}^*$. Así que a partir del TS se definió el índice del espectro tipo como:

$$TS_{Index} = -1 * (TS_1) \quad \text{Eq. (5)}$$

Para cada grupo de estaciones asociado con el ACP, se determinó el porcentaje de contribución promedio de los grupos de fitoplancton. Esto permitió explicar los cambios en cada forma espectral reconstruida con el TS_{Index} .

3.2.5. Validación de estaciones agrupadas para derivar TS_{index} .

Finalmente, se realizó un análisis de discriminante (AD) para confirmar que los espectros $a_{ph(\lambda)}^*$ de las estaciones, se clasificaron adecuadamente dentro de los grupos asociados para la reconstrucción de TS_{index} . Los parámetros de entrada para el análisis fueron el TS (fila) como grupo y los valores de longitud de onda (columnas) como predictores. Además, el análisis se validó mediante una función de discriminación lineal.

3.3. Resultados

3.3.1. Periodo cálido en la superficie (enero de 2017)

El ACP explicó el 95% de la variabilidad espacial, con tres componentes significativos, aunque se observó la asociación de estaciones solamente en los componentes uno y dos (Tabla 3.1). El AD confirmó la clasificación de las estaciones dentro de cada grupo y se encontró que para esta condición todas las estaciones fueron clasificadas adecuadamente (Tabla 3.2). Los grupos derivados de estas asociaciones se utilizaron para estimar tres TS, a saber, TS1, TS2 y TS3 (Fig. 3.1). Dado que todos los grupos de estaciones se clasificaron adecuadamente, entonces los TS son representativos de las estructuras de la comunidad de fitoplancton en el área. Las estaciones agrupadas en el TS1 al estar distribuidas en todo el EG (Tabla 3.1); representa a una comunidad distribuida en la superficie de toda el área de estudio.

Tabla 3.1. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) para determinar la asociación de estaciones en (a) la superficie y (b) el máximo profundo de Chl-a (MPChl-a) en la condición cálida con espectros $a^*_{ph(\lambda)}$. En las primeras tres líneas se encuentra el eigenanálisis de los componentes significativos: El autovalor, la proporción de la varianza explicada por cada componente y finalmente la proporción acumulada. A continuación, se muestran los componentes seleccionados para cada condición. Los números en negrita indican el vector propio asociado con un componente dado y entre paréntesis el número del espectro tipo reconstruido al que contribuyó la estación.

a) Periodo cálido-Superficie (2017)				b) Periodo cálido- MPChl-a (2017)			
Eigenvalor	14.07	2.95	1.02	8.20	5.60	1.92	1.17
Proporción	0.74	0.16	0.05	0.46	0.31	0.11	0.07
Acumulado	0.74	0.90	0.95	0.46	0.77	0.87	0.94
Estación	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2	CP3	CP4
E18	0.99 _(TS1)	0.22	0.07	-0.83 _(TS5)	0.48	0.29	0.09
E21	0.97 _(TS1)	0.09	0.04	-0.68 _(TS5)	-0.66	0.04	-0.15
D03	0.96 _(TS1)	0.08	0.02	-0.54	0.76 _(TS6)	-0.08	0.38
E22	0.90 _(TS1)	-0.01	0.13				
E27	0.75 _(TS1)	0.64	-0.43	-0.97 _(TS5)	-0.09	-0.07	0.22
D04	0.96 _(TS1)	0.24	0.16	-0.33	-0.27	-0.81 _(TS8)	0.18
E16	0.92 _(TS1)	0.00	0.11	-0.44	0.81 _(TS6)	0.28	-0.06
E17	0.99 _(TS1)	0.31	0.01	-0.75 _(TS5)	0.57	0.29	-0.02
E13	-0.42	0.66 _(TS3)	0.31	0.98 _(TS4)	0.21	-0.06	-0.04
E12	-0.95	-0.14	0.18	0.89 _(TS4)	0.38	0.00	0.15
H01-1	0.56 _(TS1)	-0.24	0.49	0.17	-0.83 _(TS7)	0.11	-0.33
H01-2	0.85 _(TS1)	0.70	-0.15	0.42	-0.49 _(TS7)	0.30	0.40
H01-3	0.12	0.86 _(TS3)	0.47	0.18	-0.78 _(TS7)	0.21	-0.68
H02	0.98 _(TS1)	0.39	-0.03	-0.34	-0.71 _(TS7)	0.28	0.31
E04	0.72	0.73 _(TS3)	-0.08	-0.92 _(TS5)	-0.25	0.02	0.22
E06	-0.86 _(TS2)	-0.66	-0.25	0.76	-0.33	0.34	-0.30

E08	-0.99 _(TS2)	-0.46	-0.04	0.59	-0.22	-0.77 _(TS8)	-0.12
E01	-0.94 _(TS2)	-0.09	-0.05	-0.59	-0.77 _(TS7)	-0.15	-0.24
E03	0.93	0.42	-0.27	-0.84 _(TS5)	-0.47	0.17	-0.21

Tabla 3.2. Resultados del Análisis Discriminante (AD) con el que se validó la agrupación de las estaciones para reconstruir a los espectros tipo en las condiciones: a) En la superficie para un periodo cálido (2017); b) En el máximo profundo de Chl-a (MPChl-a) para un periodo cálido (2017).

a)						
Estación	Espectro Tipo Verdadero					
En grupo (TS)						
	TS1	TS2	TS3			
TS1	12	0	0			
TS2	0	4	0			
TS3	0	0	3			
Total N	12	4	3			
N Correctos	12	4	3			
Proporción	1	1	1			
N= 19	N correctos=19			Proporción Correcta= 1.00		

b)						
	TS4	TS5	TS6	TS7	TS8	
TS4	3	0	0	0	0	
TS5	0	5	0	1	0	
TS6	0	0	2	0	0	
TS7	0	1	0	4	0	
TS8	0	0	0	0	2	
Total N	3	6	2	5	2	
N Correctos	3	5	2	5	2	
Proporción	1	0.833	1	0.8	1	
N= 18	N correctos=17			Proporción Correcta= 0.89		

Los espectros analizados para esta condición no agruparon estaciones ubicadas en las regiones sur (Advord-Flandres, Neumeyer ni Bismarck); todas las estaciones de estas regiones contribuyeron para la reconstrucción del TS₁. En las gráficas de círculos, los colores representan la contribución de los grupos de fitoplancton a cada estructura de la comunidad reconstruida cuando esta excede el 10%, mientras que Otros Grupos (OG) representan la suma del porcentaje de contribución de los grupos menores al 10%, además dentro del círculo se representa a cada TS reconstruido.

Con base en los grupos del fitoplancton determinados con el CHEMTAX y siguiendo los criterios de Mendes *et al.* (2012), la estructura representada por el TS1 (Fig. 3.1a) incluyó a las diatomeas como el grupo más abundante (44%), seguido de dinof₂/diato₂ (28%) y flagelados verdes (11%). La comunidad representada por el TS2 agrupó solo a estaciones ubicadas en el norte (Danco y Brabant).

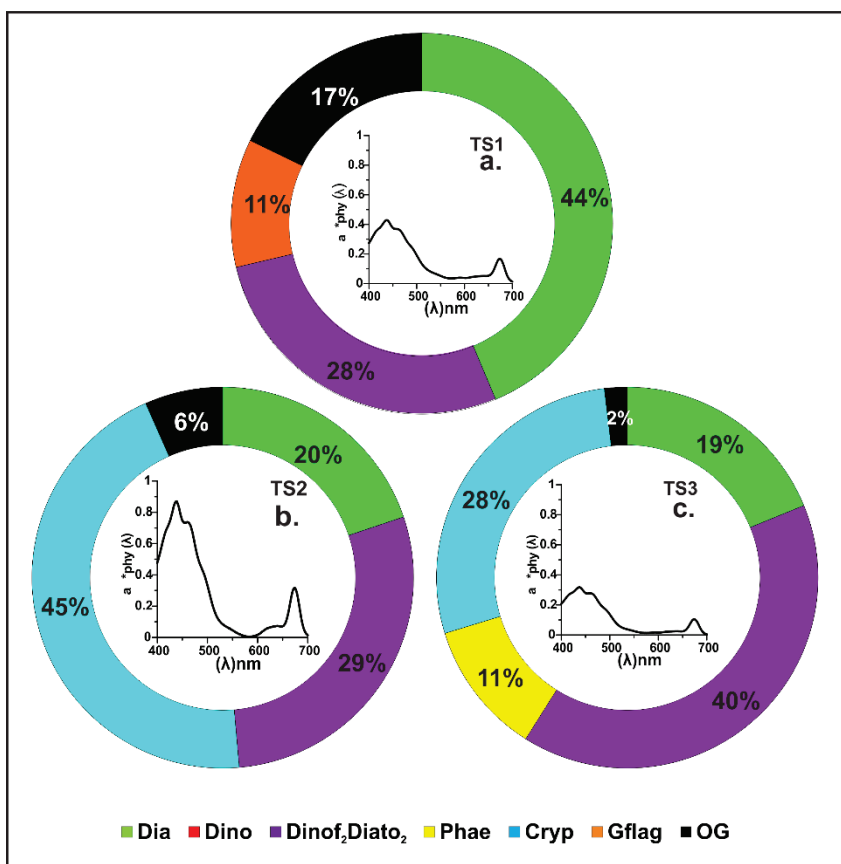


Figura 3.1. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS_{index} , durante el periodo cálido en la superficie (2017), con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) en todo el EG; b) y c) Danco-Brabant. En los círculos, los grupos de fitoplancton con contribuciones >10% se representan en colores y OG es la suma del porcentaje con contribuciones de grupos inferiores al 10%.

La estructura de la comunidad representada por TS2 (Fig. 3.1b) incluyó a las criptofitas como grupo dominante (45%), dinof2/diato2 (29%), diatomeas (20%) y contribuciones menores de otros grupos (7%). En este caso, el TS2 representó a la única estructura de la comunidad en superficie donde las criptofitas tuvieron la mayor contribución. En el caso del TS3 (Fig. 2c), también agrupó únicamente a estaciones de las regiones Danco y Brabant y la estructura de la comunidad estuvo representada por el grupo dinof2/diato2 (40%), las criptofitas (28%), diatomeas (19%), *Phaeocystis antarctica* (11%) y OG (2%).

En resumen, solo tres estructuras de la comunidad se reconstruyeron para esta condición con el TS_{index} . Las asociaciones de fitoplancton que mostraron la mayor contribución al TChl-*a* y que además influyeron en los cambios en la estructura de la comunidad fueron, las diatomeas, el grupo dinof2/diato2 y las criptofitas (Fig 3.1). TS2 mostró los valores más altos de $a^*_{phy(\lambda)}$ con un hombro entre 600 y 650 nm no observado en los otros dos TS. En TS2, el grupo que representó la fracción más alta (45%) fueron las criptofitas de los 18 TS reconstruidos para los cuatro escenarios.

3.3.2. Periodo cálido en MPChI-a (enero de 2017).

Para esta condición, se reconstruyeron cinco TS (Fig. 3.2), el TS4, TS5, TS6, TS7 y TS8. Tres componentes fueron significativos y el ACP indicó una asociación del 94% entre estaciones (Tabla 3.1b), mientras que el AD mostró que el 89% de las estaciones se clasificaron correctamente (grupos verdaderos). Las estaciones mal clasificadas (G01 y G21) se reagruparon de acuerdo con el AD. Como resultado, G01 se clasificó correctamente y G21 permaneció en el mismo grupo con el que se reconstruyó al TS5 utilizando el ACP, lo que resultó en una clasificación correcta del 94% de las estaciones (Tabla 3.2b).

La comunidad representada por TS4 (Fig. 3.2a) fue la única de las regiones del norte, y estuvo compuesta por criptofitas (37%), el grupo dinof₂/diato₂ (26%), diatomeas (20%), flagelados verdes (13%), OG contribuyeron solo con el 5%. Por otro lado, la comunidad representada por TS5 (Fig. 3.2b) se distribuyó por toda el área de estudio y estuvo compuesta por diatomeas (44%), el grupo dinof₂/diato₂ (25%), criptofitas (13%), flagelados verdes (11%), y OG (7%). En el caso de TS6 (Fig. 3.2c), la comunidad se distribuyó en las regiones del sur, comprendiendo diatomeas (51%) y mostró la segunda contribución más alta de todas las comunidades para las capas superficiales y el MPChI-a, flagelados verdes (27%), el grupo dinof₂/diato₂ (15%) y OG (7%). Por su parte, el TS7 agrupó únicamente a estaciones ubicadas en el norte del EG; en este caso, la estructura de la comunidad (Fig. 3.3d) estuvo representada por el grupo dinof₂/diato₂ (38%), diatomeas (27%), criptofitas (19%), *Phaeocystis antarctica* (12%) y OG (4%). La comunidad representada por el TS8 correspondió a las regiones del sur (Fig. 3e) y estuvo dominada principalmente por diatomeas (53%), seguida del grupo dinof₂/diato₂ (34%) y OG (13%). En el TS8, las diatomeas hicieron la mayor contribución a la estructura de la comunidad de las cuatro condiciones estudiadas.

Para esta condición, las cinco estructuras de la comunidad mostraron espectros $a_{ph(\lambda)}^*$ más aplanados con porcentajes de contribución de los grupos del fitoplancton al TChI-a en proporciones diferentes respecto a las estructuras reconstruidas para la capa superficial (Fig. 3.1). Los grupos del fitoplancton que mostraron la mayor contribución en esta condición fueron las diatomeas, el grupo dinof₂/diato₂ y las criptofitas (Fig. 3.2).

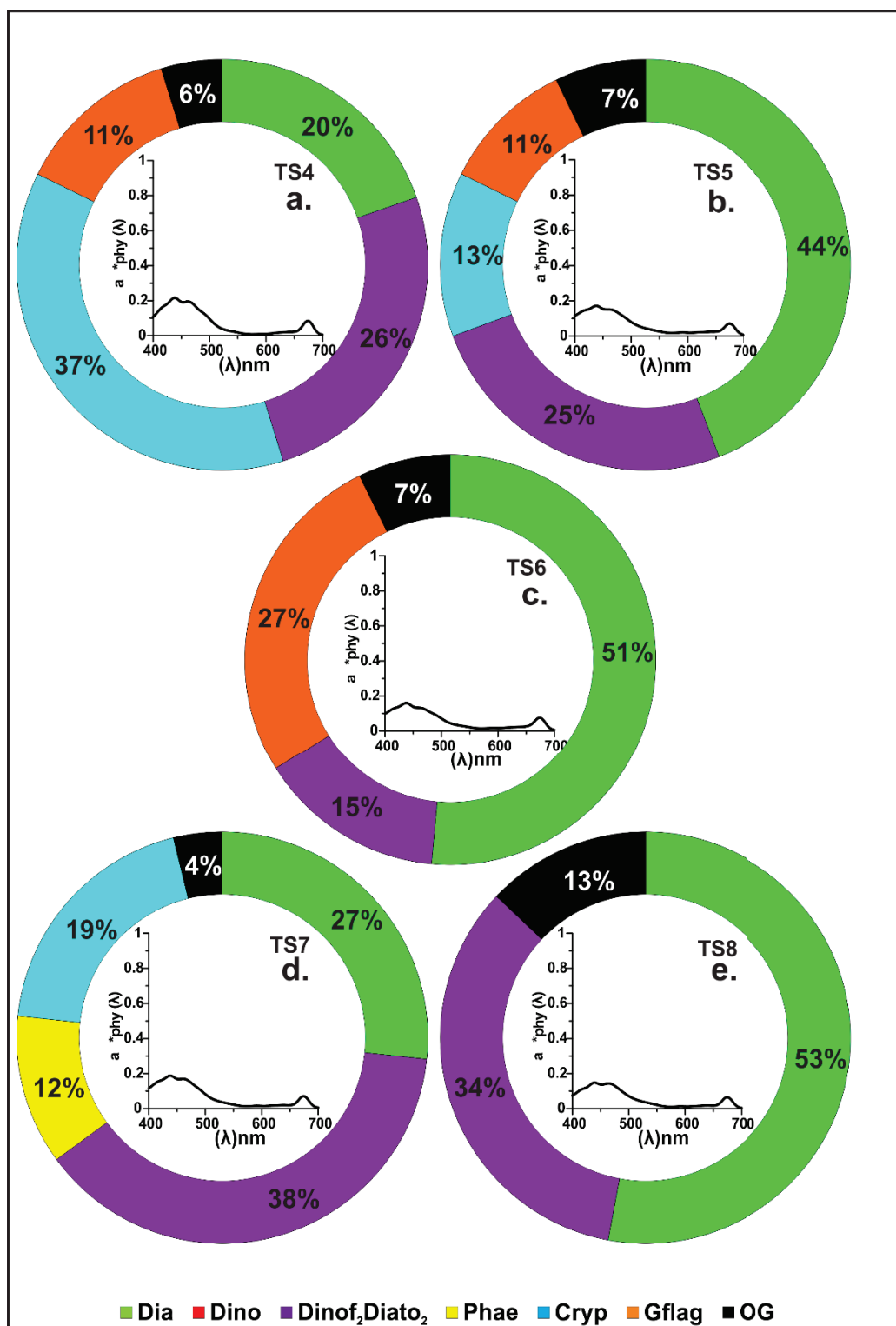


Figura 3.2. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS_{index} , durante el periodo cálido en el MPChI-a, con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) Brabant; b) Bismarck; c) Andvord-Neumeyer; d) Danco y e) Bismarck. En los círculos, los grupos de fitoplancton con contribuciones >10% se representan en colores y OG es la suma del porcentaje con contribuciones de grupos inferiores al 10%.

3.3.3. Periodo frío en la superficie (enero de 2018)

En total se reconstruyeron seis TS (Fig. 3.3), el TS9, TS10, TS11, TS12, TS13 y TS14, cinco de estos TS agruparon estaciones del norte (TS9, TS10, TS13, TS11 y TS14) y uno del sur (TS12). El ACP explicó el 92% de la asociación entre estaciones (Tabla 3.3a), donde tres componentes fueron significativos y las estaciones se agruparon en seis conjuntos de datos; el AD indicó que la mayoría de las estaciones estaban correctamente clasificadas (94%). La única estación mal clasificada fue la G03, que fue reasignada a TS9; al hacer esto, el análisis alcanzó el 100% de la clasificación (Tabla 3.4a).

Tabla 3.3. Resultados del Análisis de Componente Principal (ACP) realizado para determinar la asociación de estaciones en la superficie (a) y el máximo profundo de Chl-a (b) condición fría con espectros $a^*_{ph(\lambda)}$. En las primeras tres líneas se encuentra el eigenanálisis de los componentes significativos: El autovalor, la proporción de la varianza explicada por cada componente y finalmente la proporción acumulada. A continuación, se muestran los componentes seleccionados para cada condición. Los números en negrita indican el vector propio asociado con un componente dado y entre paréntesis el número del espectro tipo reconstruido al que contribuyó la estación.

a) Periodo Frío-Superficie (2018)				b) Periodo Frío- MPChl-a (2018)	
Eigenanálisis	5.29	4.80	1.87	6.32	4.10
Proporción	0.41	0.37	0.14	0.49	0.32
Acumulado	0.41	0.78	0.92	0.49	0.80
Estación	CP1	CP2	CP3	CP1	CP2
E22	0.607	0.70 (TS₁₁)	0.616	-0.54	-0.71 (TS₁₈)
E18	0.385	-0.86 (TS₁₂)	-0.494	-0.78 (TS₁₆)	-0.72
E17	0.444	-0.82 (TS₁₂)	-0.292	-0.77 (TS₁₆)	-0.63
E13	-0.594	-0.80 (TS₁₂)	-0.389	0.40	-0.78 (TS₁₈)
E10	0.98 (TS₉)	0.087	0.020	-0.88 (TS₁₆)	0.27
E09	-0.277	0.494	-0.51 (TS₁₄)	0.14	0.81
E08	-0.94 (TS₁₀)	0.257	0.092	0.94 (TS₁₅)	0.18
E05	-0.64 (TS₁₀)	-0.592	0.060	-0.79 (TS₁₆)	0.44
E06	-0.91 (TS₁₀)	0.356	0.126	-0.14	0.88 (TS₁₇)
E01	0.71 (TS₉)	0.561	0.647	0.94 (TS₁₅)	-0.09
E03	0.582	0.59 (TS₁₁)	0.045	-0.21	0.40 (TS₁₇)
E04	-0.320	0.59 (TS₁₁)	-0.360	-0.72 (TS₁₆)	0.04
E28	-0.347	0.640	0.74 (TS₁₃)	0.94 (TS₁₅)	0.41

Tabla 3.4. Resultados del Análisis Discriminante (AD) con el que se validó la agrupación de las estaciones para reconstruir a los espectros tipo en las cuatro condiciones: a) En la superficie para un periodo frío (2018); b) En el MPChl-a para un periodo frío (2018).

a)						
Estación En grupo (TS)	Espectro Tipo Verdadero					
	TS9	TS10	TS11	TS12	TS13	TS14
TS9	2	0	0	0	0	0
TS10	0	3	0	0	0	0
TS11	0	0	2	0	0	0
TS12	0	0	0	3	0	0
TS13	0	0	0	0	2	0
TS14	0	0	0	0	0	2
Total N	2	3	3	3	2	2
N Correctos	2	3	2	3	2	2
Proporción	1	1	0.667	1	1	1
N= 15	N correctos=14			Proporción Correcta= 0.93		

b)				
	TS15	TS16	TS17	TS18
TS15	3	0	0	0
TS16	0	5	0	0
TS17	0	0	3	0
TS18	0	0	0	2
Total N	3	5	3	2
N Correctos	3	5	3	2
Proporción	1	1	1	1
N= 13	N correctos=13			Proporción Correcta=1.0

A diferencia de la condición cálida en la superficie, dominada por diatomeas y el grupo *dinof₂/diato₂* (Fig. 3.1), la condición fría estuvo dominada por el grupo *dinof₂/diato₂*, *Phaeocystis antarctica* y flagelados verdes (Fig. 3.3). En algunos casos, como en TS14, el grupo *dinof₂/diato₂* contribuyó hasta con un 63% y *Phaeocystis antarctica* con un 27%; siendo una de las comunidades con menor absorción específica (Fig. 3.3f).

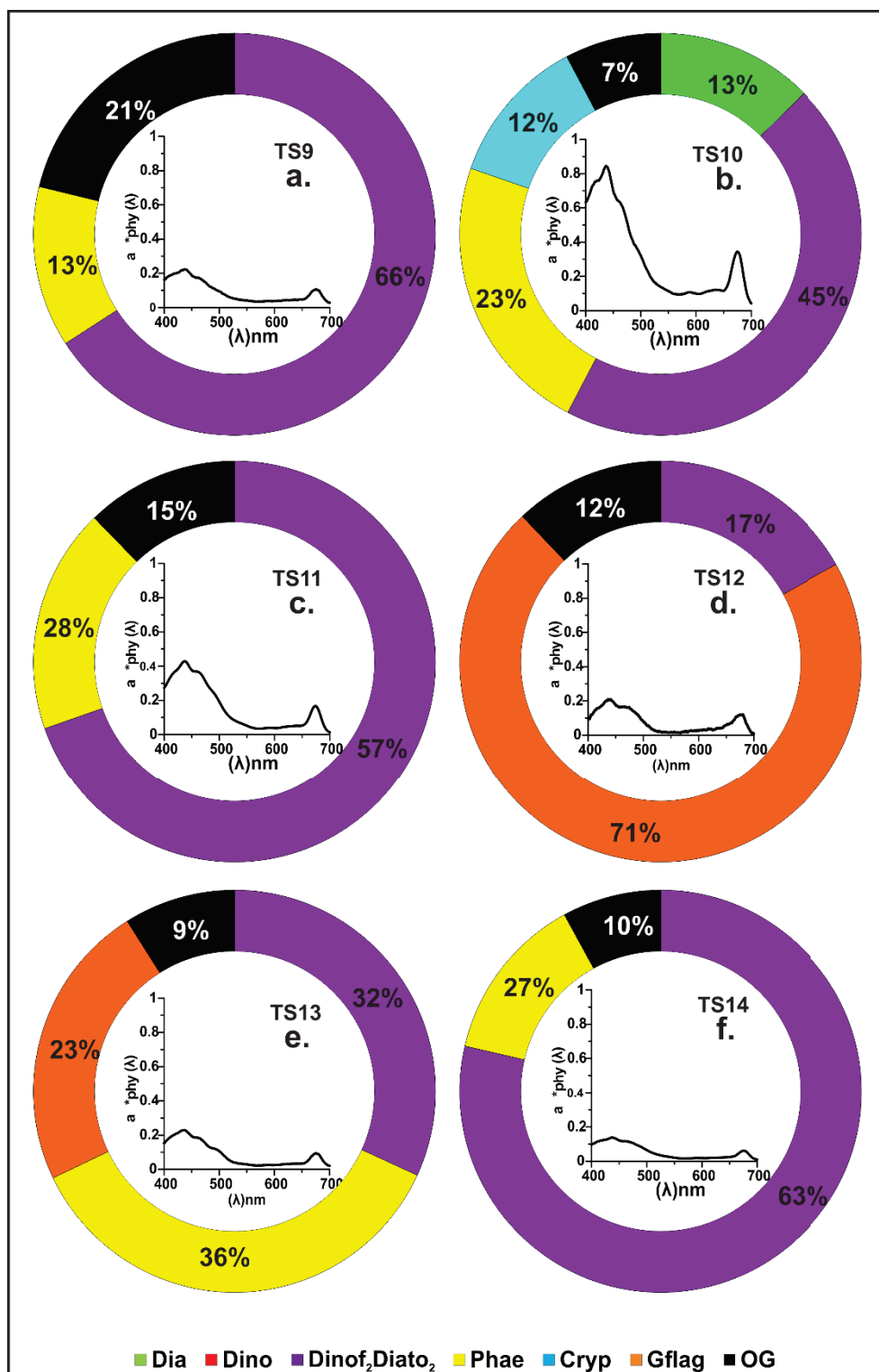


Figura 3.3. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS_{index} , durante el periodo frío en superficie (2018), con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) Brabant-Crocker; b) Danco-Brabant; c) Bismark-Brabant; d) Neumeyer-Danco; e) y f) Danco; observar que para Danco (e y f) son dos estructuras de la comunidad con grupos y porcentajes de contribución diferentes.

En el TS9 (Fig. 3.3a), la comunidad de fitoplancton estuvo representada principalmente por el grupo dinof₂/diato₂ (66%) y otros grupos (OG, 21%), con una contribución menor de *Phaeocystis antarctica* (13%). La comunidad representada por el TS10 (Fig. 3.3b) representó al grupo dinof₂/diato₂ con un 45%; *Phaeocystis antarctica* con el 23%; diatomeas, con el 13%; criptofitas con el 12%; y OG con el 8%. Por otro lado, la comunidad representada por TS11 incluyó al grupo dinof₂/diato₂ (70%), *Phaeocystis antarctica* (18%) y OG (12%); el grupo dinof₂/diato₂ y *Phaeocystis antarctica* contribuyeron en mayor medida a la absorción de TS (Fig. 3.3c).

En el caso de la comunidad representada por TS12, los flagelados verdes alcanzaron el 71% (Fig. 3.3d) con un menor aporte del grupo dinof₂/diato₂ (17%) y OG (12%). Esta fue la única comunidad con mayor aporte de flagelados verdes en los cuatro escenarios; por lo tanto, este grupo es el principal contribuyente a la absorción en este TS y se distribuyó solo en las regiones Advor-Flandres y Neumeyer.

La comunidad representada por TS13 (Fig. 3.3e) incluyó a *Phaeocystis antarctica* (36%), el grupo dinof₂/diato₂ (32%), flagelados verdes (23%) y OG (9%). El último TS reconstruido para este escenario fue TS14 (Fig. 3.3f), cuya comunidad estuvo representada por el grupo dinof₂/diato₂ (79%), esta fue la única comunidad para los cuatro escenarios que mostró la mayor contribución de este grupo y *Phaeocystis antarctica* (13%). La alta contribución del grupo dinof₂/diato₂ puede explicar la menor absorción mostrada por TS14 en relación con los otros TS reconstruidos. Pese a que los TS13 y TS14 se distribuyeron en la misma region Danco, representaron estructuras fitoplanctónicas diferentes como lo dejan ver los porcentajes de contribución y tipos de grupos que conformaron cada TS.

En esta condición, de los seis TS reconstruidos, el TS10 alcanzó la mayor absorción en términos de magnitud (Fig. 3.3b), con cuatro grupos de fitoplancton que contribuyeron a la estructura de la comunidad (grupo dinof₂/diato₂, *Phaeocystis antarctica*, diatomeas y criptofitas). En los otros TS, las diatomeas no contribuyeron o lo hicieron con menos del 10%. En general, para esta condición se observó que los cambios en la forma y tamaño de los TS pueden atribuirse principalmente a tres ensamblajes de fitoplancton (grupo dinof₂/diato₂, *Phaeocystis antarctica* y flagelados verdes) (Fig. 3.3).

3.3.4. Periodo frío en el MPChI-a (enero de 2018)

En el MPChI-a durante el periodo frío, se reconstruyeron cuatro TS (Fig. 3.4), el TS15, TS16, TS17 y TS18. Para esta condición, el ACP mostró dos componentes significativos que explicaron el 80% de la asociación de los datos (Tabla 3.3b) en cuatro grupos. Además, la AD (Tabla 3.4b) reveló que todas las estaciones estaban correctamente clasificadas (100%).

De los cuatro TS reconstruidos, uno agrupó estaciones de todo el EG (TS16), dos TS agruparon estaciones del norte (TS15: Danco y Crocker y TS17: Brabant) y uno TS, estaciones de una región del sur (TS18: Bismarck). De manera similar a la condición cálida, estos TS indican la distribución de las comunidades propias del norte (Fig. 3.4a-3.4c), una en el sur (Fig. 3.4d) y una comunidad compartida entre las regiones Neumayer y Brabant (TS16) (Fig. 3.4b).

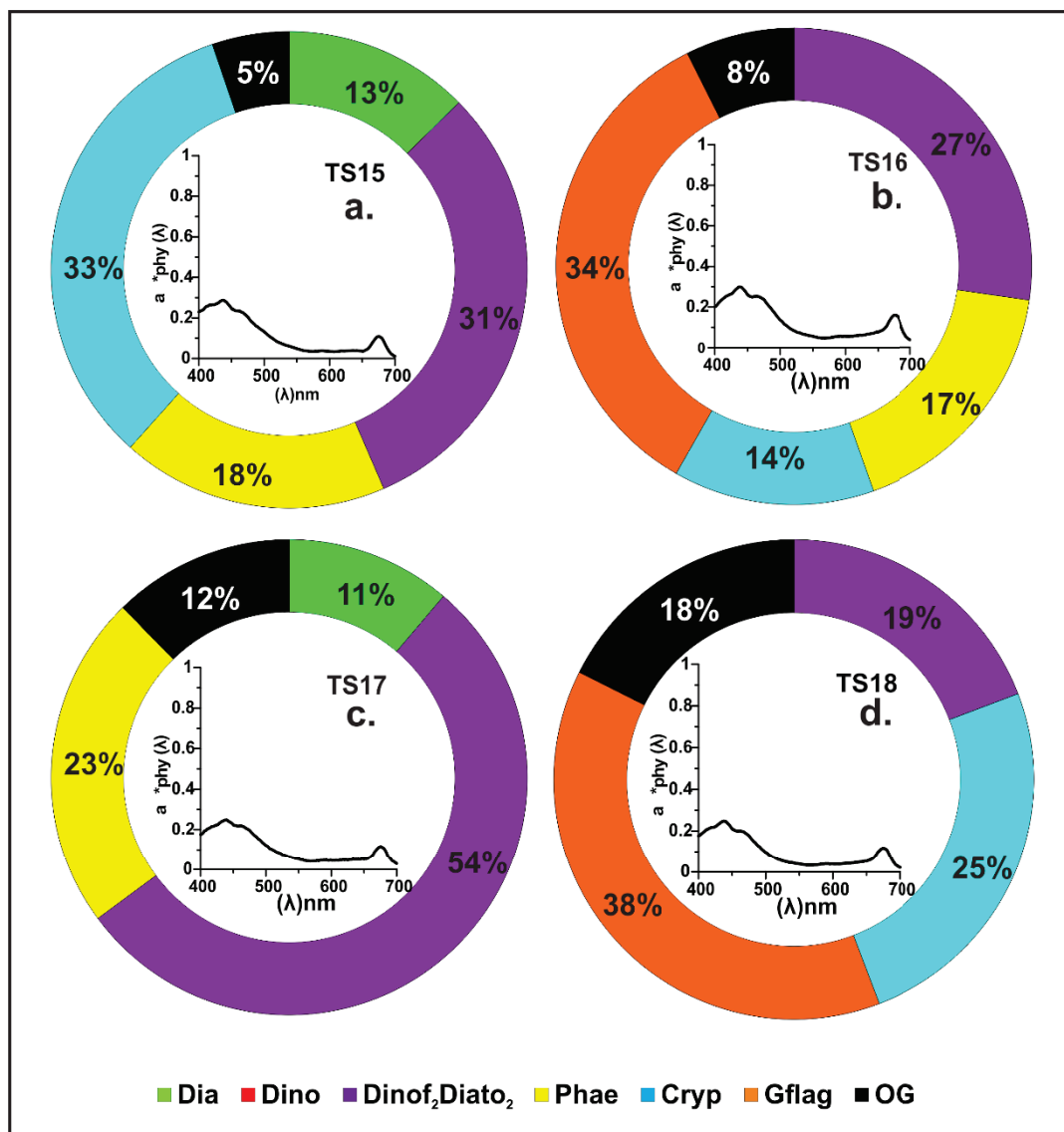


Figura 3.4. Espectros tipo (TS) reconstruidos con el TS_{index}, durante el periodo frío en el MPChI-a (2018), con la contribución respectiva de grupos fitoplanctónicos que son representativos de las estructuras de la comunidad y se distribuyeron de la siguiente manera: (a) Danco; b) Neumeyer-Brabant; c) Brabant; d) Danco- Bismarck.

La diferencia entre las comunidades representadas en TS15 y TS17, que son exclusivas del norte, se justifica en los porcentajes de contribución y tipos de grupos de cada ensamblaje y eso influyó en la absorción de cada espectro. La comunidad representada por TS15 (Fig. 3.4a) estaba compuesta por criptofitas (33%), el grupo dinof₂/diato₂ (31%), *Phaeocystis antarctica* (18%), diatomeas (13%) y OG (5%). Por su parte, TS17 representó principalmente a tres grupos (Fig. 3.4c): al grupo dinof₂/diato₂ (54%), *Phaeocystis antarctica* (23%) y diatomeas (11%), con un aporte menor de OG (12%).

Los principales ensamblajes de fitoplancton en la comunidad representada por TS16 fueron flagelados verdes (34%), seguidos de grupo dinof2/diato2 (27%), *Phaeocystis antarctica* (17%) con una contribución cercana a las criptofitas (14%) y OG (7%). Finalmente, la estructura de la comunidad representada por el TS18 (Fig. 3.4d) estuvo compuesta por flagelados verdes (38%), criptofitas (25%) y grupo dinof2/diato2 (19%), con menor aporte de OG (18%).

Se reconstruyeron cuatro estructuras de fitoplancton para esta condición, de acuerdo con cuatro TS (Fig. 3.4). Los ensamblajes de fitoplancton que más contribuyeron a los cambios en la forma y tamaño de los TS fueron el grupo dinof2/diato2, los flagelados verdes, las criptofitas y *Phaeocystis antarctica*, manteniendo en parte la contribución de los grupos observados en la capa superficial (Fig. 3.4), aunque las contribuciones fueron en promedio más bajas para *dinof2/diato2* y *Phaeocystis antarctica* y más altas para los flagelados verdes y las criptofitas (Fig. 3.4b y 3.4d).

3.4. Discusión

Con el índice se reconstruyeron TS a partir del $a_{ph(\lambda)}^*$ del fitoplancton que representaron a la estructura de la comunidad. Los TS reconstruidos mostraron una forma y magnitud características para cada condición analizada con diferentes porcentajes de contribución de los grupos de fitoplancton (Figuras 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4).

En general, el grupo dinof2/diato2 fue el principal contribuyente en las cuatro condiciones analizadas, con los porcentajes más altos (en promedio 51% y 33%) observados para los escenarios tres y cuatro (periodo frío, Fig. 3.3 y Fig. 3.4). Según Mendes *et al.* (2012), este es un grupo dominante en la comunidad de fitoplancton en la WAP y fue denominado así porque lo conforman el dinoflagelado *Gymnodinium spp.* (<20 μm) y la diatomea *Pseudo-nitzschia spp.* (<10 μm) (Mendes *et al.*, 2012; 2013; Ferreira *et al.*, 2018). Por otro lado, durante las condiciones cálidas en superficie y el MPChl-a, los grupos que contribuyeron en mayor proporción a la estructura de la comunidad fueron las diatomeas y las criptofitas (ver Fig. 3.1 y Fig. 3.2). Lo anterior sugiere, que estos grupos prefieren ambientes más cálidos en el EG. De hecho, Varela *et al.* (2002) así lo determinaron para las diatomeas, mientras que Gonçalves-Araujo *et al.* (2015) lo describieron para las criptofitas.

Por otro lado, Mendes *et al.* (2018) indicaron que las criptofitas, diatomeas y *Phaeocystis antarctica* fueron los grupos del fitoplancton dominantes en el Estrecho de 2013 a 2015. Cabe señalar que los períodos estudiados por estos autores fueron años fríos según el análisis de este trabajo. Por el contrario, para las condiciones frías, tanto las diatomeas como las criptofitas disminuyeron, mientras que *Phaeocystis antarctica* y los flagelados verdes aumentaron; estudios previos en la WAP (Shofield *et al.*, 2017; Henley *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2019) confirman este resultado.

Ahora bien, para identificar los cambios en la estructura de la comunidad con el TS_{index}, se presentan casos comparativos de TS reconstruidos que consideran cambios por periodo analizado (cálido o frío), así como la distribución en la columna de agua (superficie o en el MPChl-a) o entre regiones (norte

o sur), soportados además en los porcentajes de contribución de grupos fitoplanctónicos. El primer par de TS a considerar son el TS3 (Fig. 3.2c) y TS10 (Fig. 3.4b).

En el caso del TS3 representó a la condición cálida, mientras que el TS10 a la fría; los dos TS agruparon estaciones de la superficie ubicadas en las regiones del norte y estuvieron conformados por los mismos grupos de fitoplancton (diatomeas, dinof₂/diat₂, *Phaeocystis antarctica* y criptofitas). Sin embargo, el cambio en estos TS se observó tanto en la magnitud, que fue menor en el TS3 (0.32 m² (mgChl-a⁻¹)) respecto al TS10 (0.84 m² (mgChl-a⁻¹)), como en la forma, específicamente en la región entre 440 y 470 nm, se observó un hombro menos pronunciado en el TS3 que en el TS10. Asociado a lo anterior, la proporción de los grupos fitoplanctónicos presentes en cada TS también cambió, con proporciones más altas de *Phaeocystis antarctica*, por ejemplo, en el TS10; aspecto que explica la modificación en la forma de los espectros.

Estos cambios en la forma del espectro de $a_{ph(\lambda)}^*$, han sido reportados en estudios previos (Toreccilla *et al.*, 2011; Fujiwara *et al.*, 2011; Uitz *et al.*, 2015; Xi *et al.*, 2015; 2017); sin embargo, con base en la discusión de Roesler (2017), se cree que los cambios en $a_{ph(\lambda)}^*$ pueden considerar la proporción de la composición de la estructura de la comunidad de fitoplancton y no solo los grupos dominantes, debido a que la variabilidad de $a_{ph(\lambda)}^*$ es sensible al tipo y concentración de pigmentos de fitoplancton. Leeuwe y Stefels (2007), informaron que *Phaeocystis antarctica* predomina porque puede aclimatarse fácilmente a las condiciones de luz en el Océano Austral, de manera que los valores más altos de $a_{ph(\lambda)}^*$ están relacionados con un aumento de los pigmentos carotenoides junto con una reducción en el efecto paquete. Por lo tanto, el enfoque del TS_{index}, replica de cerca las características de $a_{ph(\lambda)}^*$ en las poblaciones naturales.

Otro ejemplo a considerar son los espectros TS9 y TS12, los cuales representan estaciones con estructuras de la comunidad características de las regiones Brabant y Crocker ubicadas en el norte del Estrecho (TS9) y de la región Neumeyer ubicada en el sur (TS12), en el MPChl-a y propios de la condición fría. En este caso, el TS9 estuvo dominado por el grupo dinof₂/diato₂, mientras que el TS12 por los flagelados verdes. Otros estudios (Hoepffner y Sathyendranath, 1993, 1991; Zheng y Digiamo, 2018; Zhang *et al.*, 2018), indican que los cambios en $a_{ph(\lambda)}^*$ resultan de la contribución de grupos taxonómicos, cuyos espectros $a_{ph(\lambda)}^*$ varían según la diversidad de especies y otros factores como el tamaño celular, la composición y la concentración del pigmento (Ciotti *et al.*, 2002; Fujiwara *et al.*, 2011, 2014).

Para observar las diferencias en la forma y magnitud de los TS entre la superficie y el MPChl-a, los TS1 y TS6 son el ejemplo a observar. El cambio en la magnitud de $a_{ph(\lambda)}^*$ de mayor (0.43 m² (mgChl-a⁻¹)) en TS1 que en el TS6 (0.16 m² (mgChl-a⁻¹)); y en la forma, en el TS6 fue más aplanada en la totalidad del espectro, mientras que en el TS1 un hombro pronunciado en la región entre 460 a 470 nm dejó ver el cambio en la estructura de la comunidad. De manera que el cambio en la magnitud y la forma, se explica porque las poblaciones de fitoplancton adaptadas a diferentes intensidades de luz responden a procesos

de fotoaclimatación (Babin *et al.*, 2003) cambiando su proporción de pigmentos; a su vez, esto conduce a diferencias en la respuesta en términos de espectros de absorción (Bricaud *et al.*, 1995; 2004).

En el EG, la condición cálida (enero de 2017) se caracterizó por días con menos cobertura de nubes y eventos de nevadas (es decir, cielos más despejados), en contraste con la condición fría (enero de 2018); en consecuencia, las comunidades de fitoplancton tuvieron que adaptarse a diferentes regímenes de luz (Aiken *et al.*, 2008), por lo tanto, cambios en la forma y tamaño de los TS reconstruidos para cada condición fueron observados.

En el caso del MPChl-a, los dos periodos analizados no mostraron diferencias en el número, magnitud y forma de los TS reconstruidos (Figs. 3.2 y 3.4). El MPChl-a se describe como una adaptación fisiológica del fitoplancton a bajas irradiancias y disponibilidad de nutrientes, que estimulan el aumento de los niveles de Chl-a (Cullen 1982, Estrada y Berdalet, 1997).

En otro caso, los TS4 y TS15 evidenciaron los cambios entre las condiciones cálidas y frías. La comunidad distribuida en Brabant durante la condición cálida representada por TS4 (Fig.3.2a) estuvo constituida por criptofitas (37%), dinof2/diat2 (26%), diatomeas (20%), flagelados verdes (13%) y OG (5%), con picos $a_{ph(440)}^*$ de 0.22 m² (mgChl-a⁻¹). Por el contrario, la comunidad representada por TS15, también de Brabant pero durante el periodo frío (Fig. 3.4c), incluyó a las criptofitas (33%), dinof2/diat2, (31%), *Phaeocystis antarctica* (18%), diatomeas (10%) y OG (5%), con mayor $a_{ph(440)}^*$ (0.29 m² (mgChl-a⁻¹), cambios que están asociados a la contribución de un grupo adicional durante el periodo frío (*Phaeocystis antártica*), la desaparición de los flagelados verdes y diferentes proporciones de criptofitas, dinof2/diat2 y diatomeas.

Por lo tanto, el aplanamiento en los espectros del MPChl-a también se explica por las diferencias en la concentración de pigmentos de los diversos grupos del fitoplancton en cada comunidad y el efecto paquete (Sosik y Mitchell, 1995). Este efecto es típico de comunidades dominadas por células grandes (Bricaud *et al.*, 1999) y hace que se produzca un aplanamiento del espectro, porque las células aumentan su concentración de Chl-a para capturar más luz (ver Duysens, 1956). Aunque el enfoque del TS_{index} no relaciona el TS con la estructura de tamaño de la comunidad, se esperaría que el TS que contiene diatomeas en proporciones mayores registre menores $a_{ph(\lambda)}^*$ y así lo dejan ver el TS6 y TS8. Autores como Vidussi *et al.* (2001) y Uitz *et al.* (2006) indican que esta respuesta se debe al hecho de que las diatomeas representan la mayor fracción del fitoplancton global, produciendo un efecto paquete mayor.

Un aspecto adicional que puede explicar las diferencias en el número de comunidades reconstruidas en la superficie, es la dinámica del fitoplancton en relación con el hielo (Zhang *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2018; Shofield *et al.*, 2019). La mayor entrada de agua de deshielo de los glaciares se traduce en una estratificación más fuerte de la columna de agua. En un año frío ocurre lo contrario, con un menor aporte de agua procedente del deshielo, la estratificación de la columna de agua se debilita (Goffart *et al.*, 2000). Por lo tanto, la estabilidad de la columna de agua y el contenido de Chl-a son más bajos en condiciones frías que en condiciones cálidas (Saba *et al.*, 2014). Estas condiciones generan un ambiente menos homogéneo con comunidades más diversas.

La condición cálida se caracterizó por una estructura de la comunidad menos diversa, representada en solo 3 TS en la superficie; de estos, el TS1 agrupó estaciones de todo el EG, 11 de las 19 estaciones analizadas de norte a sur se agruparon para reconstruir este TS (Tabla 2.1), condición que refleja la homogeneidad en la superficie. Por el contrario, en la condición fría, la comunidad fue más diversa, con seis TS reconstruidos y fueron exclusivos en algunos casos de las regiones del norte y en otros de las del sur y a diferencia de 2017 ninguna comunidad se distribuyó en todo el EG.

3.5. Conclusiones

El TS_{index} mostró que el $\alpha_{ph(\lambda)}^*$ es una herramienta valiosa para evaluar los cambios en la estructura de la comunidad de fitoplancton. El Estrecho mostró diferencias en la variabilidad física entre regiones del norte y sur (sección discutida en el capítulo II), además de una variabilidad climática reflejada con pulsos de fitoplancton cada 4 a 6 años (Saba *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2018). Esta variabilidad implica diferentes respuestas del fitoplancton; en este estudio estas fueron evidentes en el predominio de diatomeas en una condición relativamente poco común (año cálido), que fueron reemplazadas por *Phaeocystis antarctica* en la condición fría. Estos cambios fueron más evidentes en las aguas superficiales, donde solo se recuperaron 3 TS durante la condición cálida, mientras que en condiciones más regulares (año frío) se reconstruyeron seis TS. Por otro lado, otros estudios (Atkinson *et al.*, 2004; Suprenand y Ainsworth, 2017) han registrado, una mayor abundancia de salpas en comparación con el krill durante años cálidos, aspectos también observados durante los muestreos de 2017 y 2018 pero que no son objeto de análisis en este trabajo. Por lo tanto, el cambio de una comunidad de fitoplancton más diversa en años fríos a una menos diversa en condiciones atípicas (años cálidos) sugiere un probable cambio también en los niveles tróficos superiores. En consecuencia, se necesitan más investigaciones para evaluar si la variabilidad dentro de estos ciclos de cuatro a cinco años también produce cambios en la estructura de otros niveles tróficos (por ejemplo, zooplancton).

La fortaleza de este enfoque radica en que incluyó datos para condiciones ambientales extremas, años más cálidos y más fríos en una serie que abarca más de 15 años (Santamaría-del-Ángel *et al.*, en preparación). Además, se utilizaron datos que representaron condiciones de la superficie y del máximo profundo de Chl-a para demostrar procesos de fotoaclimatación de las comunidades debido a la disponibilidad de luz en la columna de agua, aspectos no considerados por Ciotti *et al.* (2002) y Ferreira *et al.* (2018). Por eso, el enfoque descrito aquí es una herramienta valiosa para evaluar los cambios en la estructura de la comunidad, que se reflejan en la forma y el tamaño de espectros $\alpha_{ph(\lambda)}^*$, derivados de grupos del fitoplancton a partir de pigmentos, así como de la variabilidad climática, el área geográfica de distribución en el EG y la distribución de las comunidades en la columna de agua. Además, es un método complementario, de bajo costo en la investigación del fitoplancton, que implica menos tiempo de procesamiento en comparación con los recuentos de fitoplancton en microscopio y la cromatografía líquida

de alta resolución, que puede además ser validado para otros ecosistemas marinos costeros, como las áreas tropicales o subtropicales.

4. CONSIDERACIONES FINALES

En el EG, no se había planteado la división en regiones, la razón puede estar asociada a su tamaño o porque lo consideran como una extensión del Estrecho de Bransfield (García *et al.*, 2002). Pese a su pequeño tamaño (180 km de largo y ancho variable entre 8 y 60 km (Isla *et al.*, 2002), la variabilidad de las condiciones hidrográficas, químicas, ópticas y biológicas confirmaron la división del EG en seis regiones. Esta división se consiguió al combinar variables representativas de procesos biológicos y físicos mediante una SEOF₁, las cuales fueron generadas como compuestas multisensor de SST_{Sat}, $\alpha_{ph(443)Sat}^*$ y FOD_{Sat}, con resolución espacial de 1 km. De esta forma, se contó con un mayor número de píxeles con información del EG, el cual se caracteriza por tener alta cobertura de nubes. Además, al trabajar con imágenes de 1 km se evitó que las regiones se enmascararan. En consecuencia, la ventaja de aplicar esta aproximación dio como resultado la división de un área pequeña, muy compleja (Zou *et al.*, 2002; Costa *et al.*, 2003), con una dinámica interna propia y que confirma además los planteamientos de Kim *et al.* (2018) para la WAP.

Al ser este el primer trabajo en presentar la división del EG en regiones, el resultado se validó con datos de campo, los cuales incluyeron variables hidrográficas (temperatura y salinidad), macronutrientes (NO₃⁻+NO₂⁻, PO₄³⁻, H₄SiO₄⁻) y grupos fitoplanctónicos (diatomeas, dinoflagelados, dinof₂/diato₂, criptofitas, *Phaeocystis antarctica*, y flagelados verdes). En la mayoría de los casos las regiones mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los periodos estudiados y las regiones delimitadas (Fig. 4.1). Sin embargo, entre las regiones Danco y Brabant no se registraron diferencias en la salinidad y en los grupos del fitoplancton durante el 2018. Por lo tanto, la ventaja de haber incorporado diferentes variables en el análisis es que facilitó explicar por qué dos regiones cercanas se dividen.

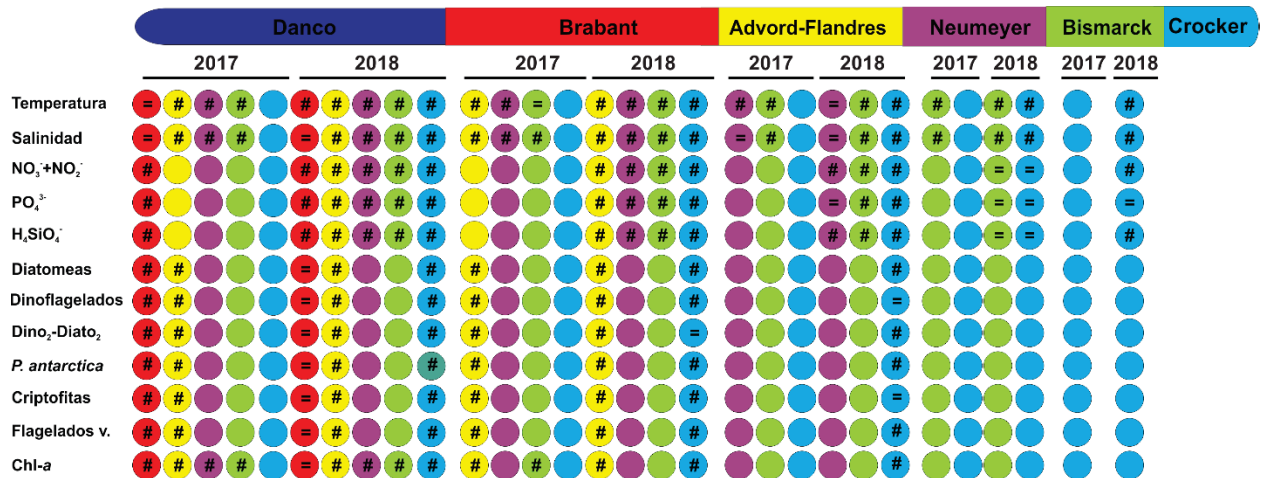


Figura 4.1. Resumen gráfico del análisis de Wilcoxon, en el que se consolida por variables y periodos analizados las diferencias entre las regiones dinámicas delimitadas en el EG. Los símbolos # indican diferencias y los círculos por color representan a las regiones. Los círculos sin símbolo representan parámetros o regiones que no pudieron ser comparados por bajo número de muestras, o porque en el caso de la región Crocker en 2017 (representada en azul claro) estaba fusionada con Brabant.

Por otro lado, el ACP entre las variables hidrográficas, químicas y biológicas mostró asociaciones diferentes para cada región, esto también confirma la división del EG en regiones dinámicas, así como su variabilidad entre periodos. Por ejemplo, Danco registró en 2017 y 2018, cambios de las asociaciones de las criptofitas con la temperatura. Este cambio está relacionado con una mayor diferencia de temperatura en la capa de mezcla en 2017 (Fig. 2.1). El incremento de la criptofitas ha sido objeto de varias investigaciones como respuesta al aumento de la temperatura en la WAP (Schofield *et al.*, 2017; Mendes *et al.*, 2018; Ferreira *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2020).

En el caso de Brabant, no se observaron asociaciones de los grupos del fitoplancton con las variables hidrográficas y químicas durante los dos veranos analizados. Esto dejó claro que no hay relación alguna entre estas, lo cual constituye un aspecto diferenciador de Brabant con respecto a Danco. Por otro lado, las relaciones en Crocker tanto de las criptofitas como de la Chl-*a*, no registraron asociaciones con las demás variables. Esto obedece a la mayor influencia de la dinámica del mar de Bellingshausen y del Estrecho de Bransfield sobre Crocker que define la variabilidad de las condiciones físicas y químicas sobre los grupos fitoplanctónicos presentes. Además, Crocker es considerada como una región que actúa como sumidero de partículas (Isla *et al.*, 2002), esto explica por qué la Chl-*a* no presentó relación alguna con las otras variables, así como su menor productividad en relación con las demás regiones.

Las regiones delimitadas al sur fueron separadas de las del norte por un frente térmico que se ubicó hacia el centro del EG, sobre el Canal Schollaert, el cual se identificó con la isoterma de 0.5°C (Fig. 2.1 y 2.3). Sin embargo, esta estructura hidrográfica fue descrita e identificada por García *et al.* (2002) con la isoterma de 0.7°C. En consecuencia, las regiones del sur registraron por arriba de la capa de mezcla temperaturas más bajas, mayores concentraciones de Chl-*a*, menores concentraciones de macronutrientes y mayor influencia de la mUCDW. Estos factores, además de la configuración de los fiordos, bahías y la batimetría, explicaron la delimitación de tres regiones en el sur del EG, con dinámicas locales distintas a las del norte.

En Advord-Flandres y Neumeyer, los flagelados verdes contribuyeron con la concentración de Chl-*a* y no las criptofitas (Fig. 2.10 y 2.11), mientras que en Bismarck fueron las diatomeas, aspecto que hace la diferencia desde el punto de vista biológico con las regiones del norte y que refleja la influencia de las condiciones ambientales sobre la composición de grupos de fitoplancton al interior de las regiones.

Otro aporte de esta investigación, fueron las tasas de asimilación de N: P y Si: N. La importancia de estas tasas es que mostraron una dinámica distinta al océano abierto (Freeman *et al.*, 2018), con valores de asimilación N: P altos (20.5) en Danco. Esta última define a Danco como una región dominada por comunidades diferentes a las diatomeas y en condiciones de menor productividad (Henley *et al.*, 2017). A diferencia de Danco, en Bismarck se registró el valor más bajo N: P (12.4) de todas las regiones analizadas y fue la segunda más alta de Si: N (1.93). La razón Si: N, confirma la mayor disponibilidad de H_4SiO_4^- en Bismarck respecto a las demás regiones e incluso a otras áreas de la WAP como Bransfield, bahía Margarita y el mar de Bellingshausen (Freeman *et al.*, 2018, 2019; Henley *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2020). Esta tasa Si: N, por arriba del valor de referencia (1:1) está asociada a la menor disponibilidad de diatomeas

durante 2018 y configuran a esta región como exportadora de ópalo biogénico a aguas profundas, según Poulton *et al.* (2007).

Por otra parte, el TS_{index} , también mostró diferencias entre las regiones al reconstruir estructuras únicas de la comunidad fitoplanctónica. Por ejemplo, en Bismarck el TS8 representó a una comunidad dominada por diatomeas y además fue la región donde se registró el máximo de $H_4SiO_4^-$, confirmando la preferencia de este grupo por dominar en aguas ricas en ácido silícico (Henley *et al.*, 2020). Además, el TS_{index} , mostró la mayor dinámica de las regiones del norte al reconstruir más estructuras compartidas, representadas en cuatro en Danco y seis en Brabant. De manera que el TS_{index} , se confirma como una herramienta sensible a los cambios del medio que permite estudiar cambios en la estructura de la comunidad del fitoplancton, con la posibilidad de ser implementada en otro tipo de ambientes como áreas tropicales y subtropicales.

Referencias

- Aiken, J., Hardman-Mountford, N.J., Barlow, R., Fishwick, J., Hirata, T., Smyth, T. (2008). Functional links between bioenergetics and bio-optical traits of phytoplankton taxonomic groups: an overarching hypothesis with applications for ocean colour remote sensing. *Journal of plankton research*, 30(2), 165-181. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbm098>
- Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., Rothery, P. (2004). Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature*, 432(7013), 100-103. <https://doi.org/10.1038/nature02996>
- Araujo, M.L.V., Mendes, C.R.B., Tavano, V.M., Garcia, C.A.E., Baringer, M.O.N. (2017). Contrasting patterns of phytoplankton pigments and chemotaxonomic groups along 30 S in the subtropical South Atlantic Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 120, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2016.12.004>
- Arrigo, K.R., van Dijken, G.L., Alderkamp, A.C., Erickson, Z.K., Lewis, K.M., Lowry, K. Joy-Warren, H., Middag, R., Nash-Arrigo J., Selz, V. Van de Poll, W. (2017). Early spring phytoplankton dynamics in the Western Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(12), 9350-9369. <https://doi.org/10.1002/2017JC013281>
- Babin, M., Theriault, J.C., Legendre L., Coridal A. (1993). Variations in the specific absorption coefficient for natural phytoplankton assemblages: Impact on estimates of primary production. *Limnol. Oceanogr.* 38(1), 154-177. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.1.0154>
- Babin, M., Stramski, D., Ferrari, G. M., Claustre, H., Bricaud, A., Obolensky, G., Hoepffner, N. (2003). Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe. *J. Geophys. Res.*, 108(C7). <https://doi.org/10.1029/2001JC000882>
- Beardsley, R.C., Limeburner, R., Owens, W.B. (2004). Drifter measurements of Surface currents near Marguerite Bay on the western Antarctic Peninsula shelf during austral summer and fall, 2001 and 2002. *Deep Sea Res. Part II: Topical Studies in Oceanography* 51 (17-19), 1947-1964. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.07.031>
- Beusen, A., Bouwman, A., Van Beek, L.P., Mogollon, J., Middelburg, J.J. (2016). Global riverine N and P transport to ocean increased during the 20th century despite increased retention along the aquatic continuum. *Biogeosciences*, 13(8), 2441-2451. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2441-2016>
- Bricaud, A., Allali K., Morel, A., Marie, D., Veldhuis M.J.W, Partensky F., Vaultot D. (1999). Divinyl chlorophyll a-specific absorption coefficients and absorption efficiency factors for *Prochlorococcus marinus*: kinetics of photoacclimation. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 188, 21-32. <https://doi.org/10.3354/meps188021>
- Bricaud, A., Claustre, H., Ras, J., Oubelkheir, K. (2004). Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109, C11010. <https://doi.org/10.1029/2004JC002419>
- Blunden, J., Arndt, D.S., Hartfield, G., Weyhenmeyer, G.A., Ziese, M. G. (2018). State of the Climate in 2017. *Bulletin of The American Meteorological Society-(BAMS)*, 99(8), S1-S310. <https://doi.org/10.1175/2018BAMSSStateoftheClimate.1>
- Callejas-Jiménez, M., Santamaría-del-Ángel, E., González-Silvera, A., Millán-Núñez, R., Cajal-Medrano, R. (2012). Dynamic regionalization of the Gulf of Mexico based on normalized radiances (nLw) derived from MODIS-Aqua. *Continental Shelf Research*, 37, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.01.014>
- Cañón-Páez M. (2010). Regionalización dinámica del Gran Caribe basada en productos espectroradiométricos satelitales. Tesis de Maestría. Escuela Naval Almirante Padilla. Facultad Oceanografía Física. Cartagena. 84 p.
- Cape, M.R., Vernet, M., Pettit, E.C., Wellner, J., Truffer, M., Akie, G., Domack, E., Leventer, A., Smith, C., Huber, B. A. (2019). Circumpolar Deep Water impacts glacial meltwater export and coastal biogeochemical cycling along the west Antarctic Peninsula. *Frontiers in Marine Science*, 6, 144. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00144>
- Carvalho, F., Kohut, J., Oliver, M. J., Schofield, O. (2017). Defining the ecologically relevant mixed-layer depth for Antarctica's coastal seas. *Geophysical Research Letters*, 44(1), 338-345. <https://doi.org/10.1002/2016GL071205>

- Chown, S.L., Huiskes, A.H., Gremmen, N.J., Lee, J.E., Terauds, A., Crosbie, Frenot, Y., Hughes K., Imura, S., Kiefer, K., Lebouvier, M., Raymond, B., Tsujimoto M., Ware, C., Vijver B.V., Bergstrom, M. (2012). Continent-wide risk assessment for the establishment of nonindigenous species in Antarctica. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(13), 4938-4943. <https://doi.org/10.1073/pnas.1119787109>
- Chown, S.L., Clarke, A., Fraser, C.I., Cary, S.C., Moon, K.L., McGeoch, Melodie, A. 2015. The changing form of Antarctic biodiversity. *Nature*, 522(7557), 431-438. <https://doi.org/10.1038/nature14505>
- Ciotti, A.M., Lewis, M.R., Cullen, J.J. (2002). Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient. *Limnology and Oceanography*, 47(2), 404-417. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.2.0404>
- Clarke, A. (2008). Antarctic marine benthic diversity: patterns and processes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 366(1-2), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.07.008>
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S.A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, Way, R., Jabobs, P., Skuce, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental research letters*, 8(2), 024024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024024>
- Cota, G., Harrison, W.G., Platt, T., Sathyendranath, S., Stuart V. (2003). Bio-optical properties of the Labrador Sea. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. C7, 3228. <https://doi.org/10.1029/2000JC000597>
- Costa, R. R., Mendes, C. R. B., Tavano, V. M., Dotto, T. S., Kerr, R., Monteiro, T., Odebrech C., Secchi, E. R. (2020). Dynamics of an intense diatom bloom in the Northern Antarctic Peninsula, February 2016. *Limnology and Oceanography*, 65, 2056–2075. <https://doi.org/10.1002/lno.11437>
- Cullen, J., (1982). The Deep Chlorophyll Maximum: Comparing Vertical Profiles of Chlorophyll a. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39(5): 791-803. doi.org/10.1139/f82-108
- Cullen, J. (2015). SubSurface Chlorophyll Maximum Layers: Enduring Enigma or Mystery Solved? *Annual Review of Marine Science*. Vol. 7:207-239. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135111>
- da Cunha, L.C., Hamacher, C., Farias, C., Kerr, R., Mendes, C.R.B., Mata, M.M. (2018). Contrasting end-summer distribution of organic carbon along the Gerlache Strait, Northern Antarctic Peninsula: Bio-physical interactions. In: *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr., Oceanographic Processes and Biological Responses Around Northern Antarctic Peninsula: a 15-year Contribution of the Brazilian High Latitude Oceanography Group*, vol. 149, pp. 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.03.003>
- Devred, E., Sathyendranath, S., Platt, T. (2007). Delineation of ecological provinces using ocean colour radiometry. *Marine Ecology Progress Series*, 346, 1-13. <https://doi.org/10.3354/meps07149>
- Devred, E., Sathyendranath, S., Stuart, V., Platt, T. (2011). A three-component classification of phytoplankton absorption spectra: Application to ocean-color data. *Remote Sensing of Environment* 11, 2255-2266. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.025>
- Dinniman, M.S., Klinck, J.M., Smith W. O. (2011). A model study of Circumpolar Deep Water on the West Antarctic Peninsula and Ross Sea continental shelves. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58(13-16), 1508-1523. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.11.013>
- Domack, E. W., Ishman, S. (1993). Oceanographic and physiographic controls on modern sedimentation within Antarctic fjords. *Geological Society of America Bulletin*, 105(9), 1175-1189. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1993\)105<1175:OAPCOM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)105<1175:OAPCOM>2.3.CO;2)
- Doval, M.D., Álvarez-Salgado, X., Castro, C., Pérez, F. (2002). Dissolved organic carbon distributions in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep-Sea Research II* (49), 663-674. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00117-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00117-5)
- Ducklow, H.W., Schofield, O., Vernet, M., Stammerjohn, S., Erickson, M. (2012). Multiscale control of bacterial production by phytoplankton dynamics and sea ice along the western Antarctic Peninsula: a regional and decadal investigation. *Journal of Marine Systems*, 98, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.03.003>
- Duysens, L.N.M. (1956). The flattening of the absorption spectrum of suspensions as compared to that of solutions. *Biochim. Biophys. Acta*, 19, 1-12. [https://doi.org/10.1016/0006-3002\(56\)90380-8](https://doi.org/10.1016/0006-3002(56)90380-8)
- Estrada, M., Berdalet, E. (1997). Phytoplankton in a turbulent world. *SCI. MAR.*, 61 (Supl. 1), 125-140.

- Evans, J., Dowdeswell, J.A., Cofaigh, C.Ó. (2004). Late Quaternary submarine bedforms and ice-sheet flow in Gerlache Strait and on the adjacent continental shelf, Antarctic Peninsula. *Journal of Quaternary Science*, 19(4), 397-407. <https://doi.org/10.1002/jqs.831>
- Falkowski, P.G., Barber, R.T., Smetacek, V. (1998). Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science*, 281(5374), 200-206. doi: 10.1126/science.281.5374.200. <https://doi.org/10.1126/science.281.5374.200>
- Falkowski, P.G., Raven, J.A. (2007). *Aquatic photosynthesis*. Second Edition. ISBN: 9781400849727. Princeton University Press. New Jersey. 488 pages
- Ferreira, A., Ciotti, A., Mendes, C., Uitz, J., Bricaud, A. (2018). Phytoplankton light absorption and the package effect in relation to photosynthetic and photoprotective pigments in the northern tip of Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. Vol 122, (9), 7344-7363. <https://doi.org/10.1002/2017JC012964>
- Ferreira, A., Costa, R.R., Dotto, T.S., Kerr, R., Tavano, V.M., Brito, A.C., Brotas V., Secchi E.R, Mendes, CR (2020). Changes in Phytoplankton Communities Along the Northern Antarctic Peninsula: Causes, Impacts and Research Priorities. *Frontiers in Marine Science*, 7, 848. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576254>
- Figueroa F. (2002). Bio-optical characteristics of Gerlache and Bransfield Strait waters during an Antarctic summer cruise. *Deep-Sea Research II* (49). Pp 675-691. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00118-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00118-7)
- Freeman, N.M., Lovenduski, N.S., Munro, D.R., Krumhardt, K.M., Lindsay, K., Long, M. C., MacLennan, M. (2018). The variable and changing Southern Ocean Silicate Front: Insights from the CESM Large Ensemble. *Global Biogeochemical Cycles*, 32, 752-768. <https://doi.org/10.1029/2017GB005816>
- Fujiwara, M., Hirawake, T., Suzuki, K., Saitoh, S.I. (2011). Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region. *Biogeosci.*, 4, 817-835. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3567-2011>
- Fujiwara, A., Hirawake, T., Suzuki, K. (2014). Timing of sea ice retreat can alter phytoplankton community structure in the western Arctic Ocean. *Biogeosciences*, 11(7), 1705-1716. <https://doi.org/10.5194/bg-11-1705-2014>
- García, M., Castro, C., Ríos, A., Doval, M., Rosón, G., Gomise, 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 II* (49), 585-602. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8)
- Garver, S.A., Siegel, D.A., Mitchell, B.G. (1994). Variability in near-Surface particulate absorption spectra: What can a satellite ocean color imager see? *Limnol. Oceanogr.* 39, 1349-1367. <https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.6.1349>
- Gonçalves-Araújo, 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, *J. Mar. Syst.*, 142, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.09.007>
- González-Silvera, A., Santamaría-del-Ángel, E., García, V.M., García, C.A., Millán-Núñez, R., Muller-Karger, F. (2004). Biogeographical regions of the tropical and subtropical Atlantic Ocean off South America: classification based on pigment (CZCS) and chlorophyll-a (SeaWiFS) variability. *Continental Shelf Research*, 24(9), 983-1000. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.03.002>
- Goffart, A., Catalano, G., Hecq, J.H. (2000). Factors controlling the distribution of diatoms and *Phaeocystis* in the Ross Sea. *Marine System*, 27 (1-3), 161-1757. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(00\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(00)00065-8)
- Griggs, D., Stafford-Smith, M., Gaffney, O., Rockström, J., Öhman, M.C., Shyamsundar, Steffen, W., Glaser G., Kanier N., Noble, I. (2013). Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, 495(7441), 305-307. <https://doi.org/10.1038/495305a>
- Hardman-Mountford, N.J., Hirata, T., Richardson, K.A., Aiken, J. (2008). An objective methodology for the classification of ecological pattern into biomes and provinces for the pelagic ocean. *Remote Sensing of Environment*, 112(8), 3341-3352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.016>
- Henley, S. F., Tuerena, R. E., Annett, A. L., Fallick, A. E., Meredith, M. P., Venables, H. J., Clarke, A., Ganeshram, R. S. (2017). Macronutrient supply, uptake and recycling in the coastal ocean of the west Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 139, 58-76. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.10.003>

- Henley, S. F., Jones, E. M., Venables, H. J., Meredith, M. P., Firing, Y. L., Dittrich, R., Heiser, S., Stefels, J., Dougans, J. (2018). Macronutrient and carbon supply, uptake and cycling across the Antarctic Peninsula shelf during summer. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2122), 20170168. <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0168>
- Henley, S.F., Schofield, O.M., Hendry, K.R., Schloss, I.R., Steinberg, D.K., Moffat, C., Peck, L., Costa, D.P., Bakker, D., Hughes, C., Rozema, P.D., Ducklow, H., Abele, d., Stefels, J., Van-Leeuwe, M., Brussaard, C., Buma, A., Kubut., J., Meredith M.P. (2019). Variability and change in the west Antarctic Peninsula marine system: Research priorities and opportunities. *Progress in oceanography*, 173, 208-237. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.03.003>
- 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, 581. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00581>
- Hernando, M., Schloss, I.R., Malanga, G., Almandoz, G.O., Ferreyra, G.A., Aguiar, M. B., Puntarulo S. (2015). Effects of salinity changes on coastal Antarctic phytoplankton physiology and assemblage composition. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 466, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2015.02.012>
- Hoepffner, N., Sathyendranath S. (1991). Effect of pigment composition on absorption properties of phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*. 73(1), 11-23. <https://doi.org/10.3354/meps073011>
- Hoepffner, N., Sathyendranath, S. (1993). Determination of the major groups of phytoplankton pigments from the absorption spectra of total particulate matter. *JCR Oceans*, Volume 98, (C 12), 22789-22803. <https://doi.org/10.1029/93JC01273>
- Hoffmann, L.J., Peeken, I., Lochte, K. (2008). Iron, silicate, and light co-limitation of three Southern Ocean diatom species. *Polar Biology*, 31, 1067-1080. <https://doi.org/10.1007/s00300-008-0448-6>
- Holm-Hansen, O., Mitchell, B.G., Hewes, C.D., Karl, D.M. (1989). Phytoplankton blooms in the vicinity of Palmer Station, Antarctica. *Polar Biology*, 10(1), 49-57. <https://doi.org/10.1007/BF00238290>
- Holm-Hansen, O., Mitchell, B.G. (1991). Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 38(8-9), 961-980. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(91\)90092-T](https://doi.org/10.1016/0198-0149(91)90092-T)
- Hooker, S.B., Rees, N., Aiken, J. (2000). An objective methodology for identifying oceanic provinces. *Progress in Oceanography* 45, 313-338. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(00\)00006-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(00)00006-9)
- Hoppema, M., Bakker, K., van Heuven, S.M., van Ooijen, J.C., de Baar, H.J. (2015). Distributions, trends and inter-annual variability of nutrients along a repeat section through the Weddell Sea (1996-2011). *Marine chemistry*, 177, 545-553. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.08.007>
- Hudson, K., Oliver, M.J., Bernard, K., Cimino, M.A., Fraser, W., Kohut, J., Winsor, P. (2019). Reevaluating the canyon hypothesis in a biological hotspot in the Western Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(8), 6345-6359. <https://doi.org/10.1029/2019JC015195>
- Hughes, K. A., Constable, A., Frenot, Y., López-Martínez, J., McIvor, E., Njåstad, B., Terauds, A., Liggett., Roldan, G., Wilmotte A., Xavier, J. C. (2018). Antarctic environmental protection: Strengthening the links between science and governance. *Environmental Science & Policy*, 83, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.006>
- Hydes, D., Aoyama, M., Aminot, A., Bakker, K., Becker, S., Coverly, S., Daniel, A., Dickson, A.G., Grosso, O., Kerouel, R., Van Ooijen, J., Sato, K., Tanhua, T., Woodward, E.M., Zhang, J.Z. (2010). Determination of dissolved nutrients (N, P, Si) in seawater with high precision and inter-comparability using gas-segmented continuous flow analysers. *IOCCP Report No 14., ICPO Publication Series No 134, Version 1*. 87 p.
- IOCCG (2009). Partition of the Ocean into Ecological Provinces: Role of Ocean-Colour Radiometry. Dowell, M. and Platt, T. (eds.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 9, IOCCG, Dartmouth, Canada. 104 p. <https://ioccg.org/wp-content/uploads/2015/10/ioccg-report-09.pdf>
- IOCCG. (2006). Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 5, Lee, Z.P. (Ed.), IOCCG, Dartmouth, Canada. 122 p. <http://www.ioccg.org/reports/report5.pdf>
- IOCCG. (2014). Phytoplankton Functional Types from Space. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 15, IOCCG, Dartmouth, Canada. 164 p. https://ioccg.org/wp-content/uploads/2018/09/ioccg_report_15_2014.pdf

- Isla, E., Masqué, P., Palanques, A., Sanchez-Cabeza, J.A., Bruach, J.M., Guillén, J., Puig, P. (2002). Sediment accumulation rates and carbon burial in the bottom sediment in a high-productivity area: Gerlache Strait (Antarctica). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(16), 3275-3287. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(02\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00083-8)
- Jenkins, A., Jacobs, S. (2008). Circulation and melting beneath George VI Ice Shelf, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C4). <https://doi.org/10.1029/2007JC004449>
- Kahru, M., Di Lorenzo, E., Manzano-Sarabia, M., Mitchell, B.G. (2012). Spatial and temporal statistics of sea Surface temperature and chlorophyll fronts in the California Current. *Journal of plankton research*, 34(9), 749-760. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbs010>
- Kahru, M., Kudela, R.M., Anderson, C. R., Mitchell, B.G. (2015). Optimized merger of ocean chlorophyll algorithms of MODIS-Aqua and VIIRS. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(11), 2282-2285. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2470250>
- Kennicutt, M.C., Chown, S.L., Cassano, J.J., Liggett, D., Peck, L.S., Massom, R., Rintoul, S.R., Storey, J., Vaughan, T.J., Allison I., Badhe, R., Barrett, P.J., Bell, R.E., Brandt A., Cary, M.S., Costa, E.S., Ludecke, C., Miller, H., Allison, I. (2015). A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond. *Antarctic Science*, 27(1), 3-18. <https://doi.org/10.1017/S0954102014000674>
- Kerr, R., Goyet, C., da Cunha, L.C., Orselli, I.B., Lencina-Avila, J.M., Mendes, R.B., Borges, M.C., Mata, M.M., Tavano, V. M. (2018). Carbonate system properties in the Gerlache Strait, Northern Antarctic Peninsula (February 2015): II. Anthropogenic CO₂ and seawater acidification. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 149, 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.07.007>
- Kiefer, D.A., Olson, R.J., Holm-Hansen O., (1976). Another look at the nitrite and chlorophyll maxima in the central North Pacific. *Deep Sea Res. Oceanogr.* 23(12), 1199-1208. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(76\)90895-0](https://doi.org/10.1016/0011-7471(76)90895-0)
- Kim, H., Doney, S.C., Iannuzzi, R.A., Meredith, M.P., Martinson, D.G., Ducklow, H.W. (2016). Climate forcing for dynamics of dissolved inorganic nutrients at Palmer Station, Antarctica: An interdecadal (1993-2013) analysis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121, 2369-2389. <https://doi.org/10.1002/2015JG003311>
- Kim H., Ducklow, W., Ruiz Barlett, M., Buma, J., Meredith, P., Rozem, D., Schofield, M., Venables, J., Schloss, R. (2018). Inter-decadal variability of phytoplankton biomass along the coastal West Antarctic Peninsula. *Phil. Trans. R. Soc. A* 376, 20170174. <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0174>
- Kirk, John T.O. (2011). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. John T. O. Kirk. 3rd edition. ISBN 978-0-521-15175-7. United Kingdom at the University Press, Cambridge. 665 p.
- Klinck, J.M., Hofmann, E.E., Beardsley, R.C., Salihoglu, B., Howard, S. (2004). Water-mass properties and circulation on the west Antarctic Peninsula Continental Shelf in Austral Fall and Winter 2001. *Deep Sea Res. Part II* 51, 1925-1946. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.08.001>
- Kramer, S., Roesler, C.S., Sosik, H.M. (2018). Bio-optical discrimination of diatoms from other phytoplankton in the Surface ocean: Evaluation and refinement of a model for the Northwest Atlantic. *Remote Sensing of Environment* 217, 126-143. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.010>
- Kozlowski, W.A., Deutschman, D., Garibotti, I., Trees, C., Vernet, M. (2011). An evaluation of the application of CHEMTAX to Antarctic coastal pigment data. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(4), 350-364. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.008>
- Leeuwe, M.A., Stefels, J. (2007). Photosynthetic responses in *Phaeocystis antarctica* towards varying light and iron conditions. *Biogeochemistry*, 83, 61-70. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6214-8_6
- Longhurst, A., Sathyendranath, S., Platt, T., Caverhill, C., (1995). An estimate of global primary production in the ocean from satellite radiometer data. *Journal of Plankton Research* 17 (6), 1245-1271. <https://doi.org/10.1093/plankt/17.6.1245>
- Longhurst, A. (2006). *Ecological Geography of the Sea*. Academic press of Elsevier. Second Edition. ISBN 0-12-455521-7. San Diego, California, Usa. 397 pages San Diego. <https://doi.org/10.1016/B978-012455521-1/50002-4>
- Lundesgaard, Ø., Winsor, P., Truffer, M., Merrifield, M., Powell, B., Statscewich, H., Eidam, E., Smith, C.R. (2020). Hydrography and energetics of a cold subpolar fjord: Andvord Bay, western Antarctic Peninsula. *Progress in Oceanography*, 181, 102224. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102224>
- Mackey M.D., Mackey, D.J., Higgins, H.W., Wright, S.W. (1996). CHEMTAX- a program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton. *Marine ecology progress series*. Vol 144, 265-283. <https://doi.org/10.3354/meps144265>

- Mao, Z., Stuart, V., Pan, D., Chen, J., Gong, F., Huang, H., Zhu, Q. (2010). Effects of phytoplankton species composition on absorption spectra and model hyperspectral reflectance. *Ecological Informatics* 5 (2010), 359-366. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.04.004>
- Marra, J., Trees, C.C., Bidigare, R.R., Barber, R.T. (2000). Pigment absorption and quantum yields in the Arabian Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(7-8), 1279-1299. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(99\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(99)00144-7)
- Massom, R.A., Stammerjohn, S.E. (2010). Antarctic sea ice change and variability-physical and ecological implications. *Polar Science*, 4(2), 149-186. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2010.05.001>
- Mendes, C.R.B., de Souza, M.S., García, V.M.T., Leal, M.C., Brotas, V., García, C.A.E. (2012). Dynamics of phytoplankton communities during late summer around the tip of the Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 65, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2012.03.002>
- Mendes, C.R.B., Tavano, V.M., Leal, C., de Souza, M.S., Brotas, V., García, C.A.E. (2013). Shifts in the dominance between diatoms and cryptophytes during three late summers in the Bransfield Strait (Antarctic Peninsula). *Polar biology*, 36(4), 537-547. <https://doi.org/10.1007/s00300-012-1282-4>
- Mendes, C.R.B., Tavano, V.M., Segabinazzi, T., Kerr, R., Silva de Souza, M., Eiras, C., Resende, E. (2018). New insights on the dominance of Cryptophytes in Antarctic coastal waters: A case study in Gerlache Strait. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. Volume 149, 161-170. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.02.010>
- Meredith, M.P., King, J.C. (2005). Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophysical Research Letters*, 32(19). <https://doi.org/10.1029/2005GL024042>
- Meredith, M.P., Venables, H.J., Clarke, A., Ducklow, H.W., Erickson, M., Leng, M.J., Lenaerts, J.T.M., van den Broeke, M.R. (2013). The freshwater system west of the Antarctic Peninsula: spatial and temporal changes. *J. Clim.* 26, 1669-1684. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00246.1>
- Meredith, M.P., Stammerjohn, S.E., Venables, H.J., Ducklow, H.W., Martinson, D.G., Lannuzzi, R.A., Barrand, N. E. (2017). Changing distributions of sea ice melt and meteoric water west of the Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 139, 40-57. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.04.019>
- Mitchell, B.G., Kahru, M., Wieland, J., Stramska, M. (2002). Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for discrete water samples. In: Mueller JL, Fargion GS, McClain R (eds) *Ocean Optics protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume IV: Inherent Optical Properties: Instruments, Characterizations, Field Measurements and Data Analysis Protocols*. NASA/TM-2003-211621, NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, MD. (Chapter 4), 39-60. Palma, E.D.
- Moline, M.A., Claustre, H., Frazer, T.K., Schofield, O., Vernet, M. (2004). Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend. *Global Change Biology*, 10(12), 1973-1980. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00825.x>
- Moline, M.A., Karnovsky, N.J., Brown, Z., Divoky, G.J., Frazer, T.K., Jacoby, C. A., Torres, J., Fraser, W. R. (2008). High latitude changes in ice dynamics and their impact on polar marine ecosystems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134, 267. <https://doi.org/10.1196/annals.1439.010>
- Nilsson, M., Griggs, D., Visbeck, M. (2016). Policy: map the interactions between Sustainable Development Goals. *Nature*, 534(7607), 320-322. <https://doi.org/10.1038/534320a>
- Nunes, S., Latasa, M., Delgado, M., Emelianov, M., Simó, R., Estrada, M., (2019). Phytoplankton community structure in contrasting ecosystems of the Southern Ocean: South Georgia, South Orkneys and western Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 151, 103059. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2019.06.005>
- Pan, B.J., Vernet, M., Reynolds, R.A., Mitchell, B.G. (2019). The optical and biological properties of glacial meltwater in an Antarctic fjord. *PloS one*, 14(2), e0211107. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211107>
- Platt, T., Sathyendranath, S. (2008). Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 112(8), 3426-3436. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.016>
- Pond, S., Pickard, G.L. (1983). *Introductory dynamical oceanography*. Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-057054-9.50007-9>

- Poulton, A. J., Moore, C. M., Seeyave, S., Lucas, M. I., Fielding, S., Ward, P. (2007). Phytoplankton community composition around the Crozet Plateau, with emphasis on diatoms and Phaeocystis. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(18-20), 2085-2105. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2007.06.005>
- Prézelin, B., Hofmann, E., Mengelt, C., Klinck, J. (2000). The linkage between Upperircumpolar Deep Water (UCDW) and phytoplankton assemblages on the west Antarctic Peninsula continental shelf. *J. Mar. Res.* 58, 165-202. <https://doi.org/10.1357/002224000321511133>
- Rodriguez, F., Varela, M., Zapata, M. (2002). Phytoplankton assemblages in the Gerlache and Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) determined by light microscopy and CHEMTAX analysis of HPLC pigment data. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(4-5), 723-747. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00121-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00121-7)
- Roesler, C., Uitz, J., Claustre, H., Boss, E., Xing, X., Organelli, E., Briggs, N., Bricaud, A., Schmechtig, C., Poteau, A., D'Ortenzio, F., Ras, J., Drapeaus, S., Haentjens, N., Barbieux, M. (2017). Recommendations for obtaining unbiased chlorophyll estimates from in situ chlorophyll fluorometers: A global analysis of WET Labs ECO sensors. *Limnology and Oceanography: Methods*, 15(6), 572-585. <https://doi.org/10.1002/lom3.10185>
- Roy, S., Sathyendranath, S., Platt, T. (2010). Retrieval of phytoplankton size from bio-optical measurements: theory and applications. *Journal of the Royal Society Interface*, 8(58), 650-660. <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0503>
- Rozema, P.D., Venables, H.J., van de Poll, W.H., Clarke, A., Meredith, M.P., Buma, A. G.J. (2017). Interannual variability in phytoplankton biomass and species composition in northern Marguerite Bay (West Antarctic Peninsula) is governed by both winter sea ice cover and summer stratification. *Limnology and Oceanography*, 62, 235-252. <https://doi.org/10.1002/lno.10391>
- Rueda-Roa, D.T., Muller-Karger, F.E. (2013). The southern Caribbean upwelling system: Sea Surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 78 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.04.008>
- Ruiz-Barlett, E.M., Tosonotto, G.V., Piola, A.R., Sierra, M.E., Mata, M.M. (2018). On the temporal variability of intermediate and deep waters in the Western Basin of the Bransfield Strait. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 149, 31-46. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.12.010>
- Ryabinin, V., Barbière, J., Haugan, P., Kullenberg, G., Smith, N., McLean, C., Troisi, A., Fisher, A., Arico, S., Aarup, T., Pissierssens, P., Visbeck, M., Oksfeldt, H., Rigaud, J. (2019). The UN decade of ocean science for sustainable development. *Frontiers in Marine Science*, 6, 470. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00470>
- Saba, G.K., Fraser, W.R., Saba, V. S., Lannuzzi, R.A., Coleman, K.E., Doney, S.C., Ducklow, H., Martison, D., Miles, T.N., Patterson-Fraser, D., Stammerjohn, S.E. (2014). Winter and spring controls on the summer food web of the coastal West Antarctic Peninsula. *Nature Communications*, 5(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/ncomms5318>
- Sangra, 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 Res. Part I: Ocean. Res. Pap.* 58 (4), 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011>
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S., Müller-Karger, F.E. (1994). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C4), 7411-7421. <https://doi.org/10.1029/93JC02154>
- Santamaría-del-Ángel, E., González-Silvera, A., Millán-Núñez, R., Callejas-Jiménez, M. E., Cajal-Medrano, R. (2011). Case Study 19. Determining Dynamic Biogeographic Regions using Remote Sensing Data. *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management* (2011), EU PRESPO and IOCCG, Dartmouth, Canada, 293 p.
- Santamaría-del-Ángel, E.; Soto, I.; Millán-Núñez, R.; González-Silvera, A.; Wolny, J.; Cerdeira-Estrada, S.; Cajal-Medrano, R.; Muller-Karger, Frank E.; Cannizzaro, Jennifer; Padilla-Rosas, Y. XS; Mercado-Santana, A.; Gracia-Escobar, F.F.; Alvarez-Torres, P., Ruiz-de-la-Torre, M. C. (2015). Phytoplankton Blooms: New Initiative using Marine Optics as a Basis for Monitoring Programs. *Marine Science Faculty Publications*. 1042. Phytoplankton Blooms: New Initiative using Marine Optics as a Basis for Monitoring Programs, in M. T. Sebastiá, *Coastal Ecosystems: Experiences and Recommendations for Environmental Monitoring Programs*, Nova Science Publishers, p. 57-88

- Sathyendranath, S., Lazzara, L., Prieur, L. (1987). Variations in the spectral values of specific absorption of phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 32(2), 403-415. <https://doi.org/10.4319/lo.1987.32.2.0403>
- Sathyendranath, S., Watts, L., Devred, E., Cota G, Platt, T., Caverhill, C., Maas, H., (2004). Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data. *Mar Ecol Prog Ser* (272), 59-68. <https://doi.org/10.3354/meps272059>
- Schofield, O., Saba, G., Coleman, K., Carvalho, F., Couto, N., Ducklow, H., Finkel, Z., Irwin, A., Kahl, A., Miles, T., Montes-Hugo, M., Stammerjohn, S., Waite, N. (2017). Decadal variability in coastal phytoplankton community composition in a hanging West Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Research Part I* 124., 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.014>
- Schloss, I.R., Abele, D., Moreau, S., Demers, S., Valeria Bers, A., González, O. Ferreyra, G. A. (2012). Response of phytoplankton dynamics to 19-year (1991-2009) climate trends in Potter Cove (Antarctica). *J. Mar. Syst.*, 92(1), 53-66 <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.10.006>
- Seyboth, E., Botta, S., Mendes, C.R.B., Negrete, J., Dalla Rosa, L., Secchi, E.R. (2018). Isotopic evidence of the effect of warming on the northern Antarctic Peninsula ecosystem. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 149, 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.12.020>
- Sosik, H.M., Mitchell, B.G. (1995). Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System. *Deep Sea Research*. 42(10), 1717-1748. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00081-G](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00081-G)
- Spalding, M.D., Fox, H.E., Allen, G.R., Davidson, N., Ferdaña, Z.A., Finlayson, M.A.X., Halpern, B.S., Jorge, M.A, Lombana, A., Lourie, S.A., Martin, K.D., McManus, E., Molnar, J., Recchia, Ch., Robertson, J. (2007). Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, 57(7), 573-583. <https://doi.org/10.1641/B570707>
- Stuart, V., Sathyendranath, S., Head, E.J.H., Platt, T., Irwin, B., Maass, H. (2000). Bio-optical characteristics of diatom and prymnesiophyte populations in the Labrador Sea. *Mar Ecol Prog Ser* 201, 91-106. <https://doi.org/10.3354/meps201091>
- Suprenand, P.M., Ainsworth, C.H. (2017). Trophodynamic effects of climate change-induced alterations to primary production along the western Antarctic Peninsula. *Marine Ecology Progress Series*, 569, 37-54. <https://doi.org/10.3354/meps12100>
- Thomas, C.S. (2012). The HPLC Method. Chapter 6. In: *The Fifth SeaWiFS HPL Analysis Round-Robin Experiment (SeaHARRE-5)*. NASA/TM-2012-217503.SEAHERRE5, 63-72.
- Torecilla, E., Stramski, D., Reynolds, R., Millán-Núñez, E., Piera, J. (2011). Cluster analysis of hyperspectral optical data for discriminating phytoplankton pigment assemblages in the open ocean. *Remote Sensing of Environment*, 115(10), 2578-2593. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.014>
- Tréguer, P.J. (2014). The southern ocean silica cycle. *Comptes Rendus Geoscience*, 346(11-12), 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2014.07.003>
- Torres, R.R., Laurido, A.L., Sánchez, J.D.I., (2020). Hydrographic conditions during two austral summer situations (2015 and 2017) in the Gerlache and Bismarck straits, northern Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 103278. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103278>
- Turner, J., Colwell, S.R., Marshall, G.J., Lachlan-Cope, T.A., Carleton, A.M., Jones, P. D., Iagun, V., Reid, P.A, Iagovkina, S. (2005). Antarctic climate change during the last 50 years. *International journal of Climatology*, 25(3), 279-294. <https://doi.org/10.1002/joc.1130>
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J.C., Phillips, T., Hosking, J.S., Bracegirdle, T., Marshall, G.J., Mulvaney, R., Deb, P. (2016). Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535(7612), 411-415. <https://doi.org/10.1038/nature18645>
- Uitz, J., Claustre, H., Morel, A., Hooker, S.B. (2006). Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on Surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C8005). <https://doi.org/10.1029/2005JC003207>
- Uitz, J., Stramski, D., Reynolds, R., Dubranna, J. (2015). Assessing phytoplankton community composition from hyperspectral measurements of phytoplankton absorption coefficient and remote-sensing reflectance in open-ocean environments. *Remote Sensing of Environment*, 171, 58-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.09.027>

- Varela M., Fernández, E., Serret, P. (2002). Size-fractionated phytoplankton biomass and primary production in the Gerlache and south Bransfield Straits (Antarctic Peninsula) in Austral summer 1995-1996. *Deep-Sea Research II* (49), 749-768. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00122-9)
- Vidussi, F., Claustre, H., Manca, B.B., Luchetta, A., Marty, J.C. (2001). Phytoplankton pigment distribution in relation to upper thermocline circulation in the eastern Mediterranean Sea during winter. *J. Geophys. Res. Oceans* 106(C9), 19939-19956. <https://doi.org/10.1029/1999JC000308>
- Wang, X.T., Sigman, D.M., Prokopenko, M.G., Adkins, J.F., Robinson, L.F., Hines, S. K., Chai, J., Studer, A.S., Martínez-García, T.C., Haug, G. H. (2017). Deep-sea coral evidence for lower Southern Ocean Surface nitrate concentrations during the last ice age. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(13), 3352-3357. <https://doi.org/10.1073/pnas.1615718114>
- Wilcoxon, F., Wilcoxon, R.A. (1964). Some rapid approximate statistical procedures. Pear River. N.Y. Laboratories. Division of the American Cyanamid Company.
- Wilcoxon, F. Katti, S.K. Wilcoxon R.A. (1970). Critical values and probability levels for the Wilcoxon rank sum test and Wilcoxon signed rank test. Selected tables in mathematical statistics, 1, pp 171-259 https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=TH4A_39UkTkC&oi=fnd&pg=PA171&dq=Critical+values+and+probability+levels+for+the+Wilcoxon+rank+sum+test+and+Wilcoxon+signed+rank+test&ots=5EWCsC4Ok0&sig=6qVI1xgAOo_NmDv9VHCSdvdZz0g&redir_esc=y#v=onepage&q=Critical%20values%20and%20probability%20levels%20for%20the%20Wilcoxon%20rank%20sum%20test%20and%20Wilcoxon%20signed%20rank%20test&f=false
- Williams, C., Boies, C., Domack, E.W. (1989). Glacial drainage systems along the Antarctic Peninsula and Palmer Archipelago: *Antarctic Journal of the United States*, v. 24, p. 116-117.
- Wright, S.W., Jeffrey, S.W., (2006). Pigment Markers for Phytoplankton Production. In: Volkman J.K. (eds) *Marine Organic Matter: Biomarkers, Isotopes and DNA. The Handbook of Environmental Chemistry*, vol 2N. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/698_2_003
- Xavier, J. C., Barbosa, A., Agustí, S., Alonso-Sáez, L., Alvito, P., Ameneiro, J., Ávila, C., Baeta, A., Canário, J., Carmona, R., Catry, P., Ceia, F., Clark, M., Cristobo, F., Cruz, B., Duarte, C., Figuerola, J., Gili, J.M., Viñegla, B., Catry, P. (2013). Polar marine biology science in Portugal and Spain: Recent advances and future perspectives. *Journal of Sea Research*, 83, 9-29. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2013.05.013>
- Xi, H., Hieronymi, M., Röttgers, R., Krasemann, H., Qiu, Z. (2015). Hyperspectral differentiation of phytoplankton taxonomic groups: a comparison between using remote sensing reflectance and absorption spectra. *Remote Sens.* 7, 14781-14805. <https://doi.org/10.3390/rs71114781>
- Xi, H., Hieronymi, M., Krasemann, H., Röttgers, R. (2017). Phytoplankton group identification using simulated and in situ hyperspectral remote sensing reflectance. *Frontiers in Marine Science*, 4, 272. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00272>
- Zhang, R., Zheng, M., Chen, M., Ma, Q., Cao, J., Qiu, Y. (2014). An isotopic perspective on the correlation of Surface ocean carbon dynamics and sea ice melting in Prydz Bay (Antarctica) during austral summer. *Deep-Sea Research I* 83, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.08.006>
- Zhang, H., Fujiwara, A., Devred, E., Qiu, Z. (2018). Estimation of phytoplankton taxonomic groups in the Arctic Ocean using phytoplankton absorption properties: Implication for ocean-color remote sensing. *Optics Express* 26 (24), 32280-32301 <https://doi.org/10.1364/OE.26.032280>
- Zheng, G., Digiamo, M. (2018). Detecting phytoplankton diatom fraction based on the spectral shape of satellite-derived algal light absorption coefficient. *Limnol. Oceanogr.* 63, 2018, S85-S98. <https://doi.org/10.1002/lno.10725>
- Zhou, M., Niiler, P.P., Hu, J.H. (2002). Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep Sea Res. Part I: Ocean. Res. Pap.* 49 (2), 267-280. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00062-0)