

Distribución espacial de la variable densidad en los estrechos de Gerlache y Bransfield durante el verano austral entre 1979-2019

Spatial distribution of variable density in the Gerlache and Bransfield straits during the austral summer between 1979-2019

DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.584>

Fecha de recepción: 2021-12-27 / Fecha de aceptación: 2022-09-20

Francisco Javier Torres Ramírez¹

CITAR COMO:

Torres Ramírez, F. J. (2022). Distribución espacial de la variable densidad en los estrechos de Gerlache y Bransfield durante el verano austral entre 1979-2019. *Bol. Cient. CIOH*; 41(2): 3-16. ISSN impreso 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.2022.584>

RESUMEN

Colombia ha realizado expediciones a la Antártica desde el año 2014 con el objetivo de contribuir al conocimiento sobre el continente blanco y materializar los intereses nacionales sobre el mismo. El presente estudio aporta al entendimiento de la dinámica oceanográfica en los estrechos de Gerlache y Bransfield a partir del análisis conjunto de información de temperatura, salinidad y presión recolectada con equipos CTD durante las expediciones antárticas realizadas por Colombia entre los años 2014 y 2019, complementada con información de 40 años obtenida del World Ocean Database. Este análisis permitió a través de un control de calidad previo, calcular y graficar la distribución horizontal de la variable densidad a diferentes profundidades estándar durante el verano austral entre 1979 a 2019, para así entender la distribución de la variable mencionada en el área de estudio. Se analizó el comportamiento de la densidad, demostrando a través de los resultados que, este parámetro se da en razón a las variaciones de la salinidad y no de la temperatura como ocurre en latitudes bajas. A diferencia de estudios previos realizados en la península Antártica para un año particular, en la presente investigación se seleccionó un periodo de 40 años del verano austral (meses de enero, febrero y marzo), con miras a conocer la distribución horizontal de la variable densidad para diferentes profundidades estándar y a determinar las condiciones esperadas, las cuales son un indicador de comportamiento a nivel general en el área de estudio.

PALABRAS CLAVES: Tratado Antártico, Gerlache, Bransfield, densidad, control de calidad, verano austral.

ABSTRACT

Colombia has carried out expeditions to Antarctic since 2014 with the aim of contributing to knowledge about the white continent and materializing national interests in it. The present study contributes to the understanding of the oceanographic dynamics in the Gerlache and Bransfield straits from the joint analysis of temperature, salinity and pressure information collected with CTD equipment during the Antarctic expeditions carried out by Colombia between 2014 and 2019, complemented with 40-year data obtained from the World Ocean Database. This analysis allowed, through a previous quality control, to calculate and graph the horizontal distribution of the density variable at different standard depths during the austral summer between 1979 and 2019, in order to understand the distribution of the mentioned variable in the study area. The behavior of the density was analyzed, demonstrating through the results that this parameter occurs due to variations in salinity and not in temperature, as occurs at

¹ Orcid: 0000-0003-0992-240X. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Correo electrónico: francisco.torres.ra@armada.mil.co

low latitudes. Unlike previous studies carried out in the Antarctic Peninsula for a particular year, in the present investigation a period of 40 years of the southern summer (January, February and March) was selected, with a view to knowing the horizontal distribution of the variable density for different standard depths and to determine the expected conditions, which are an indicator of behavior at a general level in the study area.

KEYWORDS: *Antarctic Treaty, Gerlache, Bransfield, density, quality control, austral summer.*

INTRODUCCIÓN

Colombia se adhirió al Tratado Antártico mediante la Ley 67 de 1988 con el objetivo de aportar a la investigación científica referente a los fenómenos de impacto mundial, como el calentamiento global y el cambio climático (CCO, 2018). Lo anterior marcó el inicio del Programa Antártico Colombiano (PAC) y la Agenda Científica Antártica 2014-2035, que incluye llevar a cabo siete expediciones al continente blanco (CCO, 2014a), logrando así aportar a que el país logre a futuro posicionarse como un actor preponderante dentro del Sistema del Tratado Antártico, y que sea tenido en cuenta para la toma de decisiones de ese territorio (Sánchez, 2018).

En este contexto, la generación y aporte de nuevo conocimiento se convierte en un insumo fundamental con miras a establecer información base para estudios de las variables oceanográficas que sirvan como referencia para las diferentes investigaciones que son conducidas por científicos de todo el mundo en la península Antártica. Una de estas variables es la densidad del agua de mar, la cual es directamente proporcional a su salinidad e inversamente proporcional a la temperatura. Teniendo en cuenta que el agua es poco compresible, en grandes profundidades, el agua se comprime y aumenta su densidad; es así como la densidad del agua de mar es una función de la salinidad, la temperatura y la presión (Reyna *et al.*, 2013).

Las variaciones de densidad corresponden principalmente a las variaciones en la temperatura; es decir, a mayor temperatura, menor es la densidad del agua de mar; sin embargo, en regiones donde la temperatura es muy baja como en las regiones polares, los cambios de densidad se deben en razón a las variaciones en la salinidad (Reyna *et al.*, 2013). Igualmente, se puede observar que el contenido de sal ocasiona la disminución del punto de congelación del agua de mar a una temperatura

de $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, aproximadamente. La densidad de una porción de agua de mar determina la profundidad en la cual se ubicará en una columna de agua; la mencionada densidad aumenta cuando los valores de su salinidad son mayores o cuando disminuye la temperatura. En contraste, el agua de mar es menos densa cuando se calienta o disminuye su salinidad por aportes de agua dulce, es decir por ríos o precipitaciones (Reyna *et al.*, 2013).

Entender la distribución de la densidad en el área de estudio permite determinar el comportamiento de esta variable y su relación con la temperatura y salinidad; así como identificar masas de agua de acuerdo con sus características y potencialmente conocer las implicaciones en los canales sónicos del área de estudio.

El objetivo del presente trabajo es aportar al entendimiento de la distribución espacial de la densidad del agua de mar en los estrechos de Gerlache y Bransfield durante el verano austral a partir del análisis de información termohalina obtenida en campo durante las expediciones científicas de Colombia a la Antártica (2014-2019) y de bases de datos globales (1979-2019). Este trabajo se enmarca en la línea de Conocimiento Básico de Oceanografía, en el marco del proyecto de investigación liderado por la Dirección General Marítima (Dimar) denominado Investigación Científica Marina para la Seguridad Marítima en la Antártida (Iceman), el cual tiene como objeto desarrollar investigación científica marina desde los componentes de oceanografía física, química, geomorfología e hidrografía (CCO, 2014b). Así mismo, genera educación marítima e investigación científica, los cuales son intereses marítimos de Colombia, potencializando así su participación en escenarios internacionales.

ÁREA DE ESTUDIO

El extremo noroeste de la península Antártica es la parte más cercana del continente helado a América del Sur. Esta región se encuentra entre

las zonas de calentamiento más acelerado del planeta, provocando también calentamiento en las aguas profundas y superficiales, y cambios en otras variables oceanográficas como la salinidad (Crespo, 2020). Las fluctuaciones climáticas durante los períodos de calentamiento atmosférico y oceánico han alterado los patrones dinámicos de los glaciares y como resultado, se han observado pérdidas significativas de las reservas de hielo a pequeña y gran escala en los ambientes glaciomarineros de la península Antártica durante los últimos años (Hogg *et al.*, 2017).

El área de estudio específicamente son los estrechos de Gerlache y Bransfield, ubicados en la península Antártica, lugares donde se realizaron las expediciones a la Antártica por parte de Colombia (Fig. 1).

El estrecho de Bransfield está semiencerrado entre las islas Shetland del Sur y la costa norte de la península Antártica; su extensión es de cerca de 50 000 km² y esta puede ser dividida en tres grandes cuencas (García *et al.*, 2002). La cuenca occidental del Estrecho está conectada con el mar de Bellingshausen, a través de los pasos que hay entre las islas Shetland del Sur y también a través del estrecho de Gerlache, y con el paso de Drake, a través del estrecho de Boyd, principalmente. Asimismo, representa una extensión aproximada de 300 km en sentido noreste-suroeste, y un ancho que varía entre los 60 km y 100 km, ubicándose entre 62° S y 64° S, y de 55° W a 62° W (Zhou, Niiler y Hu, 2002).

El estrecho de Gerlache se encuentra ubicado en el sector noroccidental de la península Antártica, entre las latitudes 64° S y 65° S, y longitudes

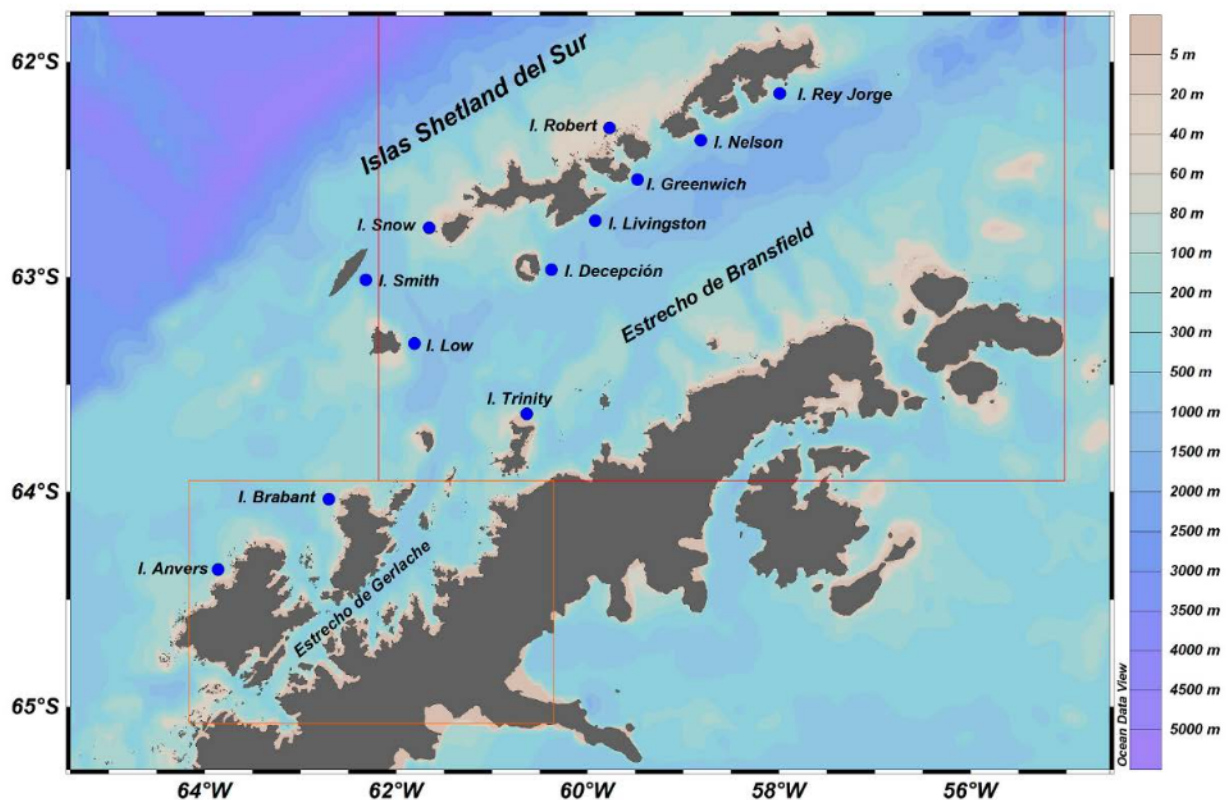


Figura 1. Estrecho de Gerlache y estrecho de Bransfield en la península Antártica.

de 61° W y 64° W, delimitado por el archipiélago Palmer en el que se destacan dos formaciones insulares, las islas Anvers y Brabant. El estrecho tiene una longitud de 180 km, y entre 8 km a 60 km de ancho, con profundidad de 300 m en el extremo sur y 1 000 m en el extremo norte; se caracteriza por estar entre islas, canales, pasos someros y fiordos que producen una circulación marina compleja, añadiendo a esto considerables gradientes de presión atmosférica y viento que generan importantes corrientes superficiales. La circulación superficial en el estrecho de Gerlache fluye hacia el noreste con velocidades superiores a 30 cm/s, alimentando la corriente del estrecho de Bransfield (Zhou *et al.*, 2002).

García *et al.* (2002) estudiaron las masas de agua y la distribución de las propiedades físico-químicas en el estrecho de Bransfield en su parte occidental y el estrecho de Gerlache durante el verano austral de 1995-1996. Estos autores encontraron que al este del mar de Bellingshausen se presentan cuatro masas de agua principales: el Agua Superficial Antártica (AASW, por sus siglas en inglés), Agua Circumpolar Superior Profunda (UCDW, por sus siglas en inglés), Agua Circumpolar Inferior Profunda (LCDW, por sus siglas en inglés) y el Agua de Fondo Antártica (AABW, por sus siglas en inglés).

La AASW es una masa de agua fría, originada alrededor de la Antártica a principios del invierno y su profundidad es de hasta 200 m, aproximadamente. Debajo del AASW se presentan dos capas de aguas circumpolares profundas (CDW) las cuales se diferencian por su origen; en el caso del Agua de Fondo Antártica es aportada por el mar de Weddell. Es decir que, el estrecho de Bransfield se puede definir como una zona de transición entre el mar de Bellingshausen y el mar de Weddell; es así que el mencionado estrecho está ocupado por masas de agua cuyas propiedades están controladas por las características de los flujos de entrada de los mares adyacentes, un flujo más cálido del mar de Bellingshausen, con una temperatura entre 0.5 °C y 3.0 °C, una salinidad entre 33.1 y 33.9 en verano, y un flujo frío y de mayor salinidad correspondiente al mar de Weddell, caracterizado normalmente por temperaturas negativas y valores de salinidad entre 34.1 y 34.6 en verano (García *et al.*, 2002).

García *et al.* (1994) indicaron que en el estrecho de Bransfield se pueden denominar estas dos masas de agua como Aguas Zonales de Transición con influencia del mar de Bellingshausen (TBW, por su sigla en inglés) y Aguas Zonales de Transición con influencia del mar de Weddell (TWW, por su sigla en inglés), en función de las aguas donde se originan. Las TBW parecen estar confinadas en un estrecho de la capa de mezcla que se extiende a lo largo de la mitad norte del estrecho de Bransfield; las LCDW fluyen hacia el estrecho de Bransfield a través del estrecho de Boyd y otros pasajes, haciendo que sean reemplazada las TWW, produciendo temperaturas profundas mayores a 0 °C (Fig. 2).

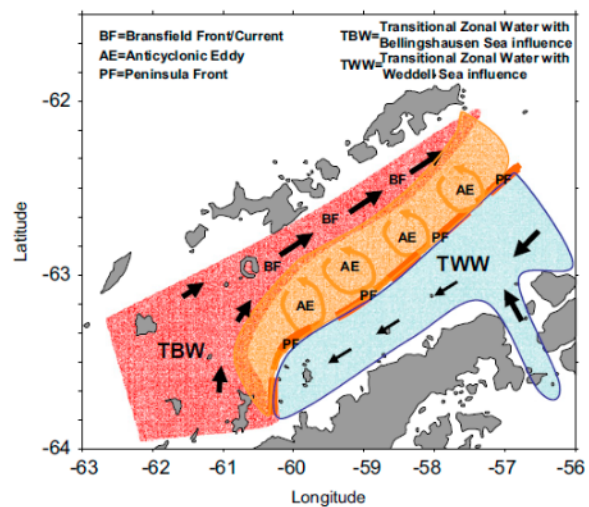


Figura 2. Dinámica en el estrecho Bransfield. (Fuente: Sangrá *et al.*, 2011).

En García *et al.* (2002) se determinó que el estrecho de Gerlache puede entenderse como una extensión hacia el oeste de la cuenca occidental del estrecho de Bransfield; la columna de agua del estrecho de Gerlache consiste en una capa superior de TBW y una capa subyacente de TWW; por último, afirmaron que podrían presentarse limitadas intrusiones de CDW desde el oeste, entre las TBW y las TWW en el estrecho de Gerlache; acá las TBW deben ser más frías y menos salinas que en el estrecho de Bransfield debido a los aportes de agua dulce de los glaciares locales.

Haciendo uso de datos hidrográficos recolectados en la cuenca central del estrecho de Bransfield en la Antártica, Sangrá *et al.* (2011)

describieron la variabilidad de mesoescala, en la cual se determinó que la corriente de Bransfield fluyó hacia el noreste a lo largo del talud de las islas Shetland del Sur; es así que, un modelo físico sugirió que la mencionada corriente se comporta como una corriente de gravedad impulsada por el índice de rotación local y las diferencias de densidad entre las TBW y las TWW. Estos mismos autores reportan que, por debajo del frente de Bransfield, se observó una estrecha lengua de 10 km de ancho de CDW a lo largo del talud de las islas Shetland del Sur, y en la superficie la convergencia de las TBW y las TWW conduce a un frente baroclínico poco profundo cerca de la península Antártica, denominado frente de la Península (Sangrá *et al.*, 2011).

En consecuencia, el patrón básico de circulación consistió en un flujo en el oeste del agua relativamente cálida y fresca del mar de Bellingshausen, el estrecho de Gerlache y la corriente Circumpolar, y un flujo oriental de agua relativamente fría y salada del mar de Weddell; el agua más cálida y fresca fluyó hacia el noreste a lo largo de la mitad septentrional del estrecho, mientras que el agua fría y salada circuló hacia el sudoeste a lo largo de la mitad meridional del estrecho. Así mismo, dedujeron que el área de estudio comprende aguas que cambian gradualmente de las que son típicas del mar de Bellingshausen a las del mar de Weddell (Sangrá *et al.*, 2011).

Con base en un estudio oceanográfico y observación de las condiciones ambientales del estrecho de Bransfield, Vásquez y Tenorio (2016) concluyeron que en el mencionado estrecho existen tres tipos de aguas, las del mar de Weddell, aguas del mar de Bellingshausen, caracterizada por la presencia de AASW, CDW aguas del estrecho de Gerlache. Así mismo, encontraron que se presenta una notoria separación entre las aguas cálidas y menos salinas que fluyen hacia el noreste en la mitad septentrional del estrecho de Bransfield, con las aguas frías y salinas que ocupan su mitad meridional.

En este mismo estudio se determinó que las temperaturas más bajas se presentan próximas a la península Antártica, debido a las aguas frías procedentes del mar de Weddell; mientras que las temperaturas superficiales más altas se registraron próximas a las islas Shetland del Sur,

debido posiblemente a la advección de aguas más cálidas (Vásquez y Tenorio, 2016). Por otro lado, a lo largo del eje central del estrecho se observó presencia de un frente térmico y halino, denominado frente de Bransfield, que tenía asociada una corriente de chorro baroclínica, conservando la diferencia norte sur, es decir norte cálido y sur frío (Vásquez y Tenorio, 2016).

Recientemente, Torres, Caicedo e Iriarte (2020) describieron las condiciones hidrográficas durante los veranos australes de enero del año 2015 y 2017 para los estrechos de Gerlache y Bismarck, ubicados al norte de la península Antártica, en la cual se logró determinar que la temperatura de la capa de mezcla durante enero de 2017 fue más cálida que la registrada en años anteriores, al igual que una disminución extrema de la extensión del hielo marino antártico a finales de 2016.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se emplearon datos de temperatura, salinidad y presión obtenidos durante las expediciones antárticas realizadas por Colombia entre los años 2014 y 2019, y registrados con perfilador marino CTD-O modelo SBE-19 Pro V2 y dos CTD-O modelo SEA BIRD 25T, los cuales están disponibles para el uso científico por parte del Centro Colombiano de Datos Oceanográficos (Cecoldo).

Adicionalmente, fueron utilizados los datos que dispone el World Ocean Database (WOD) desde 1979 hasta 2019 para el área de estudio. A partir de estos datos se realizó el cálculo de la variable densidad en el área de estudio siguiendo la metodología propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (Unesco), empleando la paquetería Seawater. Para ello se empleó TEOS-10, que a través de la salinidad absoluta y la temperatura conservativa, permitió determinar la densidad para cada profundidad estándar en el área de estudio (McDougall y Barker, 2011).

Finalmente y para la elaboración de las gráficas de la densidad, se utilizó el software Ocean Data View (ODV), mediante la aplicación del método de interpolación DIVA (Data Interpolating Variational Analysis), el cual permite interpolar datos que

no se encuentran espaciados regularmente. A continuación se detallan las fases seguidas durante la aproximación metodológica empleada.

Fase I: tratamiento de datos

Para garantizar el control de calidad de los datos obtenidos del WOD y del Cecoldo, se siguió la metodología internacional propuesta en la elaboración del World Ocean Atlas 2018 (García, Boyer, Locarnini, Batanova y Zweng, 2018). El tratamiento de datos fue llevado a cabo mediante un código desarrollado en el software Matlab, con miras a procesar los datos para garantizar un control de calidad de estos, incluyendo las funciones de la TEOS-10 para el cálculo de la densidad. El control de calidad inició con la eliminación de filas con datos erróneos, eliminación de datos fuera del rango del área de estudio y selección de datos a profundidades estándar. Luego se aplicó la eliminación de datos fuera de rangos históricos (Tabla 1) (García *et al.*, 2018).

Tabla 1. Valores de rangos máximos y mínimos históricos. (Fuente: García *et al.*, 2018).

Prof. (m)	Temperatura (°C)		Salinidad	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
---	-2.40	15	0	40
1	-2.40	15	26	36.75
10	-2.40	15	28	36.75
20	-2.40	15	29	36.5
30	-2.40	15	30	36.5
50	-2.40	15	30.5	36.5
75	-2.40	15	30.5	36.5
100	-2.40	15	31	36.5
125	-2.40	15	31	36.25
150	-2.40	15	31	36
200	-2.40	15	31	36
250	-2.40	15	31.5	35.75
300	-2.40	15	32	35.50
400	-2.40	10	33	35.50
500	-2.40	10	33.8	35.25
600	-2.40	10	33.8	35
700	-2.40	10	34	35
800	-2.40	10		
900	-2.40	10		

Posteriormente se aplicó el filtro 'Comprobación de gradiente o inversión excesivos' (Ecu. 1), el

cual, según Romero, Marriaga y Torres (2007), se refiere a un decrecimiento o incremento excesivo en el valor del parámetro respecto a la profundidad; el gradiente por lo general es un valor negativo y la inversión un valor positivo.

$$\text{Gradiente/Inversión} = \frac{V_2 - V_1}{Z_2 - Z_1} \quad \text{(Ecu. 1)}$$

Donde, V_1 es el valor de la variable en la profundidad del nivel actual; V_2 es el valor de la variable en el siguiente nivel de la profundidad; Z_1 es la profundidad en metros del nivel de agua actual, y Z_2 hace referencia a la profundidad en metros del siguiente nivel. Igualmente, García *et al.* (2018) determinaron los valores a partir de las tendencias de cada variable, tanto para los gradientes (Maximum Gradient Value-MGV) como para las inversiones (Maximum Inversion Value-MIV) (Tabla 2).

Tabla 2. Factores de gradiente e inversión máximos usados por WOD18. (Fuente: García *et al.* 2018).

Parámetro	Profundidad hasta 400 m		Profundidad mayores a 400 m	
	MIV	MGV	MIV	MGV
Temperatura	0.300	-0.700	0.300	-0.700
Salinidad	9.000	-9.000	0.050	-0.050

Para el siguiente control de calidad, denominado 'controles estadísticos', se dividió la totalidad del área de estudio en 44 celdas de 0.3° de latitud por 0.6° de longitud, con miras a alcanzar una mejor resolución obteniendo así mayor detalle, reduciendo también la deformación de la malla debido a la proyección cartográfica utilizada (Transversal Mercator) para zonas de latitudes altas (Fig. 3).

Con los datos filtrados se realizó un promedio para la variable temperatura y salinidad por profundidad estándar en cada celda, con un intervalo de datos de 40 años, desde 1979 hasta el 2019; lo anterior se calculó para el periodo del verano austral, es decir, los meses de enero, febrero y marzo. Así mismo, se aplicó el control de calidad denominado 'Seis Sigma (6σ)', el cual consistió en eliminar los valores que están a más de tres desviaciones estándar o a menos de tres desviaciones estándar ($Z > 3$ o $Z < -3$), ya que representan alto ruido y no son confiables (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 2019).

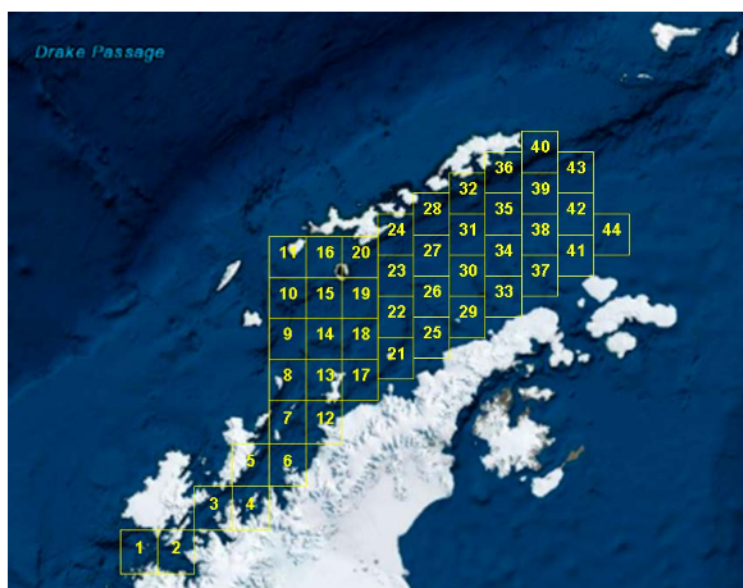


Figura 3. División del área de estudio por celdas. (Fuente: Lara y Jiménez, 2019).

Luego de que los datos fueron sometidos al tratamiento indicado para garantizar un óptimo control de calidad, les fue asignada una bandera de calidad de acuerdo con lo establecido por García *et al.* (2018), donde los datos que cumplieron con todos los filtros, les fueron asignados una bandera "0". Lo anterior aseguró que los datos cumplieron con los estándares de calidad mínimos exigidos por la comunidad científica, siendo considerados como información confiable.

Fase 2: cálculo variable densidad

Una vez obtenidos los datos de temperatura y salinidad filtrados se utilizó el paquete informático TEOS-10, a partir del cual se obtuvo el valor de la densidad en cada profundidad estándar y para cada celda. TEOS-10 tiene en cuenta los efectos de las variaciones de la composición del agua de mar en todo el océano mundial, las cuales generan diferencias de densidad (McDougall y Barker, 2011). Según estos autores, el cálculo de la densidad se debe hacer en función de la salinidad absoluta, temperatura conservativa y presión (Ecu. 2); la salinidad absoluta se calculó con la salinidad práctica, presión, latitud y longitud; la temperatura conservativa se calculó en función de la salinidad absoluta, temperatura y presión.

$$\rho = \rho(SA, CT, p) \quad \text{(Ecu. 2)}$$

Fase 3: gráficas variable densidad

Finalmente, para la obtención de las gráficas de la variable densidad se utilizó el software ODV versión 5.4.0. de marzo de 2021, el cual es de libre acceso, permite analizar y visualizar un amplio número de variables oceanográficas, series de tiempo, secuencia de datos, entre otros (Ocean Data View, 2021). ODV utiliza el método de interpolación DIVA, que, según Troupin *et al.*, (2012), es un método que permite interpolar datos que no se encuentran espaciados regularmente, teniendo en cuenta el fondo y las fronteras del área de estudio. Este método fue utilizado en la elaboración del Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922-2013 (Andrade, Rangel y Herrera, 2015), el cual, según los autores, se ha aplicado con éxito en varios océanos y a diferentes escalas.

RESULTADOS

A continuación se describen doce gráficas de la distribución horizontal de la variable densidad en el área de estudio a diferentes profundidades, correspondientes al verano austral. En la Figura 4 se aprecia un mosaico de la distribución horizontal de la densidad para las profundidades de 1 m, 10 m, 20 m y 30 m. La distribución horizontal de la densidad en el área de estudio presenta mayor variabilidad en la superficie (Fig.

4a), comparada con las demás profundidades, evidenciando valores entre $1\ 025\ \text{kg/m}^3$ y $1\ 034\ \text{kg/m}^3$. A partir de los 10 m de profundidad (Fig. 4b) se evidencian valores altos de densidad en la parte meridional del estrecho de Bransfield, y valores más bajos en la parte septentrional. A medida que aumenta la profundidad, aumentan

los valores de densidad, y el intervalo va disminuyendo; por ejemplo, mientras que a los 10 m de profundidad la densidad oscila entre $1\ 026\ \text{kg/m}^3$ y $1\ 027.8\ \text{kg/m}^3$, a los 30 m de profundidad se dan valores entre $1\ 027.3\ \text{kg/m}^3$ y $1\ 027.8\ \text{kg/m}^3$ (Fig. 4d).

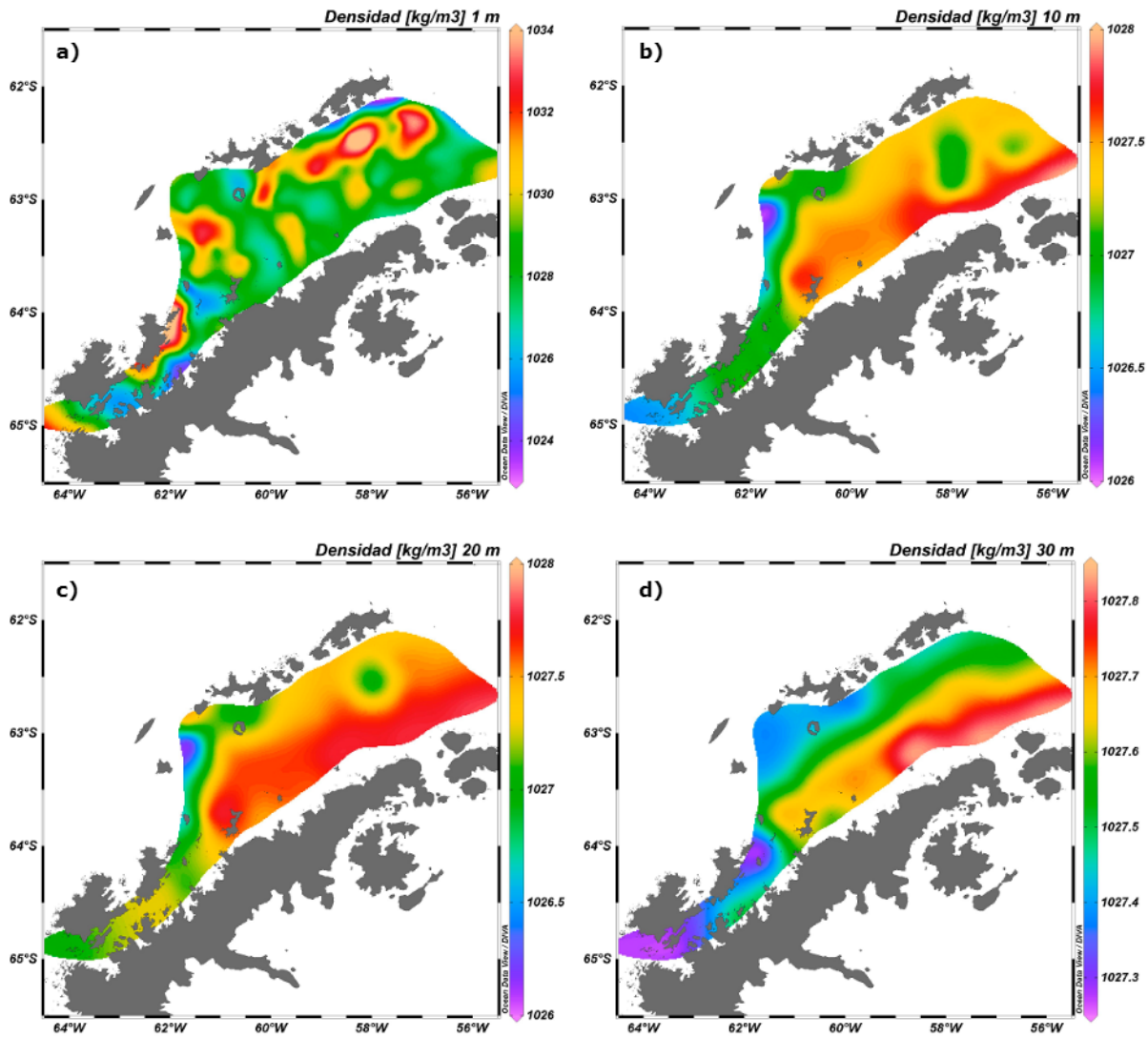


Figura 4. Distribución de la variable densidad en el área de estudio en las profundidades 1 m (a), 10 m (b), 20 m (c) y 30 m (d).

Un comportamiento similar se puede observar en la Figura 5, la cual corresponde a la distribución de la densidad en las profundidades de 50 m, 75 m, 100 m y 125 m, en las cuales se aprecia

que la densidad presenta valores mayores en la parte sur del área de estudio y menores en la parte norte.

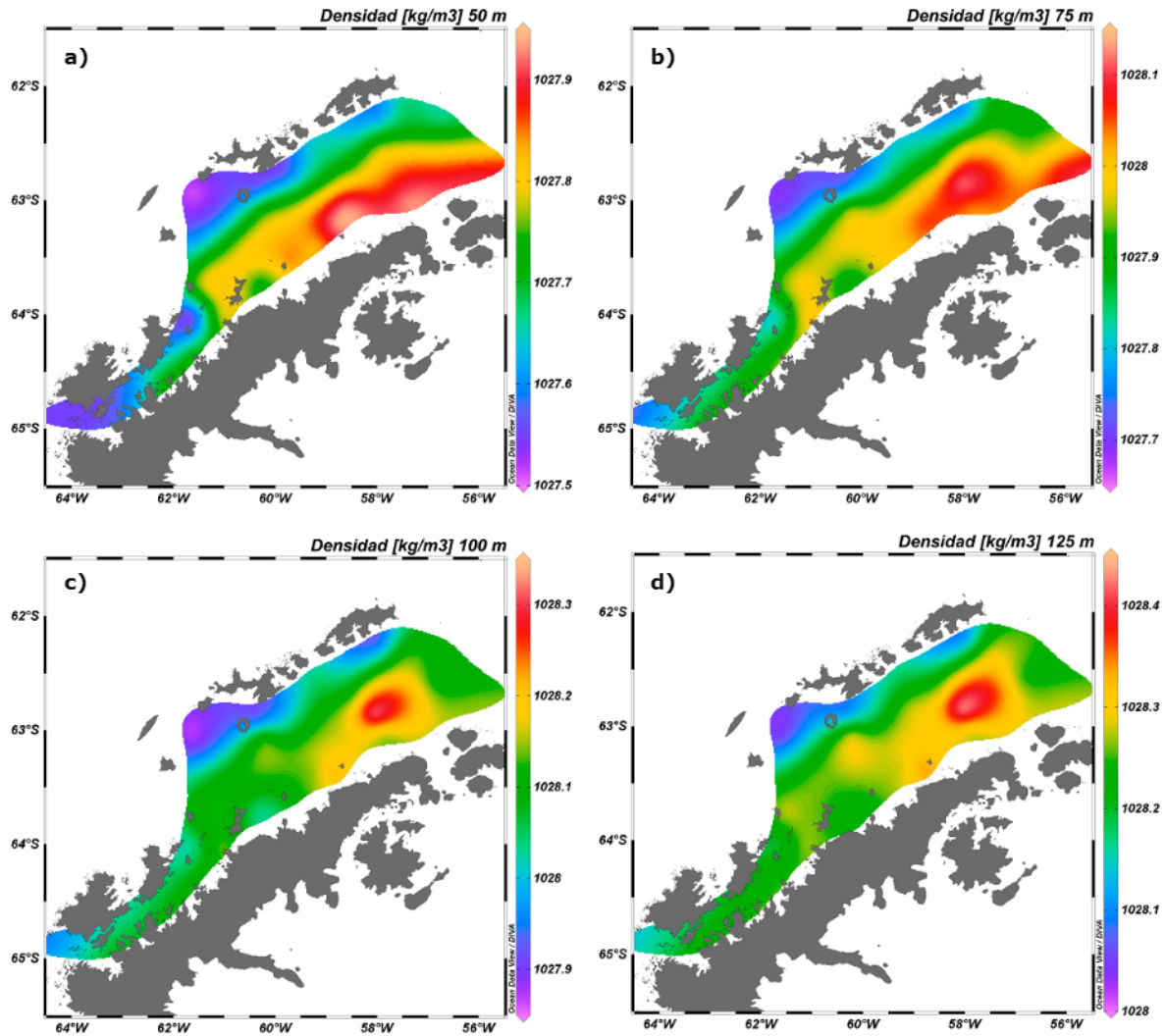


Figura 5. Distribución de la variable densidad en el área de estudio en las profundidades 50 m (a), 75 m (b), 100 m (c) y 125 m (d).

A medida que aumenta la profundidad, aumentan los valores de la densidad y su intervalo se mantiene; por ejemplo, en la gráfica de los 50 m (Fig. 5a) la densidad oscila entre $1\,027.5\text{ kg/m}^3$ y $1\,027.9\text{ kg/m}^3$, y en los 125 m se presentan valores entre $1\,028\text{ kg/m}^3$ y $1\,028.4\text{ kg/m}^3$ (Fig. 5b). Adicionalmente, en las profundidades correspondientes a 100 m y 125 m se aprecia un núcleo de alta densidad bien definido al sur de la

isla Rey Jorge, con valores de $1\,028.3\text{ kg/m}^3$ y $1\,028.4$, respectivamente (figuras 5c y 5d).

En la Fig. 6 se aprecia el comportamiento de la densidad para las profundidades de 150 m, 200 m, 300 m y 400 m; se evidencian valores altos de densidad en la parte meridional del estrecho y en la parte septentrional valores bajos. A medida que aumenta la profundidad, aumentan los valores de

la densidad, y el intervalo va disminuyendo; por ejemplo, a los 150 m (Fig. 6a) la densidad oscila entre 1 028.2 kg/m³ y 1 028.5 kg/m³; y a los 400 m, entre 1 029.6 kg/m³ y 1 029.75 kg/m³ (Fig. 6d).

Asimismo, las gráficas correspondientes a la distribución horizontal de la densidad en el área de estudio de los 150 m y 200 m (figuras 6a y 6b) muestran que el núcleo de alta densidad al sur de la isla Rey Jorge ya no es tan bien definido y empieza a tener mayor influencia en el área de

estudio, con una densidad de 1 028.5 kg/m³ y 1 028.75 kg/m³, respectivamente.

En la gráfica de los 300 m (Fig. 6c) se evidencia menor presencia de las aguas del mar de Weddell, las cuales ingresan por el noreste y circulan hacia el suroeste del estrecho de Bransfield. En la gráfica correspondiente a los 400 m (Fig. 6d) se presentan los mayores valores de densidad de todas las profundidades, los cuales oscilan entre 1 029.6 kg/m³ y 1 029.75 kg/m³, pero con el menor intervalo (0.15 kg/m³).

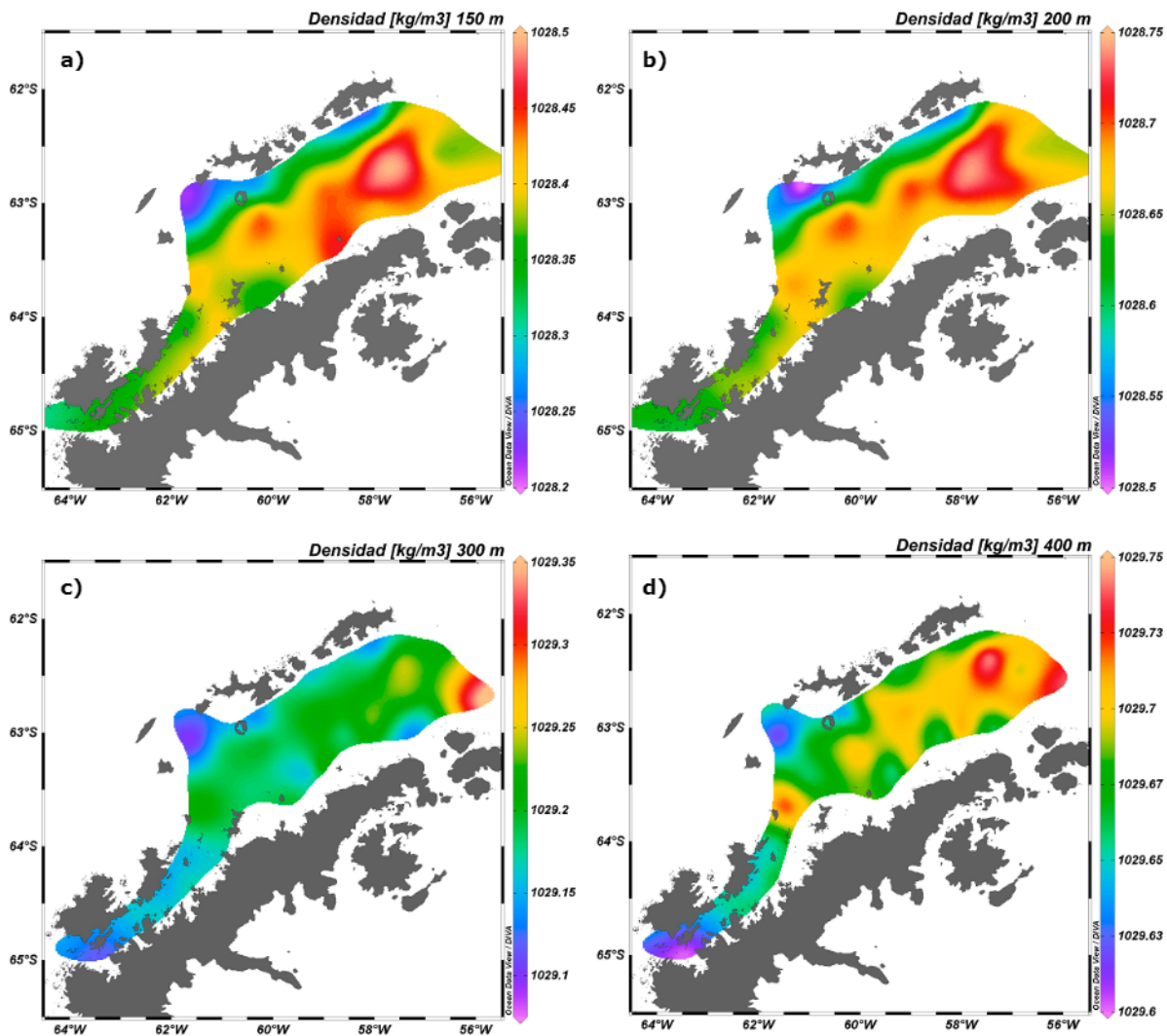


Figura 6. Distribución de la variable densidad en el área de estudio en las profundidades 150 m (a), 200 m (b), 300 m (c) y 400 m (d).

Finalmente, se identificó que a partir de los 10 m de profundidad (Fig. 4a), la densidad en el estrecho de Gerlache aumenta a medida que crece la presión; sin embargo, los valores de densidad son menores con respecto a los valores que se muestran en la distribución de ese parámetro en el resto del área de estudio.

DISCUSIÓN

A partir del análisis de las distintas capas de profundidad (figuras 4, 5 y 6), se determinó que la mayor variación e intervalo de la densidad se da en la superficie (Fig. 4a). Según Torres *et al.*, 2020, esto se debe a las interacciones entre el aire atmosférico, océano y hielo en la región; adicionalmente, el AASW es el agua más común en la capa superficial de la península Antártica, con una amplia gama de temperaturas y salinidades.

En general, en todas las gráficas se aprecian dos cuerpos de agua, uno de mayor y otro de menor densidad. Lo anterior fue observado por Sangrá *et al.* (2011), quienes identificaron dos flujos de agua con características diferentes: uno influenciado por el mar de Bellingshausen el cual fluye desde el oeste del estrecho, de agua cálida, fresca y menos densa; y otro influenciado por el mar de Weddell, el cual fluye desde el este, de agua fría, salada y densa.

Por otra parte, a partir de los 30 m (Fig. 4d) se observa que la densidad empieza a aumentar a medida que crece la profundidad. En contraste, Rodrigo, Varas-Gómez, Grisales, Quintana-

Saavedra y Molares (2021) mencionaron que la variable densidad inicia el aumento gradual a partir de los 40 m de profundidad; la diferencia de 10 m no parece significativa.

En las figuras 4, 5 y 6 la densidad presenta un comportamiento similar al de la salinidad; de acuerdo con Curry y Webster (1999), en los polos la salinidad es más importante que la temperatura en la regulación de la densidad; por lo tanto, cualquier perfil en la superficie será menos cambiante que en latitudes medias o bajas. Igualmente, Reyna *et al.* (2013) mencionaron que en regiones donde la temperatura es muy baja como en las regiones polares, los cambios de densidad se deben en razón a las variaciones en la salinidad; mencionada densidad aumenta cuando los valores de su salinidad son mayores o cuando disminuye la temperatura.

En las gráficas correspondientes a 100 m y 125 m (figuras 5c y 5d) y 150 m y 200 m de profundidad (figuras 6a y 6b) se aprecia un núcleo de alta densidad al sur de la isla Rey Jorge. Estos núcleos de densidad están relacionados con aguas más frías y más saladas del mar de Weddell, demostrando que la mayor densidad del área de estudio se da en la península Antártica (Vásquez y Tenorio, 2016). Igualmente, en los resultados de salinidad a los 125 m de Lara y Jiménez (2019) se aprecia un núcleo de sal al sur de la isla Rey Jorge, así como una menor temperatura en la misma área (Fig. 7), demostrando una relación directa con los núcleos de alta densidad que se aprecian en las gráficas de densidad mencionadas.

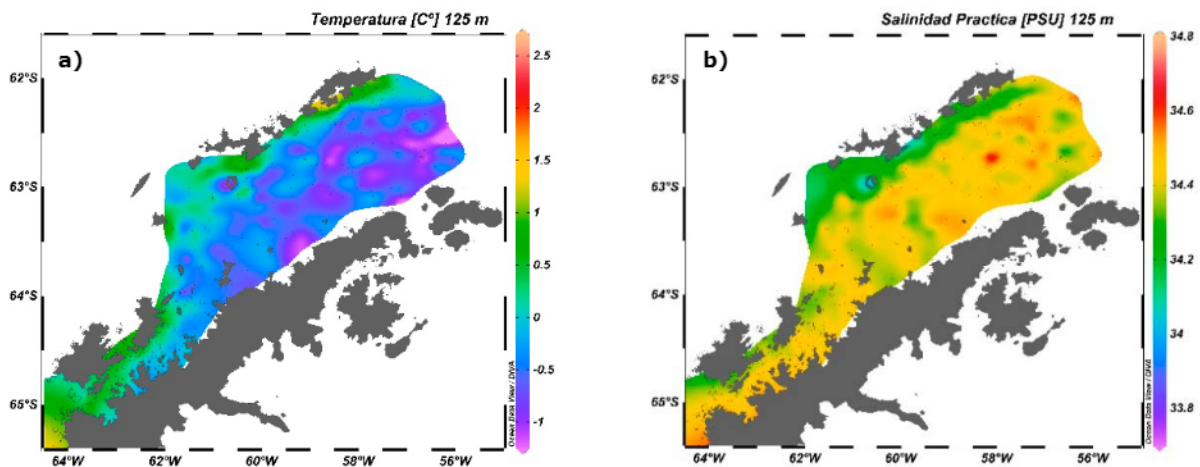


Figura 7. Distribución horizontal de la variable temperatura (a) y salinidad (b) en los estrechos de Bransfield y Gerlache, a los 125 m de profundidad. (Fuente: Lara y Jiménez, 2019).

Sin embargo, en la Fig. 6c, correspondiente a la distribución horizontal de la densidad en el área de estudio a los 300 m, es cuando menos tienen influencia las aguas del mar de Weddell. García *et al.* (2002) afirmaron que pueden presentarse limitadas intrusioniones de CDW desde el oeste del estrecho de Gerlache, entre los 250 m y 450 m de profundidad; es decir, hay un mayor predominio de la TBW. No obstante, en la gráfica correspondiente a los 400 m (Fig. 6d) se evidencia nuevamente una mayor influencia de aguas del mar de Weddell en el estrecho de Bransfield; es decir, valores altos de densidad, lo cual indica aguas frías y de mayor salinidad. Esto se relaciona con lo descrito por García *et al.* (2002), donde se menciona que el Agua de Fondo Antártica es aportada por el mar de Weddell.

En el estrecho de Gerlache se apreció que las densidades para cada profundidad estándar, en

general, fueron valores menores comparados con los demás obtenidos en el estrecho de Bransfield. Según García *et al.* (2002), las TBW en el estrecho de Gerlache son más frías y menos salinas que en el estrecho de Bransfield, debido a los aportes de agua dulce de los glaciares locales.

Al superponer la gráfica de la distribución horizontal de la densidad en el área de estudio, con la gráfica de la dinámica del estrecho de las corrientes del estrecho de Bransfield, determinada por Sangrá *et al.* (2011) (Fig. 8), se observa que existe una asociación entre los cuerpos de agua con diferentes densidades y los flujos de agua con características diferentes: uno influenciado por el mar de Bellingshausen, el cual fluye desde el oeste del estrecho; y otro influenciado por el mar de Weddell, el cual fluye desde el este (Sangrá *et al.*, 2011).

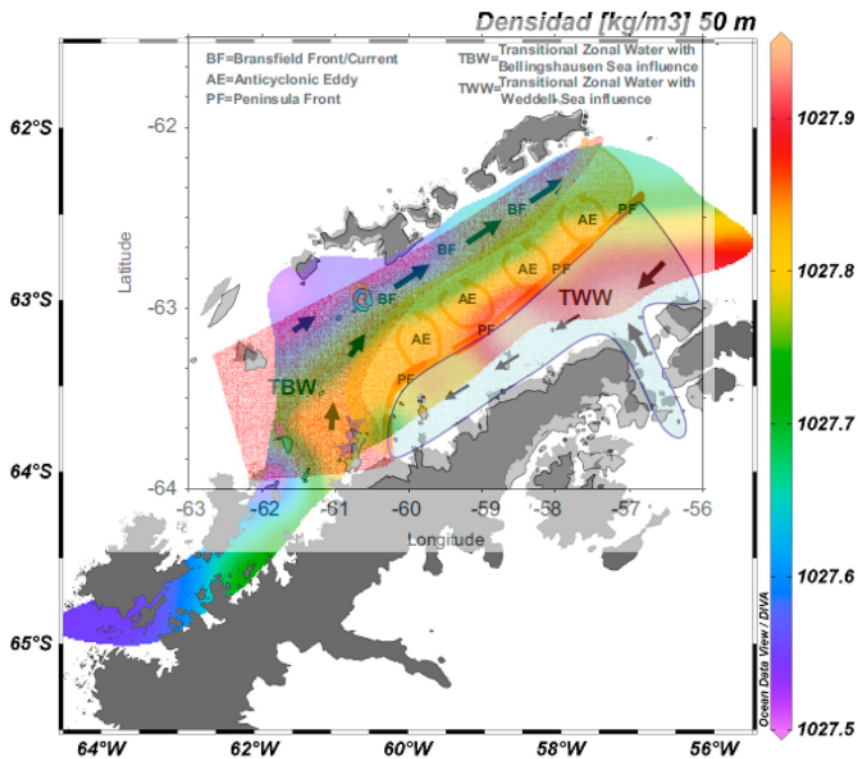


Figura 8. Distribución horizontal de la variable temperatura y salinidad en los estrechos de Bransfield y Gerlache, a los 50 m de profundidad, superponiendo la imagen de la dinámica del área de estudio propuesta por Sangrá *et al.* (2011).

Adicionalmente, entre el Frente de Bransfield (flujo parte septentrional estrecho) y el frente de la Península (flujo parte meridional estrecho), según Sangrá *et al.* (2011), se observó un sistema de remolinos anticiclónicos con características de TBW, el cual se extiende desde la superficie hasta los 400 m de profundidad, y tiene un radio de unos 10 km, aproximadamente. Esta señal de eddy, que llega hasta la profundidad, se aprecia en las gráficas de la distribución de densidad desde los 30 m hasta los 200 m como una línea color verde a lo largo del área de estudio que separa las TBW y las TWW.

CONCLUSIONES

Se generaron doce gráficas correspondientes al promedio del verano austral de la variable densidad a diferentes profundidades estándar entre 1 m y 400 m. En general, el comportamiento de la densidad es similar al de la salinidad para cada profundidad estándar, teniendo en cuenta que en los polos esta variable tiene mayor influencia sobre la densidad y no la temperatura como sí ocurre en otras latitudes.

El análisis por capas a diferentes profundidades permitió identificar cuerpos con diferentes valores de densidad, que corresponden a las masas de agua descritas por García *et al.* (2002), cuyas propiedades están controladas por las características de los flujos de entrada adyacentes: un flujo más cálido, menos salino y de menor densidad del mar de Bellingshausen; y otro flujo frío, de mayor salinidad y densidad correspondiente al mar de Weddell. El primero ingresa al área de estudio por el sur y el segundo ingresa por el noreste, respectivamente. La densidad responde más a la salinidad que a la temperatura en este caso.

Al igual que en el estrecho de Bransfield, en el estrecho de Gerlache el comportamiento de la densidad presentó mayor oscilación en la superficie, evidenciando valores entre 1 025 kg/m³ y 1 033 kg/m³, aproximadamente; a partir de los 10 m de profundidad la densidad aumenta progresivamente a medida que aumenta la profundidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, C.; Rangel, O.; Herrera, E. (2015). *Atlas de los Datos Oceanográficos de*

Colombia 1922-2013. Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geostrofica. Bogotá, Colombia. Ed.: Dimar. <https://doi.org/10.26640/22159045.275>

Comisión Colombiana del Océano. (2014a). *Agenda Científica Antártica de Colombia 2014 - 2035.* Bogotá: Entrelibros E-Book Solutions.

Comisión Colombiana del Océano. (2014b). *Programa Antártico Colombiano.* Bogotá: Sandra Nossa.

Comisión Colombiana del Océano. (2018). *Política Nacional del Océano y de los Espacios Costeros (Pnoec).* CCO. Bogotá D.C..

Crespo, C. (5 de noviembre de 2020). *La Península Antártica registra la temperatura más alta de su historia.* Recuperado de: National Geographic: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2020/02/la-peninsula-antartica-registra-la-temperatura-mas-alta-de-su-historia>

Curry, J.; Webster, P. (1999). *Thermodynamics of Atmospheres & Oceans* (Vol. 65). Colorado, USA: International Geophysics Series. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(99\)80021-7](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(99)80021-7) / [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(99\)80020-5](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(99)80020-5)

García, M.; López, O.; Sospedra, J.; Espino, M.; Gracia, V.; Morrison, G.; ... & Arcilla, A. S. (1994). Mesoscale variability in the Bransfield Strait region (Antarctica) during Austral summer. *Annales Geophysicae* 12, 9, 856-867. <https://doi.org/10.1007/s00585-994-0856-z>

García, M.; Castro, C.; Ríos, A.; Doval, M.; Rosón, G.; Gomis, D.; López, O. (2002). Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep-Sea Research II*, 49, 585-602. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8)

García, H.; Boyer, T.; Locarnini, R.; Batanova, O.; Zweng, M. (2018). *World Ocean Database 2018 - Manual del Usuario.* Maryland: NOAA. Recuperado de: <https://www.NCEI.noaa.gov/OC5/indprod.html>

Hogg, A. E.; Shepherd, A.; Cornford, S. L.; Briggs, K. H.; Gourmelen, N.; Graham, J. A.;

- ... & Wuite, J. (2017). Increased ice flow in Western Palmer Land linked to ocean melting. *Geophysical Research Letters*, 44(9), 4159-4167. <https://doi.org/10.1002/2016GL072110>
- Lara, C.; Jiménez, J. (2019). *Atlas de Datos Oceanográficos para el Verano Austral de los Estrechos de Gerlache y Bransfield 1979-2019*. Tesis, Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena de Indias.
- McDougall, T.; Barker, P. (2011). *Getting Started with TEOS-10 and the Gibbs Seawater (GSW) Oceanographic Toolbox*. Recuperado de: <http://mailman.cgd.ucar.edu/pipermail/cf-metadata/attachments/20110722/bd73861c/attachment.pdf>
- Ocean Data View. (2021). *Latest ODV Version: ODV 5.4.0 (Mar 01, 2021)*. Recuperado de: <https://odv.awi.de/>
- Reyna, J.; Morales, A.; Cantera, J.; Ángel, E.; Vernaza, E.; Lozano, J., . . . Pardo, Z. (2013). *El Océano Maravilla Terrestre*. Comisión Colombiana del Océano. Bogotá D.C.
- Rodrigo, C.; Varas-Gómez, A.; Grisales, C.; Quintana-Saavedra, D.; Molaes, R. (2021). Flujos de sedimento glaciomarino en pequeñas bahías de la costa de Danco, península Antártica. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50, 149-168. <https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.SuplEsp.950>
- Romero, C.; Marriaga, L., Torres, R. (2007). Metodología para la calificación y control de calidad de datos oceanográficos aplicada al Crucero Caribe 2002. *Bol. Cient. CIOH* 25: 78-93. <https://doi.org/10.26640/22159045.165>
- Sánchez, J. (2018). *Una herramienta para la estimación de concentración de nitrógeno a partir de imágenes Sentinel*. Recuperado de http://oa.upm.es/51598/1/TFG_JAVIER_BALANZATEGUI_SANCHEZ.pdf
- Sangrá, P.; Gordo, C.; Hernández, M.; Marrero, A.; Rodríguez, A.; Stegner, A., . . . Pichon, T. (2011). The Bransfield Current System. Deep Sea Research Part I. *Oceanographic Research Papers*, 58(4), 390-402. <https://doi.org/10.1016/i.dsr.2011.01.011>
- Santamaría-del-Angel, E.; Frasset, S.; González-Silvera, A.; Aguilar-Maldonado, J.; Mercado-Santana, A.; Herrera-Carmona, J. C. (2019). Uso potencial de las anomalías estandarizadas en la interpretación de fenómenos oceanográficos globales a escalas locales. En: E. Rivera-Arriaga, P. Sánchez-Gil, y J. Gutiérrez. *Tópicos de agenda para la sostenibilidad de costas y mares mexicanos* (pp. 193-212). Universidad Autónoma de Campeche. doi:10.26359/epomex.051910.26359/epomex.05192
- Torres, R.; Caicedo, A.; Iriarte, J. (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, 161, 103278. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103278>
- Troupin, C.; Barth, A.; Sirjacobs, D.; Ouberdous, M.; Brankart, J.; Brasseur, P.; . . . Beckers, J. (20 de Junio de 2012). *Generation of Analysis and Consistent error fields using the Data Interpolating Variational Analysis (DIVA)*. Recuperado de: <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/125731/1/DIVA2012OM.pdf>
- Vásquez, L.; Tenorio, J. (2016). Oceanografía física y observación de las condiciones ambientales del estrecho de Bransfield y alrededores de la isla Elefante. *Boletín Instituto del Mar del Perú*, 31(2), 153-160. <http://biblioimarpe.imarpe.gob.pe/handle/123456789/3092>
- Zhou, M.; Niiler, P.; Hu, J. (2002). *Surface Currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica*. Deep Sea Research Part I. Pergamon. Recuperado de: [https://doi.org/10.1016/S09670637\(01\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S09670637(01)00062-0)