

CLIMATOLOGÍA DE LA TEMPERATURA Y SALINIDAD DEL ESTRECHO DE GERLACHE, PENÍNSULA ANTÁRTICA

TEMPERATURE AND SALINITY CLIMATOLOGY OF THE GERLACHE STRAIT, ANTARCTIC PENINSULA

Julián Alberto Delgadillo Marín¹, Nancy Liliana Villegas Bolaños² (Directora)



- 1- Asuntos Antárticos, Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá., Colombia. 02/09/2021. E-mail: jadelgadillom@unal.edu.co
- 2- Grupo de Investigación en Oceanología CENIT. Departamento de Geociencias, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá., Colombia.

Resumen

Se estudia la climatología de la temperatura y salinidad en el estrecho de Gerlache, península Antártica, mediante un enfoque que no ha sido abordado en la literatura usando datos del World Ocean Atlas (WOA18) para el período 1981-2010. Se presenta el comportamiento climatológico de la temperatura superficial del mar y salinidad superficial del mar, asimismo, la profundidad y grosor de las principales capas de la columna de agua, se determina la estabilidad termohalina, y estructura fina en un transecto longitudinal del estrecho de Gerlache. Se identifican las temperaturas superficiales máximas en febrero y las salinidades superficiales máximas en septiembre. Los valores mínimos de temperatura superficial se presentan en julio y de la salinidad superficial en marzo. La termoclinia registra su máximo grosor durante el verano, en febrero y un espesor mínimo o inexistente durante el invierno, en julio. El máximo grosor de la haloclinia se aprecia en el otoño, en abril y mínimo espesor durante la primavera, en septiembre. Se propone que la estructura termohalina de la columna de agua es estable de 0 a 300 m, e indiferente por debajo de los 300 m. La caracterización de la estructura fina muestra que las capas por encima de los 60 m presentan estabilidad total o absoluta (*EA*), por debajo de los 60 m la estratificación por tipo de convección por capa (*CC*) prevalece.

Palabras clave: Climatología, Estrecho de Gerlache, Termoclinia, Haloclinia, Estabilidad Termohalina, Estructura Fina.

Abstract

The temperature and salinity climatology in the Gerlache Strait, Antarctic Peninsula, is studied through an approach that has not been addressed in the literature before using the World Ocean Atlas (WOA18) data for the period 1981-2010. The climatological behavior of the sea surface temperature and sea surface salinity is presented, as well as the depth and thickness of the main layers of the water column, the thermohaline stability, and fine structure determined in a longitudinal transect of the Gerlache Strait. Maximum surface temperatures in February and maximum surface salinities in September are identified. The minimum values of surface temperature are presented in July and of surface salinity in March. The thermocline has its maximum thickness during the summer, in February and a minimum or non-existent thickness during the winter, in July. Regarding the halocline, it presents its maximum thickness during the fall, in April and a minimum thickness during the spring, in September. It is proposed that the thermohaline structure of the water column is stable from 0 to 300 m, and indifferent below 300 m. The characterization of the fine structure shows that the layers above 60 m present total or absolute stability (*AS*), below 60 m the stratification by type of convection per layer (*CL*) prevails.

Keywords: Climatology, Gerlache Strait, Thermocline, Halocline, Thermohaline Stability, Fine Structure

1. Introducción

En la región de estudio se han realizado investigaciones de diversos tipos. Desde el punto de vista de la hidroquímica y productividad biológica, mediante muestreos en la columna de agua y equipos perfiladores de Conductividad, Temperatura, y Profundidad (**CTD**, por sus siglas en inglés) Massana et al. (1998) en la primavera temprana de 1995 y 1996 determinan la distribución de arqueas planctónicas marinas y el ambiente en el que viven apoyados de registros de las propiedades físicas en la columna de agua. Similarmente, Rodríguez et al. (2002) investigan la estructura y composición funcional del fitoplancton antártico a través de una combinación de técnicas de citometría de flujo y análisis de imágenes en dos transectos realizados en 1995. Durante la expedición FRUELA-95 (del 10 al 18 de diciembre de 1995) en los estrechos de Bransfield y Gerlache, a partir de muestras de agua recolectadas con **CTD** Mark III, Doval et al. (2002) estudian perfiles de carbono inorgánico disuelto en la columna de agua. Posteriormente, como parte de la expedición FRUELA-96 durante enero y febrero de 1996, a partir de seis núcleos de sedimentos colectados a lo largo del estrecho de Gerlache desde la isla de Anvers hasta Crocker, Isla et al. (2002) evalúan en una zona de alta productividad la distribución espacial de sedimentos recientes, carbono orgánico por enterramiento y tasas de acumulación de nitrógeno en el sedimento. Dos años después, en un estudio similar con once núcleos de sedimentos recuperados del mar de Bellingshausen, oeste del estrecho de Bransfield y estrecho de Gerlache, Isla et al. (2004) determinan la distribución espacial de carbono orgánico, sílice biogénica y nitrógeno en el sedimento. Asimismo, Kerr et al. (2018) a partir de mediciones hidrográficas de la columna de agua durante la expedición del crucero NAUTILUS I en febrero de 2015 describen patrones espaciales de los flujos de dióxido de carbono aire-mar y los relacionan con parámetros fisicoquímicos.

También se han llevado a cabo estudios de carácter hidrográfico. A partir de cuatro series de **CTD** en expediciones de noviembre de 1990 Amos et al. (1990) analizan los mecanismos físicos que explican la productividad de las aguas superiores del estrecho de Gerlache e identifican un perfil general de la Temperatura (T) y Salinidad (S) de la columna de agua. A una escala más regional, con observaciones

hidrográficas en mayo de 1993, Smith et al. (1999) estudian la estructura de las masas de agua y la circulación al Oeste de la Península Antártica (**OPA**). En expediciones oceanográficas de diciembre 1995 y enero 1996, García et al. (2002) revisan la estructura de la columna de agua, masas de agua presentes y sus propiedades fisicoquímicas. En otros estudios dirigidos a precisar las corrientes, por medio de boyas desplegadas en noviembre de 1998 a enero de 1999, Zhou et al. (2002) estudian las características del flujo de las corrientes superficiales en los estrechos de Bransfield y Gerlache, y determinan la existencia de las corrientes de los estrechos de Gerlache y de Bransfield. Luego, Savidge & Amft (2009) examinan la circulación del **OPA** a partir de datos de velocidad recolectados en los trayectos de los barcos R/V Gould y el R/V Palmer por perfiladores de corriente Doppler acústicos. Mediante datos recopilados por vehículos submarinos autónomos durante el verano austral de 2010, 2011, 2012 y 2013, Schofield et al. (2017) caracterizan la distribución espacial de la Upper Circumpolar Deep Water (**UCDW**) en la plataforma continental de la **OPA**. En cuanto a estudios de carácter hidrográfico a nivel regional de la **OPA**, Henley et al. (2019) resumen el estado actual de conocimiento sobre procesos físicos, biogeoquímicos y biológicos en funcionamiento y las formas en que el entorno de la plataforma está cambiando, señalan también prioridades interdisciplinarias generales para investigación futura en la región. En estudios más recientes Torres et al. (2020) describen la hidrografía de los estrechos de Bismarck y Gerlache con base en datos recopilados en dos expediciones colombianas durante el verano austral del 2015 y 2017.

Por otro lado, acerca de variaciones oceanográficas y atmosféricas, Meredith & King. (2005) estudian la presencia de un rápido cambio en el clima del **OPA** a partir de datos de propiedades oceánicas que abarcan la segunda mitad del siglo XX. Más adelante, mediante observaciones y reanálisis del período 1951-2004, Marshall et al. (2006) demuestran que el cambiante Modo Anular del Sur (**SAM**, por sus siglas en inglés) juega un papel significativo en el aumento de las temperaturas superficiales del verano de la península Antártica. Como parte de estudios climatológicos, Stammerjohn et al. (2008) utilizan datos de hielo marino derivados de satélites para rastrear espacialmente el avance y retroceso anual del borde o frente de hielo desde 1974 hasta 2004. En

estudios más recientes, por medio de datos de Temperatura Superficial del Mar (*TSM*) y la Cobertura del Hielo Mariano (*CHM*), Doddridge & Marshall (2017) investigan el impacto del viento relacionado con **SAM** en la extensión del hielo marino alrededor de la península Antártica. Hernández et al. (2021) con datos de reanálisis ERA5, describen la variabilidad de las condiciones meteo-marinas del período 1979-2018 en aguas superficiales cercanas al archipiélago de Palmer, ubicado en el estrecho de Gerlache, identificando cambios en la Temperatura del aire (*T_a*), *TSM* y *CHM*.

Según lo expuesto, estudios previos se han centrado en la recolección, descripción y análisis de datos *in situ* de parámetros físicos, químicos y biológicos durante expediciones oceanográficas en el estrecho de Gerlache, o al análisis de aguas superficiales con datos de reanálisis. Por ende, hasta la fecha, no se encuentran estudios que empleen datos del World Ocean Atlas versión 2018 (**WOA18**) para analizar el comportamiento climatológico de la *T* y *S*, determinando características del perfil vertical, la estabilidad termohalina y la estructura fina de la columna de agua del estrecho de Gerlache.

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (**OMM**, 2021) en la medida de lo posible se debe utilizar el período climatológico estándar normal 1981-2010 como período base para el reporte consistente de mediciones de superficie, datos satelitales y reanálisis. En el presente documento, se describe y estudia el comportamiento climatológico anual de la *T* y *S* del período 1981-2010. Con este fin, se determinan características de los perfiles verticales de los dos parámetros oceanográficos, se identifican la profundidad y grosor de las capas quasi-homogénea, termoclina, haloclina, picnoclina y capa-inferior, y se analizan la estabilidad termohalina y estructura fina del estrecho de Gerlache.

Para el alcance del estudio, se utilizan datos climatológicos del reanálisis **WOA18** de las variables oceanográficas *T* y *S* en la columna de agua del estrecho de Gerlache. Se representa gráficamente la información, se identifican valores máximos y mínimos, amplitud y promedios climatológicos, se grafican perfiles verticales y transectos, se delimitan las capas que estratifican la columna de agua, se calcula y grafican la estabilidad termohalina y sus

componentes, y se identifican las capas que conforman la estructura fina.

Por lo anterior, el objetivo general de la presente investigación es analizar la climatología de la *T* y *S* del estrecho de Gerlache, península Antártica. Para lo cual, los objetivos específicos son:

- Determinar valores climatológicos máximos y mínimos de la *T* y *S* superficiales del mar en el período 1981-2010 extraídos del **WOA18** a lo largo del estrecho de Gerlache.
- Identificar la profundidad y grosor de las capas quasi-homogénea, termoclina, haloclina, picnoclina y capa-inferior de la columna de agua en el período 1981-2010 en estaciones seleccionadas a lo largo del estrecho de Gerlache.
- Analizar la estabilidad termohalina y la estructura fina de la columna de agua en el período 1981-2010 para estaciones seleccionadas a lo largo del estrecho de Gerlache.

2. Justificación

Como se menciona anteriormente, otros estudios han abordado el análisis de parámetros oceanográficos en la región principalmente a partir de la recolección de datos *in situ*, el presente estudio resalta la importancia de utilizar bases de datos de reanálisis oceanográfico como **WOA18** la cual compila información de diferentes expediciones oceanográficas en períodos que permiten obtener la climatología de una zona remota y de difícil acceso, como es el estrecho de Gerlache, península Antártica. Esto confirma que la realización del presente trabajo logrará contar con una investigación que aporta al estado actual del conocimiento y entendimiento sobre la columna de agua y las propiedades físicas y dinámicas, así como confrontar los resultados con estudios previos en la región y zonas adyacentes de la península Antártica.

El estudio propone como iniciativa empezar a utilizar en mayor medida la enorme cantidad de datos que han sido recopilados por diferentes medios a través de la National Oceanic and Atmospheric Administration (**NOAA**) y que son de libre acceso. Estudios como el presente, buscan ser una referencia sobre la posibilidad de abordar el análisis de datos climatológicos de regiones remotas no solo en la superficie, sino también en la columna de agua, llegando al detalle de su estructura fina. Los beneficiados serán principalmente estudiantes y

científicos interesados en las ciencias oceanográficas que pretendan hacer estudios similares en el futuro de otras regiones remotas del mundo, donde generalmente realizar expediciones es altamente costoso tanto en factor económico, como de tiempo.

Según la Agenda Científica de Colombia (**ACC**) 2014-2035, el interés de Colombia sobre la Antártica surge de procesos encaminados a la protección y conservación del continente blanco y de diversos factores que retribuyen beneficios al desarrollo marítimo, ambiental y económico del país, al igual que proporcionan otros escenarios para el fortalecimiento de la investigación científica nacional. Colombia se adhiere al Tratado Antártico en el año 1989 y, en 1990, se crea la Comisión Nacional de Asuntos Antárticos (**CNAA**). El tratado conviene que es de interés de toda la humanidad que la Antártida se utilice por las naciones adherentes únicamente con fines pacíficos, fundamentando que principios de cooperación científica internacional y libertad de investigación científica concuerdan con los intereses de la ciencia y el progreso de toda la humanidad. También se designa al continente blanco como área de conservación especial y otras medidas para proteger el medio ambiente antártico y sus ecosistemas dependientes y asociados.

Hacia el 2035 Colombia se ha propuesto establecer una estación permanente en la Antártica para poder realizar investigación a lo largo de todo el año. Con el fin de lograr el desarrollo de una estación permanente en un sitio aún desconocido, es importante tener un panorama sobre el comportamiento climatológico de la región, de la estructura de la columna de agua y de las características oceanográficas fundamentales. Un estudio de la estabilidad y estructura fina es de utilidad para conocer en mayor medida los procesos que ocurren en la columna de agua en las cercanías del sector en que se quiere posicionar la estación Antártica Colombiana.

Por lo mencionado anteriormente, el presente estudio se diferencia en su acercamiento a trabajos previos porque en él se analiza la climatología de la T y S haciendo énfasis en el perfil vertical, estudiando la estabilidad termohalina y determinando la estructura fina de las capas de la columna de agua, lo cual se realiza a partir de datos de reanálisis que representan objetivamente la compilación de muchos

años de expediciones oceanográficas realizadas en la región. Por medio de la revisión de la literatura se comprueba que un estudio como éste no se ha llevado a cabo, siendo el primero de su tipo en el estrecho de Gerlache.

3. Estrecho de Gerlache

([Zweng et al., 2019](#)) El estrecho de Gerlache es un pasaje entre 8 y 40 km de ancho, limitado al norte por las islas del archipiélago de Palmer y al sur por el margen oriental de la península Antártica. Según García et al. (2002), el límite oriental del estrecho se encuentra demarcado por la fosa de Palmer con profundidades entre los 500-1000 m, conectando con el estrecho de Bismarck. En su canal o parte central, la topografía del estrecho de Gerlache se caracteriza por profundidades menores a los 500 m. Al este, limita con el estrecho de Bransfield, en donde la batimetría se profundiza hasta alcanzar profundidades mayores a los 1000 m.

Se extiende unos 180 km desde las islas Hoseason y Trinity en el norte hasta las islas Wiencke y Anvers, colindando con el estrecho de Bismarck en el sur, la isla Brabante se encuentra en el margen norte de la región central del estrecho, varias islas de pequeño tamaño se encuentran presentes dentro del estrecho. El pasaje de Crocker en el extremo noreste del estrecho es el acceso más profundo, con más de 1000 m de profundidad (Isla et al., 2002).

En cuanto a la circulación general, existe una corriente superficial persistente en medio del estrecho de unos 10-18 cm/s que varía estacionalmente, un patrón de flujo que transporta agua hacia el noreste conectando con la corriente de Bransfield ([Zhou et al., 2002](#)). Respecto a la biomasa y productividad en el estrecho de Gerlache, los valores son muy altos y mayores tanto en las bahías como en el centro del estrecho en comparación con regiones circundantes como el estrecho de Bransfield durante el verano austral ([Burkholder & Sieburth, 1961](#)).

Desde el 2005, [Meredith & King, \(2005\)](#) reconocen que el clima alrededor de la península Antártica está evolucionando a tasas considerablemente rápidas, con un aumento de aproximadamente 3 °C de las temperaturas atmosféricas medias anuales desde 1951 y sus impactos asociados en la criósfera, dicho

aumento ocurriendo predominantemente durante el otoño e invierno austral, siendo la región que más rápidamente se ha visto afectada en el hemisferio sur. Varios procesos en la región de la península Antártica están generando en la actualidad ciclos de retroalimentación generalizados del clima, entre ellos: el aumento de las temperaturas en la atmósfera y mares adyacentes (Steig et al., 2009), reducción en la extensión del hielo marino en el sector del mar de Bellingshausen y aumento principalmente en el mar de Ross y en menor medida en el mar de Weddell (Parkinson & Cavalieri, 2012), aumento del agua por deshielo como resultado de derretimiento de glaciares locales y colapso de las plataformas de hielo al este de la península Antártica, refrescamiento y aligeramiento de aguas profundas (Azaneu et al., 2013; Pritchard et al., 2012). Dichos procesos enfatizan que la península Antártica y sus alrededores son actualmente una de las regiones donde es más probable que cambios climáticos globales sean identificados con mayor rapidez y notoriedad (Ducklow et al., 2013).

4. Metodología

4.1. Área de Estudio y Datos Utilizados

El estrecho de Gerlache se localiza dentro de la cuadrícula 61°W, 64°S y 64°W, 65°S (Fig. 1). En la región de estudio se designan un total de 12 estaciones enumeradas desde G1 hasta G12, para las cuales se encuentran disponibles datos climatológicos de T y S en la columna de agua para el período 1981-2010. La estación G1 se localiza finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando Gerlache; la estación G2 se ubica entre la bahía de Andvord y la isla de Anvers en la parte central oeste del estrecho; las estaciones G3, G4 y G5 se encuentran paralelas entre la bahía de Charlotte y la isla de Brabante en la parte central este del estrecho; las estaciones G6, G7, G8 y G9 se encuentran en la entrada norte del estrecho paralelas a la isla Mogotes; por último, las estaciones G10, G11 y G12 se ubican entre las islas Hoseason y Trinity finalizando el estrecho de Gerlache e iniciando el estrecho de Bransfield. La latitud y longitud de las estaciones se consignan en la (Tabla. 1) en sistema de coordenadas geográficas Universal Transverse Mercator (**UTM**).

Los datos de T (°C) y S se obtienen del **WOA18** (Locarnini et al., 2018; Zweng et al., 2018). El

WOA18 es el último producto de una línea de análisis oceanográficos para variables subsuperficiales del océano a profundidades estándar, que consiste en una colección de datos objetivamente analizados, y con controles de calidad, para la T , S , oxígeno, fosfato, silicato, y nitrato en perfiles de profundidad. Para cada variable oceanográfica se extrajeron 1 archivo anual y 12 mensuales, como valor objetivamente analizado para la columna de agua con resolución de $\frac{1}{4}^{\circ}$, del período 1981-2010.

La información de las doce estaciones se tuvo en cuenta en la revisión general de las propiedades de la columna de agua. A partir de esta revisión, se seleccionaron cinco estaciones principales (G1, G2, G4, G8 y G12) distribuidas longitudinalmente a lo largo del estrecho de Gerlache, las cuales se utilizan para presentar los transeptos de estudio, cubriendo cuatro zonas en las que fue subdividida el área de estudio: la zona suroeste (G1), central oeste (G2), zona central este (G4) y zona noreste (G8 y G12), para presentar los resultados de la investigación. Por lo tanto, en el análisis superficial se utilizaron todas las estaciones, y en el análisis de la columna de agua, se utilizaron las estaciones seleccionadas por zonas.

Fig. 1. Ubicación y batimetría del estrecho de Gerlache y mares adyacentes, los puntos rojos representan la localización de las estaciones (G1 - G12) de las cuales fueron extraídos datos de T y S de la columna de agua.

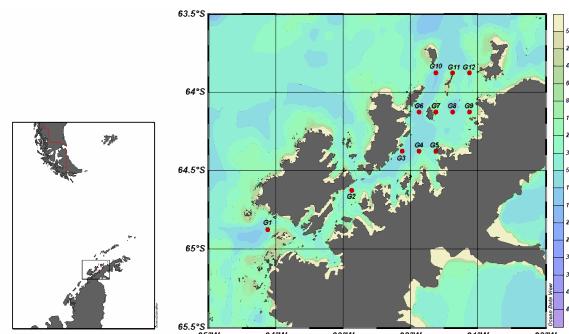


Tabla 1. Coordenadas de latitud y longitud en UTM para las estaciones (G1-G12) en la región de estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Estación	Latitud	Longitud
G1	-64.875	-64.125	G7	-64.125	-61.625
G2	-64.625	-62.875	G8	-64.125	-61.375
G3	-64.375	-62.125	G9	-64.125	-61.125
G4	-64.375	-61.875	G10	-63.875	-61.625
G5	-64.375	-61.625	G11	-63.875	-61.375
G6	-64.125	-61.875	G12	-63.875	-61.125

La revisión general mostró que algunos meses presentan máximos y mínimos de *TSM* y Salinidad Superficial del Mar (*SSM*). Por lo tanto, para visualizar los principales cambios en superficie de forma espacial y temporal de la *TSM* se muestran los meses de febrero, abril, junio, agosto, octubre y diciembre; y de la *SSM* los meses de septiembre, noviembre, enero, marzo, mayo y julio.

En cuanto a la columna de agua, para presentar los resultados de las capas y análisis vertical de la *T* y *S* se muestran tablas de las estaciones del año del meridiano austral: verano (DEF), otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SON).

4.2. Software Utilizado

El tratamiento y análisis de datos se realiza con el software Ocean Data View (**ODV**), el cual se encuentra disponible de forma gratuita para el público, estudiantes e instituciones académicas (Schlitzer 2016). Mediante **ODV** se construyen mapas en superficie para la climatología anual multianual de *T* y *S*, y se grafican perfiles de *T*, *S* y densidad (ρ , kg/m^3) versus la profundidad (*Z*, m). Además, se grafican perfiles de la estabilidad termohalina obtenida con el criterio de Hesselberg-Svendrup (E , kg/m^4) y los componentes de estabilidad salina (E_s , kg/m^4) y estabilidad térmica (E_t , kg/m^4). También se grafican perfiles de la Frecuencia de Vaisala-Brunt (N , s^{-1}). Asimismo, mediante **ODV** se construyen transectos longitudinales y transversales de *T* y *S* en la zona de estudio.

Con la ayuda de la herramienta de programación Spyder versión 4.1.4, entorno de desarrollo integrado de código abierto para programación científica en el lenguaje python, se convierten datos en formato **NetCDF** a valores separados por comas (**CSV**) de la *T* y *S*. Seguidamente, por medio de la herramienta Google Colaboratory, plataforma de programación python 3.6.9 con servidor en la nube, se escribe un programa para computar con la ecuación internacional de estado *US80* el valor de ρ en la columna de agua a partir de *T*, *S* y *Z*.

El software Microsoft Excel versión 2106, se utilizó principalmente para: realizar gráficos de las series mensuales de la *T* y *S*, comparar gradientes verticales de *T*, *S* y ρ , comparar los valores de las componentes

de la estabilidad E_s y E_t , estabilidad total *E* y *N* de la columna de agua, consignar los grosores de las capas de la columna de agua en tablas; calcular la corrección del cambio de la ρ por el cambio de *S* ($\frac{\partial \rho}{\partial S}$) y la corrección del cambio de la ρ por el cambio de *T* ($\frac{\partial \rho}{\partial T}$), junto con el gradiente adiabático de temperatura ($\frac{dT_a}{dz}$), necesarios para computar *E*, y realizar cálculos y gráficos para determinar el tipo de estructura fina.

4.3. Fases de la Investigación

Fase 1: Valores máximos y mínimos de TSM y SSM: climatología del período 1981-2010. Se grafican mapas superficiales de *T* y *S* utilizando el método análisis variacional de interpolación de datos, integrado en **ODV** para datos anuales y mensuales. Se prosigue a graficar mediante la construcción de tablas y el software Excel el comportamiento climatológico anual de las variables oceanográficas en superficie. En el gráfico final se seleccionan las estaciones representativas mencionadas previamente de un total de 12 estaciones, las curvas resultantes se muestran en un mismo gráfico. Seguidamente se identifican valores máximos y mínimos, promedio, amplitud y rango.

Fase 2: Profundidad y grosor de las capas quasi-homogénea, termoclina, haloclina, picnoclina y capa-inferior. Luego del cálculo de la ρ , se grafican perfiles de *T*, *S* y ρ mediante **ODV** para los sets de datos anuales y mensuales con las mismas escalas para cada parámetro oceanográfico. Con la finalidad de delimitar y determinar el grosor de forma cuantitativa de las capas quasi-homogénea (*CCH*, m), capa isotérmica (*CIT*, m), capa isohalina (*CIH*, m), la termoclina, la haloclina, picnoclina, y la capa inferior (*CI*, m), se realiza el cálculo de los gradientes verticales $\frac{dT}{dz}$; $\frac{ds}{dz}$; $\frac{d\rho}{dz}$. Se construyen tablas para consignar la profundidad de los límites superior e inferior, el espesor de la capa, los valores de las variables oceanográficas encontrados en los límites, y el valor promedio de *T*, *S* y ρ , para cada una de las capas. Por medio del método de interpolación **DIVA** en cuadrícula, integrado en el software **ODV** se grafican transectos de *T* y *S* anual y mensual en la región de estudio con sentido longitudinal y transversal al estrecho de Gerlache.

Fase 3: Estabilidad termohalina, frecuencia de Vaisala-Brunt y estructura fina para la columna de agua. Con el propósito de determinar de forma cuantitativa los aportes de E_s , E_t , E y N se realizan cálculos en Excel y se construyen perfiles en profundidad mediante la herramienta **ODV** para datos anuales y mensuales. Finalmente, se calcula la relación de densidad del medio (R_p) para la columna de agua según los correspondientes aportes de E_t y E_s en la estabilidad general. En base a estos criterios y a los gradientes verticales se determina la estructura fina de la columna de agua en cada una de las estaciones.

5. Resultados

5.1. Máximos y mínimos de T y S superficial del mar para el período 1981-2010 en estaciones seleccionadas a lo largo del estrecho Gerlache

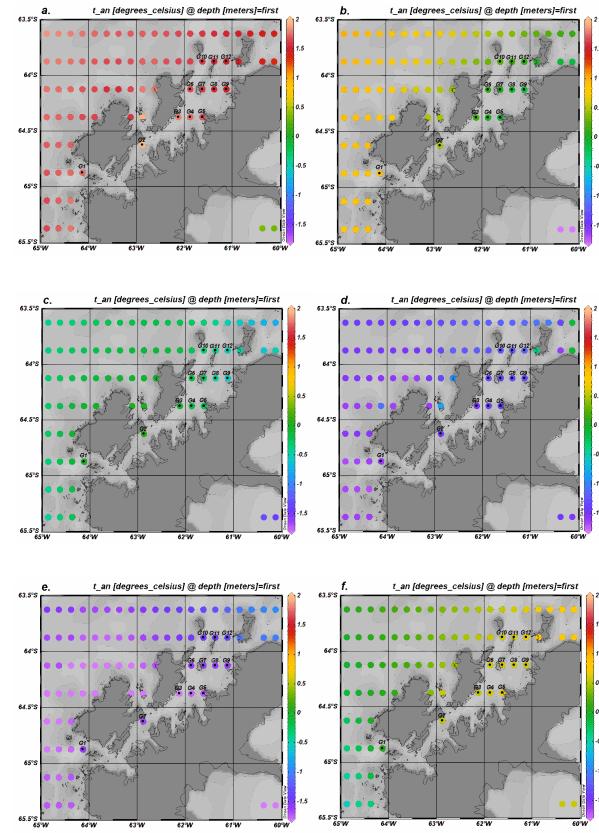
5.1.1. Distribución espacial y temporal de TSM

La TSM del promedio anual multianual del período 1981-2010 (Fig. 2) indica que los valores más bajos se encuentran en las proximidades de la estación G1, en la entrada de la zona suroeste del área de estudio, finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando Gerlache y la estación G9 en el extremo del noreste de Gerlache con valores que rondan -0.50°C , por otra parte, las TSM más altas se encuentran en el interior del estrecho de Gerlache localizadas al este de la estación G2 en la zona central oeste con valores que rondan los -0.34°C , finalmente, las TSM promedio corresponden con las estaciones G3, G4 y G5 en la zona central este con valores entre -0.40°C y -0.42°C .

Las TSM más altas del año para el período 1981-2010, se registran durante el verano en el mes de febrero (Fig. 2a). En este mes, las TSM más bajas se encuentran en las proximidades de la estación G1 en la zona suroeste con valores cercanos a 1.26°C . Las TSM promedio se encuentran en el interior del estrecho al este de la isla Brabante, se distribuyen uniformemente en la región oscilando entre los 1.35 y 1.45°C y corresponden a las estaciones G5, G6, G7 y G8 en las zonas central este y noreste. Las TSM más altas se observan circundantes a la estación G2 en la zona central oeste en el interior del estrecho al este de la isla de Anvers que alcanza los 1.62°C .

Por otro lado, las TSM más bajas del año para el período 1981-2010, se registran durante el invierno e inicios de la primavera en los meses de agosto y octubre (Fig. 2d; Fig. 2e). En agosto las TSM más bajas corresponden a las estaciones G4, G6, G7 y G10 en las zonas central este y noreste con valores que rondan los -1.86°C . Las TSM promedio se encuentran al este de la isla de Anvers y la isla Brabant y se distribuyen uniformemente en la región oscilando entre los -1.72 y -1.78°C , correspondiendo a las estaciones G2, G3, y G5 en las zonas central oeste y este. Las TSM más altas se observan esta vez circundantes a G1 en la entrada suroeste terminando el estrecho de Bismarck e iniciando el estrecho de Gerlache con 1.62°C .

Fig. 2. Distribución de TSM promedia multianual de 1981-2010 en (a) febrero, (b) abril, (c) junio, (d) agosto, (e) octubre y (f) diciembre en el estrecho de Gerlache, con datos del WOA18.



Sobre la distribución general de la TSM en el transcurso del año, se observa que en los meses de febrero (Fig. 2a), marzo, abril (Fig. 2b), mayo, junio (Fig. 2c) y julio las mayores TSM se ubican en la entrada de la zona suroeste finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando el estrecho de Gerlache (G1) y

la zona central oeste (G2). Las *TSM* más bajas se ubican en el otro extremo, en la zona noreste (G9). Durante agosto (Fig. 2d), septiembre, octubre (Fig. 2e), noviembre, diciembre (Fig. 2f) y enero se observa lo opuesto, las *TSM* más altas se encuentran en la entrada de la zona noreste finalizando Gerlache e iniciando Bransfield (G10-G12), y las *TSM* más bajas en el otro extremo en la entrada de la zona suroeste (G1). Los meses seleccionados contienen los máximos y mínimos discutidos y abarcan uniformemente el transcurso de todo el año.

5.1.2. Distribución espacial y temporal de *SSM*

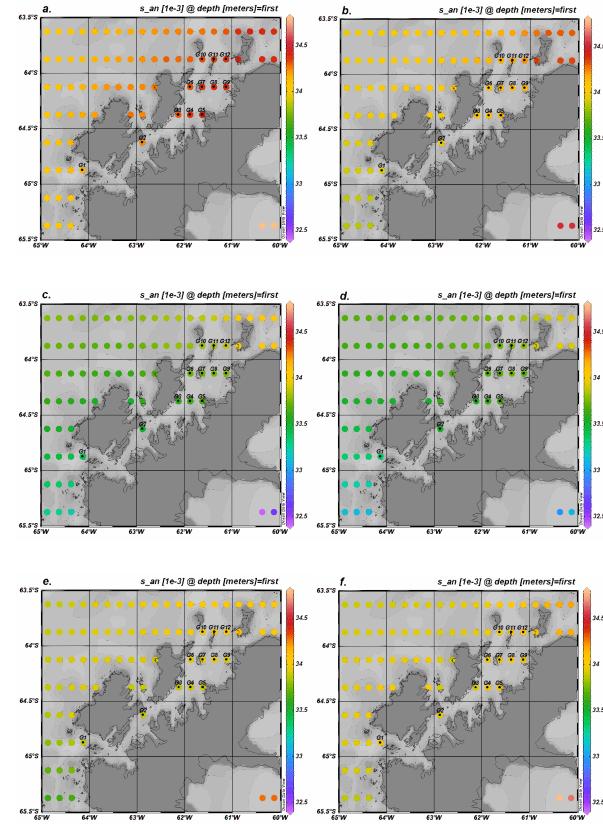
El promedio anual multianual para el período 1981-2010 de la *SSM* indica que, en general, los valores más bajos se encuentran en la entrada de la zona suroeste finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando Gerlache en las proximidades de la estación G1 con aproximadamente 33.8. Las *SSM* más altas se encuentran en la entrada de la zona noreste finalizando el estrecho de Gerlache e iniciando Bransfield en las contigüidades de la estación G12 con valores que rondan los 34.06. Las *SSM* promedio se ubican en el interior del estrecho de Gerlache en las proximidades de G3, G4 y G5 en la zona central este con valores entre 33.87 y 33.94 (Fig. 3).

Las *SSM* más altas del año en el período 1981-2010, se registran en la primavera en el mes de septiembre (Fig. 3a). En este mes, las *SSM* más bajas se encuentran al sur y al este de la isla de Anvers en las proximidades de la estación G1 en la zona suroeste con valores entre 34.15. Las *SSM* más altas se ubican cerca de la entrada de la zona noreste de la región de estudio finalizando el estrecho de Gerlache e iniciando Bransfield en las contigüidades de la estación G10, G11 y G12 y en el interior del estrecho alrededor de las estaciones G7, G8 y G9 con valores entre 34.37 y 34.38. Las *SSM* promedio se ubican en el interior del estrecho de Gerlache entre la isla de Anvers y la isla de Brabant en las proximidades de G2 y G3 en la zona central entre 34.22 y 34.28.

Las *SSM* más bajas del año en el período 1981-2010 se registran durante los meses de enero, febrero y marzo para la mayoría de las estaciones (Fig. 3d). En marzo, las *SSM* más bajas se encuentran al sur y al oeste de la isla de Anvers en las proximidades de las estaciones G1 en la zona suroeste con valores rondando 33.25, por otro lado, las *SSM* más altas se

localizan cerca de la entrada de la zona noreste finalizando el estrecho de Gerlache e iniciando Bransfield en las contigüidades de las estaciones G10, G11 y G12 y en el interior del estrecho alrededor de las estaciones G7, G8 y G9 con valores entre 33.88 y 33.76. Finalmente, las *SSM* promedio se ubican en el interior del estrecho de Gerlache entre las islas Anvers y Brabant en las proximidades de G2 y G3 en la zona central con valores entre 33.46 y 33.59.

Fig. 3. Distribución de *SSM* promedio multianual de 1981-2010 en (a) septiembre, (b) noviembre, (c) enero, (d) marzo, (e) mayo, (f) julio en el estrecho de Gerlache, con datos del WOA18.



En forma general, la distribución de la *SSM* en el transcurso del año muestra a los mayores valores cerca de la zona noreste (estaciones G10, G11 y G12) en la entrada noreste, finalizando el estrecho de Gerlache e iniciando el estrecho de Bransfield y dentro del estrecho de Gerlache en las estaciones G7, G8 y G9 para todos los meses del año. Los menores valores de *SSM* se ubican normalmente cerca de la entrada de la zona suroeste del estrecho finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando Gerlache en las inmediaciones de la estación G1. Es decir, la distribución espacial para el parámetro oceanográfico

de la *SSM* es constante durante todo el año con mayores valores en la zona noreste y menores en la suroeste, presentando mayores concentraciones en superficie durante la primavera (septiembre) y menores en otoño (marzo). En los meses seleccionados: septiembre (Fig. 3a), noviembre (Fig. 3b), enero (Fig. 3c), marzo (Fig. 3d), mayo (Fig. 3e) y julio (Fig. 3f), se presentan máximos y mínimos, se abarca de forma uniforme el transcurso de todo el año y es posible visualizar los principales cambios de los valores de *SSM* de forma espacial y temporal.

5.2.3. Comportamiento climatológico de la *TSM* y *SSM*

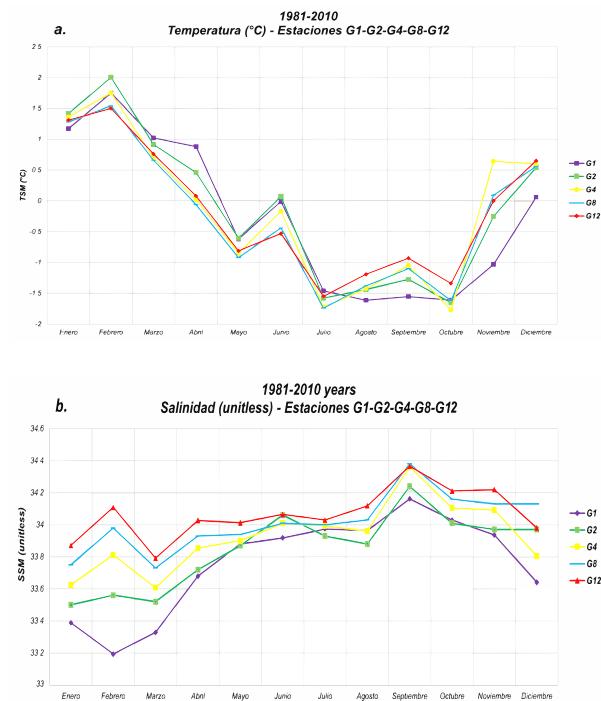
Se presentan cinco curvas del comportamiento anual climatológico de la *TSM* del período 1981-2010 en las estaciones seleccionadas G1, G2, G4, G8 y G12 (Fig. 4a). En términos generales se observa que las *TSM* empiezan a disminuir desde un máximo en verano en el mes de febrero con valores entre 1.5 y 2.0 °C hasta un mínimo en invierno en el mes de julio con valores entre -1.5 y -1.8 °C, se observa un pico durante el descenso en junio con temperaturas entre -0.5 y 0 °C. Las *TSM* aumentan levemente durante agosto y septiembre, manteniéndose entre -2.0 y -1.0 °C para las estaciones seleccionadas. En primavera, en el mes de octubre se experimenta un nuevo mínimo de *TSM* con valores entre -1.3 y -1.7 °C, y seguidamente la temperatura inicia su aumento nuevamente hasta febrero para las cinco curvas. Las *TSM* para las estaciones seleccionadas oscilan entre -1.8 y 2.0 °C, comprendiendo un rango de variación de 3.8 °C.

Primeramente, en la Tabla. 2 se muestran los valores máximos, mínimos, amplitud y promedio del comportamiento anual climatológico de la *TSM* del período 1981-2010. En cuanto a los valores máximos y mínimos para la *TSM*, en general se identifican valores más altos en la zona suroeste con 1.75 °C en G1, y central con 2.00 °C en G2 y 1.75 °C en G4, valores medios se registran para la zona noreste en las estaciones G6 y G7 con 1.67 °C y 1.62 °C respectivamente, mientras que los más bajos se observan en la zona noreste con 1.54 °C en G8 y 1.50 °C en G12. Del mismo modo, en cuanto a la amplitud la cual se define como el valor máximo menos el valor mínimo de *TSM* registrados para la estación correspondiente, se presentan mayores amplitudes en las zonas suroeste con 3.36 en G1, y central con 3.58 en G2 y 3.47 en G4, por el contrario, se registran menores amplitudes en la zona noreste con 3.28 en

G8 y 3.05 en G12. Por último, en cuanto al promedio, se presentan *TSM* más altas en la zona central oeste con -0.12 °C en G2, y central este con -0.16 °C en G4, en contraste, *TSM* más bajas se registran para las zonas noreste con -0.26 °C en G8 y -0.17 °C en G12.

En la Fig. 4b se muestran cinco curvas del comportamiento anual climatológico de la *SSM* del período 1981-2010 en las estaciones seleccionadas: G1, G2, G4, G8 y G12. Las *SSM* más altas se observan en primavera en el mes de septiembre para todas las estaciones con valores entre 34.2 y 34.4. Por otra parte, las *SSM* más bajas tienen lugar en verano e inicios del otoño en los meses de enero, febrero y marzo con valores entre 33.2 y 34.0. En términos generales se observa que las *SSM* empiezan a disminuir desde un máximo en septiembre hasta un mínimo en marzo, y seguidamente inician su aumento nuevamente hasta septiembre para las cinco curvas. Las *SSM* para las estaciones seleccionadas oscilan en un rango entre 33.3 y 34.4, comprendiendo un rango de variación de 1.1.

Fig. 4. Comportamiento climatológico anual de (a) *TSM* y (b) *SSM* en las estaciones G1, G2, G4, G8 y G12 del estrecho de Gerlache para el período 1981-2010, graficados con datos del WOA18.



Seguidamente, en la Tabla. 2 se muestran los valores máximos, mínimos, amplitud y promedio del comportamiento anual climatológico de la *SSM* del

período 1981-2010. En cuanto a los valores máximos y mínimos para la *SSM*, en general se identifican valores más altos en la zona noreste con 34.37 en G12 y 34.38 en G8, valores medios se registran en la zona norte del interior del estrecho para la zona noreste y central este en las estaciones G6 y G4 con 34.31 y 34.36 respectivamente, mientras que los valores más bajos se observan en la zona suroeste con 34.16 en G1 y zona central oeste con 34.24 en G2. Similarmente, en cuanto a la amplitud la cual se define como el valor máximo menos el valor mínimo de *SSM* registrados para la estación correspondiente, se presentan mayores amplitudes en las zonas suroeste con 0.97 en G1, y central con 0.74 en G2 y 0.75 en G4, por el contrario, se registran menores amplitudes en la zona noreste con 0.65 en G8 y 0.58 en G12. Finalmente, en cuanto al promedio, se presentan *SSM* más altas en la zona noreste con 34.07 en G12 y 33.99 en G8, en contraste con las *SSM* más bajas para las zonas suroeste con 33.76 en G1, y zona central con 33.83 y 33.93 en G2 y G4 respectivamente.

Tabla 2. Valores máximos, mínimos, amplitud y promedio del comportamiento climatológico de *TSM* y *SSM* para el período 1981-2010 en estaciones del estrecho de Gerlache, obtenidos con datos del WOA18.

Est.	TSM, °C				SSM, psu			
	Max	Min	Amplitud	Promedio	Max	Min	Amplitud	Promedio
G1	1.75	-1.61	3.36	-0.25	34.16	33.19	0.97	33.76
G2	2.00	-1.58	3.58	-0.12	34.24	33.50	0.74	33.83
G3	1.80	-1.73	3.53	-0.23	34.30	33.55	0.75	33.88
G4	1.75	-1.72	3.47	-0.16	34.36	33.61	0.75	33.93
G5	1.69	-1.73	3.42	-0.16	34.40	33.65	0.75	33.95
G6	1.67	-1.64	3.31	-0.20	34.31	33.68	0.63	33.97
G7	1.62	-1.61	3.23	-0.19	34.36	33.70	0.66	33.98
G8	1.54	-1.74	3.28	-0.26	34.38	33.73	0.65	33.99
G9	1.47	-1.59	3.06	-0.29	34.39	33.69	0.7	33.99
G10	1.60	-1.68	3.28	-0.17	34.32	33.81	0.51	34.01
G11	1.55	-1.59	3.14	-0.18	34.34	33.76	0.58	34.03
G12	1.50	-1.55	3.05	-0.17	34.37	33.79	0.58	34.07

5.2. Profundidad y grosor de las capas cuasi-homogénea, termoclinia, haloclina, picnoclina e inferior para 1981-2010 en el estrecho Gerlache

5.2.1 Transectos longitudinales de temperatura

Se muestra un transecto longitudinal a través del estrecho de Gerlache con sentido SW-NE de la *T* en verano para el mes de febrero del período 1981-2010 (Fig. 5a). Se observa una capa con una *T* uniforme de 0 a 5 m en G1 y G2 de mínimo grosor, que presenta las *T* más elevadas de la columna de agua por encima de los 1.5 °C. La presencia de un gradiente negativo pronunciado, es decir la disminución rápida de la *T* con la profundidad entre los 10 a 100 m de 1.5 a 0.5

°C, corresponde a la termoclinia. El gradiente vertical de *T* se torna positivo entre los 110 y 170 m de forma generalizada. Por debajo de los 170 m, el gradiente vertical de *T* llega a valores cercanos a cero, por lo que la *T* se mantiene relativamente constante en las estaciones. Al extremo suroeste (G1) del estrecho se observa la intrusión de un cuerpo de agua de mayor *T* demarcado por las isotermas de 0.75 y 1 °C entre los 200 y 500 m que ingresa desde el estrecho de Bismarck. En el extremo noreste (G12) se observa la intrusión de un cuerpo de agua con *T* frías por debajo de los 0 °C entre los 400 y 500 m que proviene del estrecho de Bransfield.

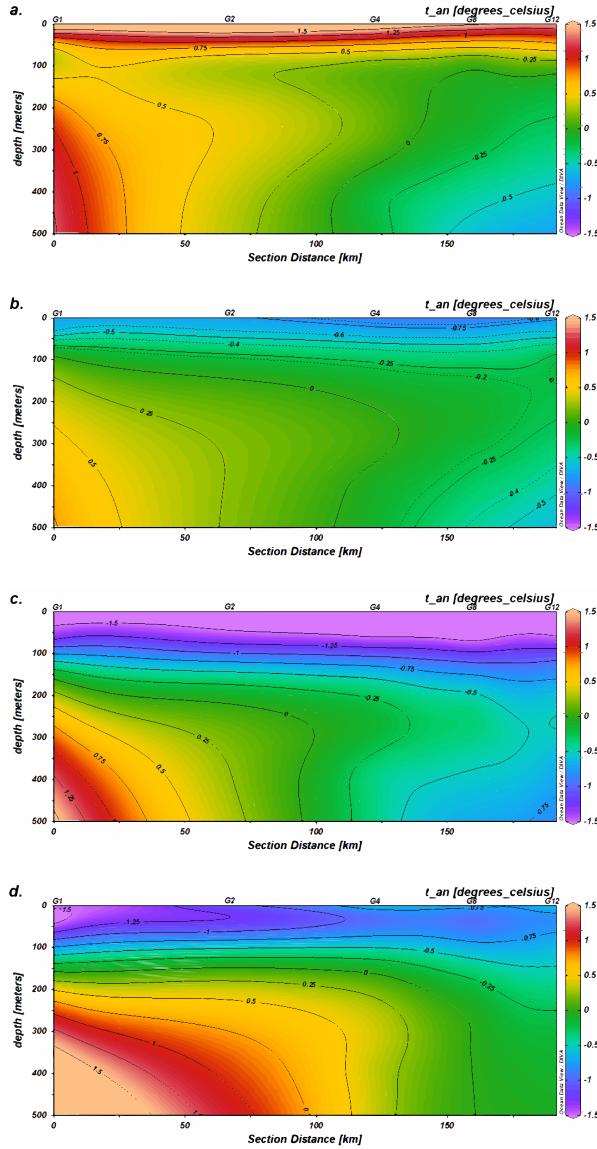
En otoño, para el transecto longitudinal de la *T* del mes de mayo (Fig. 5b), en los primeros 65 m se observan bajas *T* entre los -1 y -0.4 °C. En general se presenta un gradiente de *T* positivo, es decir las *T* aumentan con la profundidad para la mayor parte de la columna de agua, la geometría elongada y concéntrica de las isotermas permite identificar la presencia de la intrusión de un cuerpo de agua de *T* más elevadas por el extremo suroeste del estrecho de Gerlache con *T* por encima de los 0.5 °C para profundidades entre 250 y 500 m.

En el transcurso del invierno para el transecto longitudinal de *T* del mes de agosto (Fig. 5c), se observa una capa desde los 0 a 50 m con *T* bajas uniformes de -1.5 °C característica de los meses de invierno, las *T* empiezan a aumentar con un mismo gradiente vertical desde los -1.5°C a 50 m hasta los -0.75°C a 120m para todas las estaciones. Desde los 150 hasta los 500 m se observa la influencia de una clara intrusión de aguas cálidas que ingresan a Gerlache por el estrecho de Bismarck desde el extremo suroeste (G1), mientras que en el extremo noreste (G12) se observan un cuerpo de aguas más frías que ingresan desde el estrecho de Bransfield.

Durante la primavera, para el transecto longitudinal de *T* del mes de noviembre (Fig. 5d), la capa homogénea de *T* frías que se observaba en los meses de invierno se presenta erodada por la mezcla y calentamiento estacional de la columna de agua, se empieza a conformar nuevamente una termoclinia, pero en este momento del año es de reducido espesor comprendiendo únicamente los primeros 20 m. Por debajo de los 20 m se observan gradientes verticales de *T* positivos y entre los 200 y 500 m de profundidad

la intrusión de aguas cálidas provenientes del estrecho de Bismarck.

Fig 5. Transecto longitudinal de T en el estrecho de Gerlache (G1-G2-G4-G8-G12) en (a) febrero (b) mayo (c) agosto y (d) noviembre de 1981-2010 graficado con datos del WOA18.



5.2.2 Transectos longitudinales de salinidad

Se muestra un transecto longitudinal a través del estrecho de Gerlache con sentido SW-NE de la S en primavera para el mes de septiembre del período 1981-2010 (Fig. 6a). En superficie se observan mayores valores de S cerca de G4, G8 y G12 en la zona noreste, y valores más bajos en el otro extremo, en la zona suroeste del estrecho cerca de G1. Verticalmente S aumenta de 34.2 en superficie a 34.5

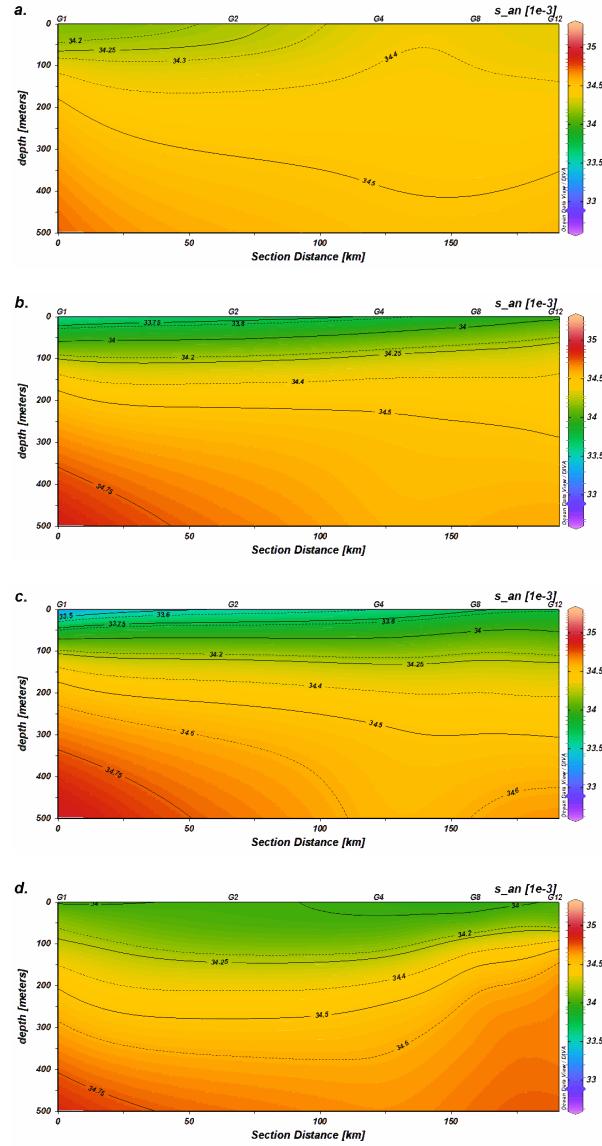
en 400m en G1, donde ocurre el mayor aumento de S con la profundidad, mientras que el gradiente es menos pronunciado en G4, G8 y G12 donde S aumenta de 34.4 en superficie a 34.5 en 400m. Durante el mes de septiembre se presentan las SSM más altas del año y se observa una capa isohalina con valores de S uniformes que llega a alcanzar un espesor de hasta 80 m con valores de S entre 34.3 y 34.4.

En verano, para el transecto longitudinal de la S del mes de diciembre (Fig. 6b), se presentan nuevamente mayores S en el extremo noreste cerca del estrecho de Bransfield, que en el extremo suroeste en el límite entre los estrechos de Bismarck y Gerlache, no obstante, a diferencia del mes de septiembre, el gradiente vertical de S es uniforme para la columna de agua y las isohalinas hasta los 200 m se observan paralelas a diferencia del mes de septiembre en donde las isohalinas se doblegan notoriamente. En la estación G1 es posible identificar la presencia de un cuerpo de agua de mayor S que ingresa al estrecho por la entrada suroeste finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando Gerlache demarcado por la isohalina de 34.75 a una profundidad entre 400 y 500 m.

En el transcurso del otoño, en marzo (Fig. 6c) se observan los valores más bajos de S en superficie de todo el año. Nuevamente las menores S se ubican en las inmediaciones de G1 en el extremo suroeste del estrecho con valores de 33.5. Las isohalinas se observan paralelas los primeros 200 m de la columna de agua, por lo que en general, el gradiente vertical de S es similar independientemente de la estación hasta los 200 m. Por debajo de los 250 m se observan S altas en G1 con valores mayores a 34.75, mientras que en G8 y G12 para la misma profundidad se observan S con valores entre 34.5 y 34.6.

Durante el invierno, para el transecto longitudinal del mes de junio (Fig. 6d), durante los primeros 80 m S se observa constante con la profundidad entre 34 y 34.2. Por debajo de los 80 a 100 m de profundidad el gradiente vertical de S empieza a aumentar en todas las estaciones, principalmente en G8 y G12. Aquí, las isohalinas no se observan completamente paralelas, se presentan dobladas principalmente cerca del extremo noreste. Entre los 400 y 500 m debajo de G1 se presenta un cuerpo de agua que ingresa al estrecho de Gerlache a través de la entrada suroeste demarcado por la isohalina de 34.75.

Fig. 6. Transecto longitudinal de S en el estrecho de Gerlache (G1-G2-G4-G8-G12) en (a) septiembre (b) diciembre (c) marzo y (d) junio de 1981-2010 graficado con datos del WOA18.



5.2.3 Comportamiento climatológico anual de los perfiles de T, S y ρ

En términos generales, los perfiles mensuales de T y S evidencian la variación en espacio y tiempo de los parámetros oceanográficos en profundidad en el transcurso del año para las cinco zonas en que se ha subdividido la región de estudio (Fig. 7a-b; Fig. 7c-d; Fig. 7e-f; Fig. 7g-h; Fig. 7i-j). Los primeros 150 m se observa la dispersión y variación de la T y S que afectan las aguas más superficiales esto debido a una gran variedad de mecanismos, como el intercambio

atmosférico, la radiación solar, la formación y derretimiento de hielo marino, entre otros (García et al., 2002). Por debajo de los 150 m los efectos atmosféricos son reducidos y las T y S registran valores mucho más homogéneos y menos dispersos. En términos generales, en los meses de verano la termoclina cuenta con su espesor máximo y en los meses de invierno, como julio y agosto, la termoclina es inexistente o de reducido espesor, pues la columna de agua presenta inestabilidad térmica. La haloclina cuenta con su mínimo espesor en la primavera, específicamente en el septiembre, y un máximo en otoño, en abril. Durante el otoño, en los meses de marzo y abril, la CIT cuenta con su mayor espesor. En primavera específicamente en septiembre la CIH cuenta con su mayor espesor.

5.2.3.1. Capa cuasi-homogénea CCH: isotérmica CIT e isohalina CIH

Durante el transcurso del otoño, la CIT cuenta con su mayor grosor con espesores promedio entre los 0 a 12 m. Las T promedio de la capa en la región de estudio son de 0.46 °C en la zona suroeste G1, 0.27 °C en la zona central oeste G2, -0.02 °C en la zona central este G4, -0.10 y 0.00 °C en la zona noreste G8 y G12 respectivamente (Tabla. 3b). Se observa que el grosor de la capa es el mismo, independientemente de la zona, y las T más altas para esta capa se encuentran en la zona suroeste (Fig. 7a) en comparación con la zona central (Fig. 7c; Fig. 7e) y noreste (Fig. 7g; Fig. 7i). En las temporadas de primavera, la CIT tiene un grosor promedio entre los 0 a 5 m. Las T promedio de la capa en la región de estudio son de -1.46 °C en la zona suroeste G1, -1.22 °C en la zona central oeste G2, -0.97 °C en la zona central este G4, -1.05 y -0.93 °C en la zona noreste G8 y G12 respectivamente (Tabla. 3d). Se observa que el grosor de la capa es el mismo independientemente de la zona, las T más altas para esta capa se encuentran en la zona noreste (Fig. 7g; Fig. 7i) y las más bajas en la zona suroeste (Fig. 7a).

Asimismo, para la S , durante el transcurso del otoño la CIH cuenta con un reducido grosor entre los 0 a 10m, las S promedio de la capa en el estrecho son de 33.64 en la zona suroeste G1, 33.68 en la central oeste G2, 33.80 en la zona central este G4, 33.88 y 33.95 en la zona noreste G8 y G12 respectivamente (Tabla. 4b). El grosor de la capa es mayor en la zona noreste, se observan S más altas para esta capa en la zona

noreste (Fig. 7h; Fig. 7j) en comparación con la suroeste (Fig. 7b). En la temporada de primavera, la *CIH* cuenta con su mayor grosor y *S* variables dependiendo de la zona en la región de estudio, las *S* y grosor promedio de la capa en el estrecho son de 34.05 y 28 m en la zona suroeste G1, 34.09 y 43 m en la zona central oeste G2, 34.21 y 60 m en la zona central este G4, por último, 34.25 y 67 m en G8, 34.28 y 58 m en G12 ambas localizadas en la zona noreste (Tabla. 4d). El grosor de la capa es mayor en el norte en comparación con el sur del estrecho, se observan *S* más altas para esta capa en la zona noreste (Fig. 7h; Fig. 7j) en comparación con la zona suroeste (Fig. 7b).

5.2.3.2. Termoclina, haloclina y picnoclina

La capa en donde la *T* disminuye rápidamente con la profundidad y $\frac{dT}{dz}$ es negativo se le denomina la termoclina (Stewart 2012). Durante el verano, la termoclina tiene un grosor y *T* variables dependiendo de la zona en la región de estudio. Las *T* y límites de la capa en la región de estudio son de 0.99 °C en 7 m a -0.12 °C en 70 m en la zona suroeste (G1), 1.24 °C en 5 m a -0.08 °C en 83 m en la zona central oeste (G2), 1.10 °C en 5 m a -0.15 °C en 108 m en la zona central este (G4), 0.97 °C en 5 m a -0.27 °C en 125 m en (G8), y 0.97 °C en 5 m a -0.31 °C en 225 m en (G12) en la zona noreste (Tabla. 3a). El grosor de la termoclina es mayor en la zona norte y menor en la zona sur, las *T* promedio más altas para la termoclina se encuentran en la zona central oeste (Fig. 7c) y las más bajas en la zona noreste (Fig. 7g; Fig. 7i). En el transcurso del otoño, la termoclina cuenta con un grosor y *T* variables dependiendo de la zona en la región de estudio, las *T* y límites de la capa en la región de estudio son de 0.50 °C en 15 m a 0.18 °C en 60 m en la zona suroeste (G1), 0.28 °C en 12 m a -0.08 °C en 70 m en la zona central oeste (G2), 0.28 °C en 12 m a -0.31 °C en 83 m en la zona central este (G4), 0.20 °C en 12 m a -0.12 °C en 83 m en (G8), y 0.21 °C en 12 m a -0.22 °C en 192 m en (G12) en la zona noreste (Tabla. 3b). El grosor de la termoclina es mayor en la zona norte y menor en la zona sur, las *T* promedio más altas para la termoclina se encuentran en la zona suroeste (Fig. 7a) y las más bajas en la zona noreste (Fig. 7g; Fig. 7i).

En la época de invierno, el espesor de la termoclina es mínimo o inexistente, las *T* y límites de la capa en la región de estudio son de -1.15 °C en 5 m a -1.22

°C en 10 m en la zona suroeste (G1), -1.15 °C en 5 m a -1.24 °C en 12 m en la zona central oeste (G2), -1.34 °C en 5 m a -1.36 °C en 8 m en la zona central este (G4), -1.31 °C en 5 m a -1.32 °C en 13 m en (G8), y -1.24 °C en 5 m a -1.25 °C en 10 m en (G12) en la zona noreste (Tabla. 3c). La totalidad de la columna de agua registra en su mayoría gradientes verticales positivos, es decir las temperaturas aumentan a medida que se desciende en la vertical, este fenómeno se le conoce como inestabilidad térmica. Por último, en la temporada de primavera, la termoclina cuenta con un grosor reducido y *T* variables dependiendo de la zona en la región de estudio, las *T* y límites de la capa en la región de estudio son de -1.53 °C en 7 m a -1.68 °C en 23 m en la zona suroeste (G1), -1.39 °C en 5 m a -1.58 °C en 25 m en la zona central oeste (G2), -1.21 °C en 7 m a -1.44 °C en 20 m en la zona central este (G4), -1.23 °C en 5 m a -1.39 °C en 20 m para (G8), y -1.10 °C en 5 m a -1.23 °C en 23 m para (G12) en la zona noreste (Tabla. 3d). El grosor de la termoclina es el mayor en la zona suroeste (G1) y central oeste (G2), las *T* promedio más altas para la termoclina se encuentran en la zona noreste (Fig. 7g; Fig. 7i) y las más bajas en la zona suroeste (Fig. 7a).

La haloclina se define como la capa de agua en donde la *S* incrementa rápidamente con la profundidad (Garrison 2009). Durante el verano la haloclina cuenta con un grosor y *S* variables dependiendo de la zona en la región de estudio, las *S* y límites de la capa en el estrecho son de 33.43 en 5 m a 34.56 en 208 m en la zona suroeste (G1), 33.61 en 5 m a 34.49 en 200 m en la zona central oeste (G2), 33.76 en 5 m a 34.51 en 200 m en la zona central este (G4), 33.89 en 5 m a 34.49 en 183 m en (G8), y 34.00 en 8 m a 34.45 en 158 m en (G12) en la zona noreste (Tabla. 4a). El grosor de la haloclina es mayor en el sur en comparación con el norte del estrecho, se observan *S* promedio más altas para esta capa en la zona noreste (Fig. 7h; Fig. 7i) en comparación con la zona suroeste (Fig. 7b). En el transcurso del otoño, la haloclina cuenta con un grosor y *S* variables dependiendo de la zona en la región de estudio, las *S* y límites de la capa en el estrecho son de 33.65 en 5 m a 34.49 en 225 m en la zona suroeste (G1), 33.66 en 5 m a 34.43 en 200 m en la zona central oeste (G2), 33.81 en 5 m a 34.48 en 250 m en la zona central este (G4), 33.89 en 10 m a 34.45 en 225 m en (G8), y 33.96 en 10 m a 34.42 en 200 m en (G12) en la zona noreste (Tabla. 4b). El grosor de la haloclina es el mayor en la zona central oeste (G4) y noreste (G8), se observan *S* promedio

más altas para esta capa en la zona noreste (Fig. 7h; Fig. 7j) en comparación con la zona suroeste (Fig. 7b).

En la época de invierno, la halocina cuenta con un grosor y S variables dependiendo de la zona, las S y límites de la capa en el estrecho son de 33.98 en 33 m a 34.57 en 217 m en la zona suroeste (G1), 33.96 en 50 m a 34.45 en 200 m en la zona central oeste (G2), 34.00 en 58 m a 34.56 en 250 m en la zona central este (G4), 34.01 en 47 m a 34.63 en 242 m en (G8), y 34.08 en 48 m a 34.65 en 192 m en (G12) en la zona noreste (Tabla. 4c). El grosor de la halocina es el mayor en la zona central este (G4) y noreste (G8), se observan S promedio más altas para esta capa en la zona noreste (Fig. 7h; Fig. 7j) en comparación con la zona suroeste (Fig. 7b). Por último, en la temporada de primavera, la halocina cuenta con su grosor más reducido durante el transcurso del año, las S y límites de la capa en el estrecho son de 34.06 en 28 m a 34.50 en 192 m en la zona suroeste (G1), 34.10 en 43 m a 34.45 en 183 m en la zona central oeste (G2), 34.23 en 60 m a 34.52 en 197 m en la zona central este (G4), 34.26 en 68 m a 34.50 en 192 m en (G8), y 34.29 en 58 m a 34.49 en 187 m en (G12) en la zona noreste (Tabla. 4d). El grosor de la halocina es el mayor en la zona central suroeste (G1) y central (G2 y G4), se observan S promedio más altas para esta capa en la zona noreste (Fig. 7h; Fig. 7j) en comparación con la zona suroeste (Fig. 7b).

Ulteriormente, la picnoclina es la capa en donde la densidad incrementa con el aumento de la profundidad (Garrison, 2009). Respecto a los perfiles de ρ versus profundidad para los doce meses del año, los valores de ρ oscilan entre 1027 y 1030. A medida que se desciende en la columna de agua la ρ aumenta desde aproximadamente 1027 en superficie hasta 1030 a 300 m de profundidad. Se puede afirmar que la ρ continúa aumentando con la profundidad a una tasa constante y no logra estabilizarse para las profundidades comprendidas en este estudio. Se propone que la picnoclina comprende desde los 5 m de profundidad hasta los 300 m de profundidad para los doce meses del año.

Fig. 7. Comportamiento climatológico anual de los perfiles de T y S para las zonas: suroeste (G1) (a) T y (b) S , central oeste (G2) (c) T y (d) S , central este (G4) (e) T y (f) S , noreste (G8) (g) T y (h) S , y noreste (G12) (i) T y (j) S , del estrecho de Gerlache en el período 1981-2010, graficado con datos del WOA18.

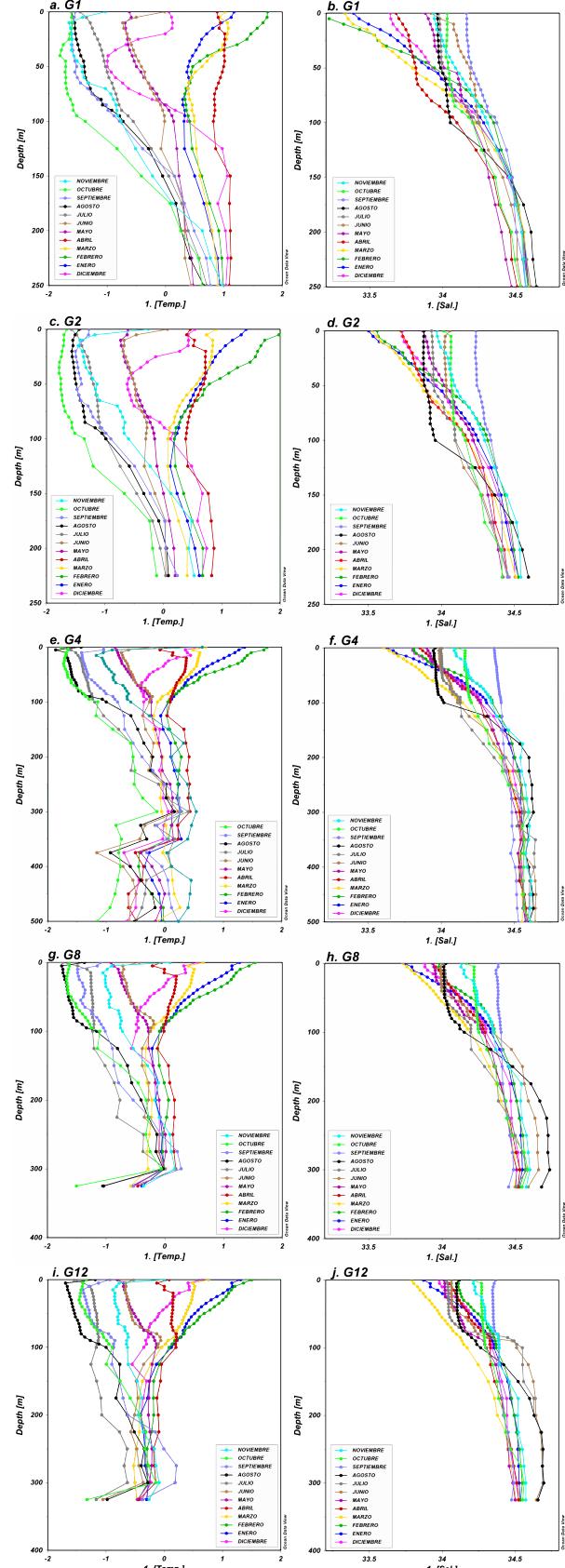


Tabla 3. Límites de profundidad (Z , m) y temperatura (T , °C) de las capas CIT, termoclina y CI en **(a)** Verano, **(b)** Otoño, **(c)** Invierno, y **(d)** Primavera en el estrecho de Gerlache para el período 1981-2010 identificados con datos del WOA18.

(3) Verano: Diciembre-Enero-Febrero

Estaciones	Capas	Límites profundidad, m		Espesor, m	Límites temperatura, °C		Promedio, °C
		Superior	Inferior		Superior	Inferior	
G1	CIT	0	7	7	0.99	0.99	0.99
	Termoclina	7	70	63	0.99	-0.12	0.44
	CI	70	225	155	-0.12	0.97	0.42
G2	CIT	0	5	5	1.32	1.24	1.28
	Termoclina	5	83	78	1.24	-0.08	0.58
	CI	83	200	117	-0.08	0.65	0.29
G4	CIT	0	5	5	1.24	1.10	1.17
	Termoclina	5	108	103	1.10	-0.15	0.48
	CI	108	475	367	-0.14	-0.20	-0.17
G8	CIT	0	5	5	1.13	0.97	1.05
	Termoclina	5	125	120	0.97	-0.27	0.35
	CI	125	300	175	-0.27	-0.01	-0.14
G12	CIT	0	5	5	1.15	0.97	1.06
	Termoclina	5	225	220	0.97	-0.31	0.33
	CI	225	300	75	-0.33	-0.25	-0.29

(b) Otoño: Marzo-Abril-Mayo

Estaciones	Capas	Límites profundidad, m		Espesor, m	Límites temperatura, °C		Promedio, °C
		Superior	Inferior		Superior	Inferior	
G1	CIT	0	15	15	0.43	0.50	0.46
	Termoclina	15	60	45	0.50	0.18	0.34
	CI	60	225	165	0.18	0.81	0.49
G2	CIT	0	12	12	0.26	0.28	0.27
	Termoclina	12	70	58	0.28	-0.08	0.10
	CI	70	200	130	-0.08	0.48	0.20
G4	CIT	0	12	12	-0.04	0.01	-0.02
	Termoclina	12	83	71	0.28	-0.31	0.12
	CI	83	475	392	-0.31	-0.14	-0.22
G8	CIT	0	12	12	-0.11	-0.09	-0.10
	Termoclina	12	83	72	0.20	-0.12	0.04
	CI	83	300	217	-0.12	-0.04	-0.23
G12	CIT	0	12	12	0.01	-0.02	0.00
	Termoclina	12	192	180	0.21	-0.22	-0.01
	CI	192	208	16	-0.22	-0.24	-0.48

(c) Invierno: Junio-Julio-Agosto

Estaciones	Capas	Límites profundidad, m		Espesor, m	Límites temperatura, °C		Promedio, °C
		Superior	Inferior		Superior	Inferior	
G1	CIT	0	5	5	-1.03	-1.15	-1.09
	Termoclina	5	10	5	-1.15	-1.22	-0.20
	CI	10	225	215	-1.22	0.44	-0.39
G2	CIT	0	5	5	-0.98	-1.15	-1.07
	Termoclina	5	12	7	-1.15	-1.24	-0.70
	CI	12	200	188	-1.24	0.01	-0.61
G4	CIT	0	5	5	-1.11	-1.34	-1.24
	Termoclina	5	8	3	-1.34	-1.36	-0.82
	CI	8	475	467	-1.36	-0.38	-0.86
G8	CIT	0	5	5	-1.18	-1.31	-1.25
	Termoclina	5	13	8	-1.31	-1.32	-0.82
	CI	7	300	293	-1.32	-0.01	-0.66
G12	CIT	0	5	5	-1.09	-1.24	-1.17
	Termoclina	5	10	5	-1.24	-1.25	-0.78
	CI	10	300	290	-1.25	-0.43	-0.83

(d) Primavera: Septiembre-Octubre-Noviembre

Estaciones	Capas	Límites profundidad, m		Espesor, m	Límites temperatura, °C		Promedio, °C
		Superior	Inferior		Superior	Inferior	
G1	CIT	0	7	7	-1.40	-1.53	-1.46
	Termoclina	7	23	17	-1.53	-1.68	-1.60
	CI	23	225	202	-1.68	0.67	-0.50
G2	CIT	0	5	5	-1.06	-1.38	-1.22
	Termoclina	5	25	20	-1.39	-1.58	-1.48
	CI	25	200	175	-1.58	0.10	-0.74
G4	CIT	0	7	7	-0.73	-1.21	-0.97
	Termoclina	7	20	13	-1.21	-1.44	-1.33
	CI	20	475	455	-1.44	-0.14	-0.79
G8	CIT	0	5	5	-0.88	-1.23	-1.05
	Termoclina	5	20	15	-1.23	-1.39	-1.31
	CI	20	300	280	-1.39	0.13	-0.63
G12	CIT	0	5	5	-0.76	-1.10	-0.93
	Termoclina	5	23	18	-1.10	-1.23	-1.17
	CI	23	300	277	-1.23	-0.01	-0.62

Tabla 4. Límites de profundidad (Z , m) y salinidad (S , psu) de las capas CIH, haloclina y CI en **(a)** Verano, **(b)** Otoño, **(c)** Invierno, y **(d)** Primavera en el estrecho de Gerlache para el período 1981-2010 identificados con datos del WOA18.

(a) Verano: Diciembre-Enero-Febrero

Estaciones	Capas	Límites profundidad, m		Espesor, m	Límites salinidad		Promedio
		Superior	Inferior		Superior	Inferior	
G1	CIH	0	5	5	33.41	33.43	33.42
	Haloclina	5	208	203	33.43	34.56	33.99
	CI	208	225	17	34.56	34.58	34.57
G2	CIH	0	5	5	33.60	33.61	33.60
	Haloclina	5	200	195	33.61	34.49	34.05
	CI	0	0	0	0.00	0.00	0.00
G4	CIH	0	5	5	33.75	33.76	33.75
	Haloclina	5	200	195	33.76	34.51	34.13
	CI	200	433	233	34.51	34.56	34.54
G8	CIH	0	5	5	33.87	33.89	33.88
	Haloclina	5	183	178	33.89	34.49	34.19
	CI	183	300	117	34.49	34.53	34.51
G12	CIH	0	8	8	33.99	34.00	34.00
	Haloclina	8	158	150	34.00	34.45	34.22
	CI	158	300	142	34.45	34.53	34.49

(b) Otoño: Marzo-Abril-Mayo

Estaciones	Capas	Límites profundidad, m		Espesor, m	Límites salinidad		Promedio
		Superior	Inferior		Superior	Inferior	
G1	CIH	0	5	5	33.63	33.65	33.64
	Haloclina	5	225	220	33.65	34.49	34.07
	CI	225	400	175	0.00	0.00	0.00
G2	CIH	0	5	5	33.71	33.66	33.68
	Haloclina	5	200	195	33.66	34.43	34.04
	CI	200	400	200	0.00	0.00	0.00
G4	CIH	0	5	5	33.79	33.81	33.80
	Haloclina	5	250	245	33.81	34.48	34.14
	CI	250	475	225	34.48	34.57	34.52
G8	CIH	0	10	10	33.87	33.89	33.88
	Haloclina	10	225	215	33.89	34.45	34.17
	CI	225	292	67	34.45	34.51	34.48
G12	CIH	0	10	10	33.94	33.96	33.95
	Haloclina	10	200	190	33.96	34.42	34.19
	CI	200	317	117	34.42	34.50	34.46

(c) Invierno: Junio-Julio-Agosto

Estaciones	Capas	Límites profundidad, m		Espesor, m	Límites salinidad		Promedio
		Superior	Inferior		Superior	Inferior	
G1	CIH	0	33	33	33.95	33.98	33.97
	Haloclina	33	217	183	33.98	34.57	34.27
	CI	217	225	8	34.57	34.58	34.57
G2	CIH	0	50	50	33.96	33.95	33.96
	Haloclina	50	200	150	33.96	34.45	34.20
	CI	0	0	0	0.00	0.00	0.00
G4	CIH	0	58	58	33.99	33.99	33.99
	Haloclina	58	250	192	34.00	34.56	34.28

5.2.3.3. Capa inferior

La *CI* de la *T* es la capa en donde se observa un gradiente vertical de *T* positivo y las *T* se estabilizan. En el transcurso del verano, las *T* y límites de la capa en la región de estudio son de -0.12 °C en 70 m a 0.97 °C en 225 m en la zona suroeste (G1), -0.08 °C en 83 m a 0.65 °C en 200 m en la zona central oeste (G2), -0.14 °C en 108 m a -0.20 °C en 475 m en la zona central este (G4), -0.27 °C en 125 m a -0.01 °C en 300 m en (G8), -0.33 °C en 225 m a -0.25 °C en 300 m en (G12), para la zona noreste (Tabla. 3a). El límite superior de la *CI* es más profundo en el norte que en el sur del estrecho de Gerlache, las *T* promedio más altas para la capa inferior se encuentran en la zona suroeste (Fig. 7a) y las más bajas en la zona noreste (Fig. 7g; Fig. 7i). Durante el invierno, la columna de agua presenta inestabilidad térmica y se tiene una capa de agua homogénea donde se presentan gradientes verticales de *T* positivos para toda la columna de agua, las *T* y límites de esta capa en la región de estudio son de, -1.22 °C en 10 m a 0.44 °C en 225 m en la zona suroeste (G1), -1.24 °C en 12 m a 0.01 °C en 200 m en la zona central oeste (G2), -1.36 °C en 8 m a -0.38 °C en 475 m en la zona central este (G4), -1.32 °C en 7 m a -0.01 °C en 300 m para (G8), -1.25 °C en 10 m a -0.43 °C en 300 m para (G12), en la zona noreste (Tabla. 3c). El límite superior de la *CI* se encuentra aproximadamente a la misma profundidad tanto al norte como el sur del estrecho de Gerlache, las *T* promedio más altas para la capa inferior se encuentran en la zona suroeste (Fig. 7a) y las más bajas en la zona noreste (Fig. 7g; Fig. 7i).

Asimismo, la *CI* es la capa en donde *S* se estabiliza. En el transcurso del verano, la *S* y límites de la capa en el estrecho son de 34.56 en 208 m a 34.58 en 225 m en la zona suroeste (G1), no se registra *CI* en la zona central oeste (G2) con los datos disponibles, 34.51 en 200 m a 34.56 en 433 m en la zona central este (G4), 34.49 en 183 m a 34.53 en 300 m en (G8), y 34.45 en 158 m a 34.53 en 300 m en (G12), para la zona noreste (Tabla. 4a). El límite superior de la *CI* se encuentra a una profundidad mayor en la zona suroeste (G1) respecto a la zona noreste (G8 y G12), se observan *S* promedio más altas para esta capa en la zona suroeste (Fig. 7b) en comparación con la zona noreste (Fig. 7h; Fig. 7j). En la época de invierno, la *S* y límites de la capa en el estrecho son de 34.57 en 217 m a 34.58 en 225 m en la zona suroeste (G1), no

se registra *CI* en la zona central oeste (G2) con los datos disponibles, 34.56 en 250 m a 34.62 en 475 m en la zona central este (G4), 34.63 en 242 m a 34.65 en 300 m en (G8), y 34.65 en 192 m a 34.69 en 300 m en (G12), para la zona noreste (Tabla. 4c). El límite superior de la *CI* es más profundo en la zona central este (G4) y noreste (G8), se observan las *S* promedio más altas para esta capa en la zona noreste (Fig. 7h; Fig. 7j) y las más bajas en la zona suroeste (Fig. 7a).

5.3 Estabilidad termohalina para 1981-2010 a lo largo del estrecho de Gerlache: criterio de Hesselberg-Svedrup y Frecuencia de Vaisala-Brunt.

De acuerdo con Malinin (1998) (en Villegas 2004), el criterio de Hesselberg-Svedrup denotado por la letra *E* se calcula como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{dS}{dz} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{dT}{dz} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{dT_a}{dz} \quad (1)$$

Donde, $\frac{\partial \rho}{\partial S}$ es la corrección del cambio de la densidad por el cambio de salinidad; $\frac{dS}{dz}$ es el gradiente vertical de salinidad; $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ es la corrección del cambio de densidad por el cambio de temperatura; $\frac{dT}{dz}$ es el gradiente vertical de temperatura; $\frac{dT_a}{dz}$ es el gradiente adiabático de temperatura.

El primer miembro de (1) representa el aporte de la *S* en la estabilidad de la columna de agua y se le denomina *E_s*, los dos miembros restantes de (1) representan el aporte de la *T* en la estabilidad y se les denomina *E_t*, por lo tanto, se tiene que:

$$E = E_s + E_t \quad (2)$$

A la sumatoria de los componentes de *E_s* y *E_t* se le denomina estabilidad termohalina total *E* y es un criterio significativo para comprender cómo se ve afectada la estabilidad vertical en las capas superiores del océano entre las épocas cálidas y frías del año (Villegas 2003). Si *E* > 0 se habla de un equilibrio estable, si *E* < 0 es inestable y si *E* = 0 es indiferente.

5.3.1 Estabilidades Salina y Térmica

Respecto a los perfiles de E_s del promedio multianual del período 1981-2010 para las estaciones G1, G2, G4, G8, y G12 del período base 1981-2010 (Fig. 8a). En los primeros 100 m el aporte de E_s a la estabilidad inicia desde valores mayores a $0.05 \frac{kg}{m^4}$ y menores a $0.15 \frac{kg}{m^4}$. A medida que se desciende, los valores de E_s van en aumento y seguidamente se presenta un pico positivo abrupto para las cinco curvas a 100 m. Por debajo de los 100 m los aportes de E_s a la E total empiezan a menguar y se observa un retroceso a valores cercanos a $0.05 \frac{kg}{m^4}$ para las cinco curvas a profundidades cercanas a los 200 m, seguidamente E_s se estabiliza en cero o valores muy cercanos a cero para profundidades mayores a los 300 m. Por lo tanto, se propone que la condición de E_s para la columna de agua según el aporte salino es: estable de 0 a 300 m e indiferente para profundidades mayores a los 300 m.

En cuanto al comportamiento de E_s , durante el transcurso del año se presenta mayor que cero $E_s > 0$, es decir, estable para todas las épocas del año, a excepción de la primavera especialmente durante el mes de septiembre, en donde normalmente se observan gradientes negativos de la S y $E_s < 0$ en los primeros 25 m de la columna de agua.

Por último, para los perfiles de E_t del promedio multianual para las estaciones G1, G2, G4, G8, y G12 del período 1981-2010 (Fig. 8b). En los primeros 100 m el aporte de E_t inicia en retroceso desde valores positivos cercanos de cero en superficie hasta un pico negativo a los 100 m que se evidencia principalmente en G2. Por debajo de este nivel los aportes de E_t a la E total se mantienen constantes en valores negativos, oscilando alrededor de $-2 \times 10^{-7} \frac{kg}{m^4}$ y $0 \frac{kg}{m^4}$ entre 100 y 200 m. Seguidamente E_t se empieza a acercar a cero en profundidades mayores a los 220 m. Se propone que la condición de estabilidad para la columna de agua según el aporte térmico E_t es: estable de 0 a 50 m e inestable para profundidades mayores a los 50 m.

En cuanto al comportamiento del componente de E_t durante el transcurso del año, $E_t > 0$ se encuentra en equilibrio estable únicamente durante el período más cálido del verano en los meses de enero y febrero, por otro lado, durante la mayor parte del año $E_t < 0$ o generalmente se encuentra en equilibrio inestable en

el transcurso de los meses de otoño, invierno y primavera.

5.3.2 Estabilidad Total y Frecuencia de Vaisala-Brunt

Se muestran los perfiles de E total del promedio multianual para las estaciones G1, G2, G4, G8, y G12 del período 1981-2010 (Fig. 8c). Se observa que las curvas de E son en gran medida idénticas a las curvas del aporte de estabilidad salina E_s . Al calcular la estabilidad total $E = E_t + E_s$, el componente E_t se le puede considerar despreciable pues sus valores afectan muy poco a E total. Es decir, $E \approx E_s$.

Como se menciona previamente en la descripción, a los 100 m de profundidad se observa un pico abrupto positivo para E_s y para E independientemente de la estación, y un pico negativo para E_t a la misma profundidad. Este notable pico positivo de S y negativo de T a los 100 m parece estar relacionado con la intrusión de una masa de agua más cálida y salada a través del estrecho de Bismarck, según se evidencia en los transectos longitudinales de T . Se propone que la condición de E para la columna de agua es: estable de 0 a 300 m e indiferente para profundidades mayores a los 300 m.

El criterio que caracteriza la frecuencia de las oscilaciones verticales en el océano estratificado se denomina Frecuencia de Vaisala-Brunt, denotado por la letra N . Por lo general, los valores mínimos de N en el océano mundial se encuentran entre 10^{-3} y $10^{-4} 1/seg$ y los valores máximos hasta $10^{-2} 1/seg$, para la capa de la termoclina estacional (Villegas 2003).

De acuerdo con Malinin (1998) (en Villegas 2004), N se calcula mediante la ecuación:

$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}} \quad (3)$$

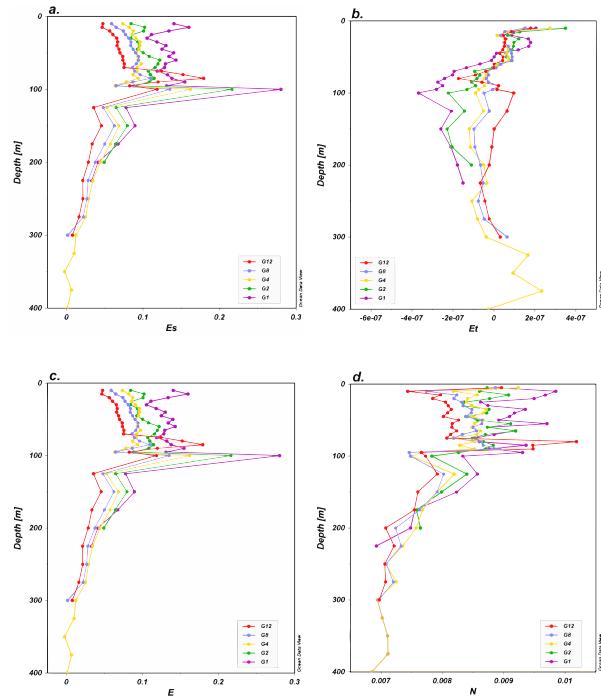
Donde, $g \approx 9.81 \frac{m}{s^2}$; ρ es la densidad; $\frac{d\rho}{dz}$ es el gradiente vertical de densidad.

Considerando los perfiles para N del promedio multianual para las estaciones G1, G2, G4, G8, y G12 del período base 1981-2010 (Fig. 8d) se observa en los primeros 100 m que las frecuencias N inician un ascenso desde valores cercanos de cero en superficie

para todas las curvas. Los valores de N empiezan a aumentar, oscilando entre 0.008 s^{-1} y 0.0095 s^{-1} entre los 0 a 100 m para las cinco estaciones. A medida que se desciende en la profundidad de la columna de agua independientemente de la estación las cinco curvas alcanzan su rango máximo de oscilación cerca de los 100 m de profundidad. Entre los 100 m y 400 m de profundidad se observa lo opuesto, los rangos de oscilación empiezan a disminuir considerablemente para todas las curvas contrayéndose desde 0.008 s^{-1} hasta 0.007 s^{-1} a medida que se desciende en la vertical.

Se observan oscilaciones de N del orden de 0.001 s^{-1} , las curvas se estabilizan en 0.007 s^{-1} o valores cercanos para profundidades mayores a los 300 m para las estaciones seleccionadas. Por lo tanto, se propone que dichos valores de oscilación de la frecuencia N indican que en la región de estudio se presentan procesos de mezcla de aguas principalmente a nivel superficial (0-100) m, en mayor medida en las épocas de verano y en menor medida en invierno. Es posible identificar que las oscilaciones de N se encuentran estrechamente relacionadas con las fluctuaciones de la estabilidad E .

Fig. 8. Perfiles de estabilidad termo-halina: criterio de Hesselberg-Svendrup (a) E_s , (b) E_t (c) E y frecuencia de Vaisala-Brunt (d) N , en estaciones G1, G2, G4, G8 y G12 del estrecho de Gerlache para 1981-2010 calculados con datos del WOA18.



5.3.3 Estructura Fina

Se muestra la estructura fina determinada a partir de las componentes de E total y análisis de T y S en la columna de agua (Fig. 9). Esta se define como capas en donde diferentes mecanismos de estructura fina predominan, se entiende como un modelo de campos físicos representados por una serie de capas en vez de propiedades homogéneas, divididos por capas más delgadas con gradientes pronunciados de T y S . Normalmente en las expediciones oceanográficas la estratificación fina de las capas de agua es testificada por numerosas mediciones realizadas con equipos de sondeo de baja-inercia en particular sondas CTD (Villegas 2004).

La estructura fina de las capas en la columna de agua del estrecho de Gerlache se determina de acuerdo con los valores de los gradientes verticales de T y S , las componentes E_s y E_t , N y un criterio que relaciona los componentes E_t y E_s denominado relación de densidad R_ρ . Según Karlin et al. (1988) (en Villegas 2004), el criterio de relación de densidad R_ρ se calcula mediante la ecuación:

$$R_\rho = -\frac{E_s}{E_t} \quad (4)$$

Son posibles cuatro tipos de estratificación:

1. Estabilidad total o absoluta (EA): $\frac{dT}{dz} > 0, \frac{dS}{dz} < 0, E_t > 0, E_s > 0, R_\rho < 0$
2. Estabilidad por tipo de dedos salinos (DS): $\frac{dT}{dz} < 0, \frac{dS}{dz} < 0, E_t > 0, E_s < 0, R_\rho > 0$
3. Estratificación por tipo de convección por capa (CC): $\frac{dT}{dz} > 0, \frac{dS}{dz} > 0, E_t < 0, E_s > 0, R_\rho > 0$
4. Inestabilidad total (IA): $\frac{dT}{dz} > 0, \frac{dS}{dz} < 0, E_t < 0, E_s < 0, R_\rho < 0$

Basados en estos parámetros y criterios, se muestra la estructura fina a lo largo del estrecho de Gerlache para G1, G2, G4, G8 y G12 en forma de transecto longitudinal para el promedio multianual del período 1981-2010 (Fig. 9). En la zona suroeste G1 predomina la estabilidad total o absoluta (EA) en las capas por encima de los 55 m, por debajo de los 55 m la estratificación por tipo de convección por capa (CC) es observada. Asimismo, en la zona central oeste G2 prevalece EA por encima de los 65 m y por debajo de los 65 m se evidencia CC . En la zona

central este G4 predomina *EA* en capas por encima de los 70m, entre los 70 a 325 m se presenta *CC*, seguidamente entre los 325 a 375 m se observa nuevamente *EA*, entre 375-400 se encuentra estratificación por dedos salinos (*DS*), por último, por debajo de los 400 m domina *CC*. En la zona noreste G8 predomina *EA* en las capas por encima de los 70 m, entre los 70 a 300 m prevalece *CC*, seguidamente entre los 300 a 325 m se observa *DS*. Finalmente, en la zona noreste G12 predomina *EA* en las capas por encima de los 60 m, entre los 60 a 90 m se observa *CC*, seguidamente entre 90 a 150 m se registra *EA*, por debajo de los 150 m domina de nuevo *CC*. En términos generales, en el estrecho de Gerlache, las capas por encima de los 60 m se caracterizan por presentar *EA*, por debajo de los 60 m *CC* prevalece, se observa estratificación por dedos salinos *DS* únicamente entre los 300 a 325 m y 375 a 400 m en las estaciones G4 y G8 respectivamente.

Fig 9. Transecto longitudinal G1-G2-G4-G8-G12 del tipo de estructura fina en capas del estrecho de Gerlache para 1981-2010 calculados con datos del WOA18. **Convenciones:** *EA*- Estabilidad total o absoluta, *CC*- Estratificación por convección por capas, *DS*- Estratificación por dedos salinos.

Capas, m	G1	G2	G4	G8	G12
0-5	EA	EA	EA	EA	EA
5-10	EA	EA	EA	EA	EA
10-15	EA	EA	EA	EA	EA
15-20	EA	EA	EA	EA	EA
20-25	EA	EA	EA	EA	EA
25-30	EA	EA	EA	EA	EA
30-35	EA	EA	EA	EA	EA
35-40	EA	EA	EA	EA	EA
40-45	EA	EA	EA	EA	EA
45-50	CC	EA	EA	EA	EA
50-55	EA	EA	EA	EA	EA
55-60	CC	EA	EA	EA	EA
60-65	CC	EA	EA	EA	CC
65-70	CC	CC	EA	EA	CC
70-75	CC	CC	CC	CC	CC
75-80	CC	CC	CC	CC	CC
80-85	CC	CC	CC	CC	CC
85-90	CC	CC	CC	CC	CC
90-95	CC	CC	CC	CC	EA
95-100	CC	CC	CC	CC	EA
100-125	CC	CC	CC	CC	EA
125-150	CC	CC	CC	CC	EA
150-175	CC	CC	CC	CC	CC
175-200	CC	CC	CC	CC	CC
200-225	CC	CC	CC	CC	CC
225-250	CC	CC	CC	CC	CC
250-275	CC	CC	CC	CC	CC
275-300	CC	CC	CC	CC	CC
300-325	CC	DS	EA		
325-350	EA				
350-375	EA				
375-400	DS				
400-425	CC				
425-450	CC				
450-475	CC				
475-500	EA				

6. Discusión

Primeramente, respecto a los máximos y mínimos, el mes de febrero (Fig. 2a) registra la *TSM* más alta, alcanzando valores de 2.00 °C en la zona central oeste del estrecho de Gerlache (G2). Durante el mes de octubre (Fig. 2e) se registra la *TSM* más baja con -1.84°C en la entrada de la zona suroeste finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando el estrecho de Gerlache (G1). Las *TSM* empiezan a disminuir desde un máximo en febrero hasta un mínimo en julio, durante este período del año las *TSM* más altas se registran en la región central oeste del estrecho (G2) y las más bajas en la región noreste (G9), seguidamente durante los meses de julio a octubre las *TSM* se mantienen en un mínimo entre -2°C y -1°C, luego en octubre inician nuevamente su aumento hasta un máximo en febrero para las cinco curvas (Fig. 4a), durante este período del año las *TSM* más altas se registran en la región central oeste (G5) del estrecho y las más bajas en la región suroeste (G1). El mes de septiembre (Fig. 3a) registra la *SSM* más alta, con valores de 34.4 en la región central este del estrecho de Gerlache (G5). En el mes de febrero se registra la *SSM* más baja con 33.19 en la región suroeste del estrecho de Gerlache (G1). Las *SSM* empiezan a disminuir desde un máximo en septiembre hasta un mínimo en los meses de enero, febrero y marzo, seguidamente inician su aumento nuevamente hasta septiembre para las cinco curvas (Fig. 4b). Durante el transcurso de todo el año las *SSM* más altas se registran en la zona noreste del estrecho (G12) y las más bajas en la zona suroeste (G1).

Según Kerr et al. (2018), durante la expedición Nautilus I en febrero de 2015 se observaron *TSM* más cálidas entre las islas Brabant y Anvers (canal de Schollaert), es decir la zona central oeste (G2) y en el sector del norte de Gerlache, exceptuando la zona de transición entre los estrechos de Gerlache y Bransfield (es decir, G10-G12). Los autores mencionan que hubo una diferencia relativamente pequeña en las temperaturas superficiales promedio entre los sectores de Gerlache norte y sur, principalmente debido a procesos como: intrusiones de cuerpos de aguas cálidas, derretimiento del hielo marino y derretimiento de glaciares. De acuerdo con Hernández et al. (2021), la *TSM* presenta un comportamiento monomodal al **OPA**, con valores altos en febrero y un mínimos en agosto, en el

estrecho de Gerlache los valores de TSM disminuyen desde el noreste (G8 y G12), hacia el sureste (G1 y G2), observándose en la región una diferencia acentuada entre el extremo norte y sur a finales de la primavera y verano.

Asimismo, en Kerr et al. (2018) la distribución de la salinidad en superficie muestra una marcada influencia de aguas de alta salinidad transportadas desde el estrecho de Bransfield en dirección a la zona noreste del estrecho de Gerlache, se menciona un aumento en la proporción de agua dulce por deshielo glacial en la zona suroeste (G1), lo que resulta, en promedio, en aguas superficiales ligeramente más saladas en la zona noreste (G12), resultados que concuerdan con los observados en el presente estudio.

En cuanto a las capas que conforman la columna de agua, *CIT* y *CIH* en donde se presentan propiedades de temperatura y salinidad uniformes, cuentan con una profundidad promedio de 50 m, estas capas se encuentran en constante contacto con la atmósfera, radiación solar, acción del viento y corrientes, siendo expuestas a una activa turbulencia que uniformiza sus propiedades fisicoquímicas (Garrison 2009), presenta ciclos de enfriamiento y calentamiento estacionales que es posible evidenciar en los transectos y perfiles de T y S (Fig. 5-7). Durante el otoño en los meses de marzo y abril (Tabla. 3b) la *CIT* cuenta con su mayor espesor. En los meses de primavera específicamente septiembre (Tabla. 4d) la *CIH* cuenta con su mayor espesor.

Se observa una termoclinia con un espesor máximo para los meses de verano, con un grosor aproximado de 95 m en la zona central (Fig. 7c; Fig. 7e) para el mes de febrero y una termoclinia de mínimo grosor o inexistente para los meses de invierno, en los cuales la columna de agua presenta inestabilidad térmica. La haloclinia cuenta con un espesor máximo para el otoño, con un grosor aproximado de 220 m en la zona central (Fig. 7d; Fig. 7f) para el mes de abril y mínimo para los meses de primavera donde presenta un grosor aproximado de 105 m en la zona central para el mes de septiembre. La picnoclina se constituye como una capa permanente a lo largo de todo el año para la columna de agua estudiada y cuenta con un grosor aproximado de 300 m. Los detalles de cada una de las capas se encuentran consignados en las (Tablas. 3-4). En la *CI* las T son

bajas, las S son altas y las ρ son altas, los gradientes verticales $\frac{dT}{dz}$ y $\frac{ds}{dz}$ se mantienen positivos, pero acercándose a cero, y se aprecia un perfil vertical aproximadamente rectilíneo de T , S y ρ debido a que los parámetros se estabilizan alrededor de un valor constante a medida que se desciende en la columna de agua.

De acuerdo con García et al. (2002), los rangos de T entre -1.8 a 1.0°C y S entre 33.0 a 33.7, corresponden a las denominadas Antarctic Surface Water (**AASW**), las aguas en el estrecho de Gerlache por encima de los 100-150 m se encuentran conformadas principalmente por **AASW**. La dispersión en los perfiles de T y S (Fig. 7) los primeros 150 m de la columna de agua ilustran la variación temporal y espacial que le ocurre a **AASW** durante el transcurso de los doce meses del año. **AASW** muestra una amplia gama de características porque se ve afectada por una gran variedad de mecanismos, incluido el intercambio atmosférico, la formación y derretimiento del hielo marino, e intercambios a lo largo de la picnoclina permanente (Smith et al., 1999). Estos cambios crean una variabilidad considerable en **AASW** durante el transcurso del año.

En el transecto longitudinal de T del mes de agosto (Fig. 5c) durante el invierno se evidencia una capa de agua fría y homogénea de temperaturas inferiores a -1.5°C entre los 0 y 50m que corresponde a la *CIT* en invierno. En García et al. (2002) exponen que las temperaturas más bajas de alrededor de -1.5°C y salinidades de 33.8-34.0 se asocian con las Winter Water (**WW**), las cuales se les considera el miembro terminal de **AASW**. Esta masa de agua se conforma por el enfriamiento de la porción más superficial de la columna de agua durante la época de invierno. **WW** en los transectos de T de invierno comprende entre los 0 y 50 m, posteriormente **WW** se eroda por la mezcla y el calentamiento estacional de la columna de agua durante primavera (Fig. 5d) y verano (Fig. 5a) en las épocas más cálidas del año.

En los transectos longitudinales de T (Fig. 5) se observa la intrusión de un cuerpo de agua más cálidas por las isothermas con valores por encima de los 1.0 °C, entre 200 y 500 m al suroeste (G1) del estrecho de Gerlache, la intrusión se observa con una pendiente hacia arriba en dirección a la plataforma. Asimismo, en los transectos longitudinales de S (Fig.

6) se registra la intrusión por la presencia de isohalinas por encima de 34.7 entre 300 y 500 m al suroeste (G1) del estrecho de Gerlache.

De acuerdo con García et al. (2002) los puntos de datos que presentan T por encima de 1.0°C y S entre 34.60 y 34.73 a profundidades por debajo de los 200 m representan Circumpolar Deep Water (**CDW**), **CDW** se divide en dos tipos o dos variedades, Upper Circumpolar Deep Water (**UCDW**) y Lower Circumpolar Deep Water (**LCDW**), las cuales reflejan diferentes propiedades (Smith et al., 1999). **UCDW** se adentra sobre la plataforma y se mezcla con **AASW** para conformar una versión modificada de **UCDW** denominada (**mUCDW**) (Venables et al., 2017). En transectos longitudinales de T y S (Figs. 5 y 6) se evidencia la intrusión de **mUCDW** entre 250 y 500 m al suroeste (G1) del estrecho de Gerlache.

En un estudio más reciente Torres et al. (2020) también indican que las modified Circumpolar Deep Water (**mCDW**) relativamente cálidas, saladas y poco oxigenadas se adentran en la plataforma continental y dominan el estrecho de Bismarck, desde donde proceden a ingresar al estrecho de Gerlache, especialmente a través de su extremo suroeste (G1). A su vez, las aberturas entre las islas del archipiélago de Palmer (G4) a lo largo del estrecho de Gerlache también proveen conexiones con la plataforma al oeste de la península Antártica por donde puede ingresar **mUCDW** (Torres et al., 2020).

Por otro lado, High Salinity Shelf Water (**HSSW**), que se forma en el mar de Weddell y avanza hacia el sur a lo largo de las cuencas profundas del estrecho de Bransfield entra como agua de fondo en el estrecho de Gerlache a través de su límite norte (Torres et al., 2020). Es posible visualizar la intrusión de **HSSW** en los transectos longitudinales de T (Fig. 5) en la región noreste (G12) del estrecho de Gerlache, donde se observa un cuerpo de agua de T por debajo de los -0.5°C entre los 300 y 500 m durante los meses de verano y otoño. A medida que **HSSW** más densa y fría fluye a través de canales profundos en la batimetría que conectan cuencas profundas en los estrechos de Bransfield y Gerlache, sus propiedades se modifican conformando las modified High Salinity Shelf Waters (**mHSSW**) (Torres et al., 2020).

En cuanto a la E de la columna de agua, evaluada mediante los criterios de Hesselberg- Svedrup y la Frecuencia de Vaisala-Brunt. En los perfiles verticales del aporte termo-halino total E (Fig. 8c), se observa que las curvas de E son en gran medida idénticas a las curvas observadas en E_s (Fig. 8a). Se concluye entonces que el aporte de E_t (Fig. 8b) puede considerarse despreciable, pues comprende valores muy pequeños en comparación con los aportes de E_s , es decir $E \approx E_s$, por lo que se propone que la condición de estabilidad para la columna de agua es: estable de 0 a 300 m e indiferente para profundidades mayores a los 300 m. Además, se propone que para los valores de oscilación de N de la región de estudio (Fig. 8d), se deben presentar procesos de mezcla de aguas principalmente a nivel superficial, en mayor medida en las épocas de verano y en menor medida en invierno. También es posible correlacionar las altas oscilaciones de N y los picos de las curvas de E a 100 m, con la intrusión de **mUCDW**.

Hasta la fecha no hay en la literatura estudios concernientes a la estructura fina en el estrecho de Gerlache. En lo que respecta a la estructura fina (Fig. 9), en términos generales la estructura fina en el estrecho de Gerlache presenta una configuración similar en cortes tanto longitudinales como transversales, las capas por encima de los 60 m se caracterizan por presentar **EA**, por debajo de los 60 m **CC** prevalece, y se observan **DS** únicamente entre los 300 a 325 m y 375 a 400 m en algunas estaciones. Se propone para estudios futuros una caracterización detallada de las propiedades, distribución y comportamiento climatológico anual de las masas de agua en el estrecho de Gerlache mediante datos de reanálisis.

7. Conclusiones

El mes de febrero registra la **TSM** más alta, alcanzando 2.0 °C en la zona central oeste (G2). Durante el mes de octubre se registra la **TSM** más baja con -1.84°C en la entrada de la zona suroeste finalizando el estrecho de Bismarck e iniciando el estrecho de Gerlache (G1). Las **TSM** más altas se registran en la región central oeste del estrecho (G2) y las más bajas en la región noreste (G9).

El mes de septiembre registra la **SSM** más alta con 34.4 en la región central este (G5). En el mes de febrero se registra la **SSM** más baja con 33.19 en la

región suroeste (G1). Durante el transcurso del año las *SSM* más altas se registran en la zona noreste del estrecho (G12) y las más bajas en la zona suroeste (G1).

Se observa una termoclinia con un espesor máximo para los meses de verano, con un grosor aproximado de 90 m en la zona central y una termoclinia de mínimo grosor o inexistente para los meses de invierno, en los cuales la columna de agua presenta inestabilidad térmica. La haloclina cuenta con un espesor máximo para el otoño, con un grosor de 220 m en la zona central y mínimo para los meses de primavera, donde presenta un grosor de 105 m en la zona central. La picnoclina se constituye como una capa permanente a lo largo de todo el año para la columna de agua estudiada y cuenta con un grosor igual o mayor que 300 m.

Los primeros 150 m los perfiles de *T* y *S* de la columna de agua ilustran la variación temporal y espacial que le ocurre a **AASW** durante el transcurso de los doce meses del año. En transectos longitudinales de *T* y *S* se evidencia la intrusión de **mUCDW** entre 250 y 500 m al suroeste (G1) del estrecho de Gerlache. En transectos longitudinales de *T* se evidencia la intrusión de **mHSSW** entre 300 y 500 m al noreste (G12) del estrecho de Gerlache.

Considerando que $E \approx Es$, se propone que la condición de estabilidad termohalina total de la columna de agua es: estable de 0 a 300 m e indiferente para profundidades mayores a los 300 m. Los valores de oscilación de *N* indican procesos de mezcla de aguas principalmente a nivel superficial, en mayor medida en las épocas de verano y en menor medida en invierno. Finalmente, en cuanto a la estructura fina, las capas por encima de los 60 m se caracterizan por presentar *EA*, por debajo de los 60 m la estratificación por *CC* prevalece, y se observa estratificación por *DS* únicamente entre los 300 a 325 m, 325 a 350 m y 375 a 400 m en algunas estaciones.

8. Agradecimientos

A mi directora Nancy Villegas Bolaños, que me brindó la oportunidad de trabajar a su lado, me apoyó y facilitó sus conocimientos, gracias por su paciencia, por orientarme y ayudarme.

A la Universidad Nacional de Colombia por todo lo que me aportó en la continuidad de mi formación, no solo de forma académica sino también humana.

A mi familia por todo su esfuerzo y cariño por intentar proveerme siempre un mejor futuro.

Fecha de entrega: 2 de septiembre del 2021

9. Referencias

- Amos, A., Jacobs, S. S., & Hu, J. H. (1990). RACER : Hydrography of the surface waters during the spring bloom in the Gerlache Strait. *Antarctic Journal of the U.S.*, 25(5), 131–134.
- Azaneu, M., Kerr, R., Mata, M. M., & Garcia, C. A. E. (2013). Trends in the deep Southern Ocean (1958-2010): Implications for Antarctic Bottom Water properties and volume export. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(9), 4213–4227. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20303>
- Burkholder, P. R., & Sieburth, J. M. (1961). Phytoplankton and Chlorophyll in the Gerlache and Bransfield Straits of Antarctica. *Limnology and Oceanography*, 6(1), 45–52. <https://doi.org/10.4319/lo.1961.6.1.0045>
- Comisión colombiana del Oceano. (2014). *Agenda Científica Antártica de Colombia 2014-2035*.
- Doddridge, E. W., & Marshall, J. (2017). Modulation of the Seasonal Cycle of Antarctic Sea Ice Extent Related to the Southern Annular Mode. *Geophysical Research Letters*, 44(19), 9761–9768. <https://doi.org/10.1002/2017GL074319>
- Doval, M. D., Álvarez-Salgado, X. A., Castro, C. G., & Pérez, F. F. (2002). Dissolved organic carbon distributions in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(4–5), 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., Fraser, W. R., Meredith, M. P., Stammerjohn, S. E., Doney, S. C., Martinson, D. G., Sailley, S. F., Schofield, O. M., Steinberg, D. K., Venables, H. J., & Amsler, C. D. (2013). West Antarctic peninsula: An ice-dependent coastal marine ecosystem in transition. *Oceanography*, 26(3), 190–203. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2013.62>
- García, M. A., Castro, C. G., Ríos, A. F., Doval, M. D., Rosón, G., Gomis, D., & López, O. (2002). Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(4–5), 585–602. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00113-8](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00113-8)
- Garrison, T. (2009). Essentials of Oceanography, Fifth Edition. In Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Henley, S. F., Schofield, O. M., Hendry, K. R., Schloss, I. R., Steinberg, D. K., Moffat, C., Peck, L. S., Costa, D. P., Bakker, D. C. E., Hughes, C., Rozema, P. D., Ducklow, H. W., Abele, D., Stefels, J., Van Leeuwe, M. A., Brussaard, C. P. D., Buma, A. G. J., Kohut, J., Sahade, R., ... Meredith, M. P. (2019). Variability and change in the west Antarctic Peninsula marine system: Research

- priorities and opportunities. *Progress in Oceanography*, 173(March 2018), 208–237.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.03.003>
- Hernández, M., Villegas, N., & Concha, A. (2021). Descripción general de algunas variables meteo-marinas de aguas superficiales adyacentes al archipiélago de Palmer, península Antártica, durante 1979-2018 con base en datos Era5. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 50(1), 141–162.
- Isla, E., Masqué, P., Palanques, A., Guillén, J., Puig, P., & Sanchez-Cabeza, J. A. (2004). Sedimentation of biogenic constituents during the last century in western Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica: A relation to currents, primary production, and sea floor relief. *Marine Geology*, 209(1–4), 265–277.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.06.003>
- 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)
- Kerr, R., Goyet, C., da Cunha, L. C., Orselli, I. B. M., Lencina-Avila, J. M., Mendes, C. R. B., Carvalho-Borges, M., 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(February 2015), 182–192.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.07.007>
- Kerr, R., Orselli, I. B. M., Lencina-Avila, J. M., Eidt, R. T., Mendes, C. R. B., da Cunha, L. C., Goyet, C., Mata, M. M., & Tavano, V. M. (2018). Carbonate system properties in the Gerlache Strait, Northern Antarctic Peninsula (February 2015): I. Sea–Air CO₂ fluxes. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 149(xx), 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.02.008>
- Locarnini, R. A., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Boyer, T. P., Zweng, M. M., Garcia, H. E., Reagan, J. R., Seidov, D., Weathers, K. W., Paver, C. R., & Smolyar, I. V. (2019). World Ocean Atlas 2018. Volume 1: Temperature. *NOAA National Centers for Environmental Information*, 1, 1–43.
- Marshall, G. J., Orr, A., van Lipzig, N. P. M., & King, J. C. (2006). The impact of a changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula summer temperatures. *Journal of Climate*, 19(20), 5388–5404.
<https://doi.org/10.1175/JCLI3844.1>
- Massana, R., Taylor, L. T., Murray, A. E., Wu, K. Y., Jeffrey, W. H., & DeLong, F. F. (1998). Vertical distribution and temporal variation of marine planktonic archaea in the Gerlache Strait, Antarctica, during early spring. *Limnology and Oceanography*, 43(4), 607–617.
<https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.4.0607>
- 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), 1–5.
<https://doi.org/10.1029/2005GL024042>
- Organización Meteorológica Mundial. (2021). *Estado del Clima Global 2020* (Issue 1264).
- https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&i_d=21880#YJfRi3VKiHt
- Parkinson, C. L., & Cavalieri, D. J. (2012). Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *Cryosphere*, 6(4), 871–880. <https://doi.org/10.5194/tc-6-871-2012>
- Partes Contratantes. (1959). *Tratado Antártico*. 1–5.
https://documents.ats.aq/keydocs/vol_1/vol1_2_AT_Antarctic_Treaty_s.pdf
- Pritchard, H. D., Ligtenberg, S. R. M., Fricker, H. A., Vaughan, D. G., Van Den Broeke, M. R., & Padman, L. (2012). Antarctic ice-sheet loss driven by basal melting of ice shelves. *Nature*, 484(7395), 502–505.
<https://doi.org/10.1038/nature10968>
- Rodríguez, J., Jiménez-Gómez, F., Blanco, J. M., & Figueira, F. L. (2002). Physical gradients and spatial variability of the size structure and composition of phytoplankton in the Gerlache Strait (Antarctica). *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(4–5), 693–706.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00119-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00119-9)
- Savidge, D. K., & Amft, J. A. (2009). Circulation on the West Antarctic Peninsula derived from 6 years of shipboard ADCP transects. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56(10), 1633–1655.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2009.05.011>
- Schlitzer, R. (2016). *Ocean Data View User's Guide Acknowledgements*. 1–173.
https://odv.awi.de/fileadmin/user_upload/odv/misc/o_dv4Guide.pdf
- 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 changing West Antarctic Peninsula. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 124, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.04.014>
- Smith, D. A., Hofmann, E. E., Klinck, J. M., & Lasara, C. M. (1999). Hydrography and circulation of the West Antarctic Peninsula Continental Shelf. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(6), 925–949.
[https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(98\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(98)00103-4)
- Stammerjohn, S. E., Martinson, D. G., Smith, R. C., Yuan, X., & Rind, D. (2008). Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(3), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2007jc004269>
- Steig, E. J., Schneider, D. P., Rutherford, S. D., Mann, M. E., Comiso, J. C., & Shindell, D. T. (2009). Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, 457(7228), 459–462.
<https://doi.org/10.1038/nature07669>
- Stewart, R. H. (2012). Introduction to Physical Oceanography. *Ocean Yearbook Online*, 4(1), 1–345.
<https://doi.org/10.1163/221160083x00124>
- Torres Parra, R. R., Caicedo Laurido, A. L., & Iriarte Sánchez, J. D. (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.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2020.103278>
- Venables, H. J., Meredith, M. P., & Brearley, J. A. (2017). Modification of deep waters in Marguerite Bay, western

- Antarctic Peninsula, caused by topographic overflows. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 139, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.09.005>
- Villegas, N. (2003). Estabilidad de las aguas del Pacífico colombiano - Mayo 2000. *Boletín Científico CCCP*, 10, 1–11.
- Villegas, N. (2004). Fine Thermohaline Structure of the Colombian Pacific Ocean. *Earth Sciences Research Journal*, 8(1), 45–51.
- Zhou, M., Niiler, P. P., & Hu, J. H. (2002). Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(2), 267–280. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00062-0)
- Zweng, M. M., Reagan, J. R., Seidov, D., Boyer, T. P., Locarnini, R. A., Garcia, H. E., Mishonov, A. V., Baranova, O. K., Weathers, K. W., Paver, C. R., & Smolyar, I. V. (2019). World Ocean Atlas 2018 Volume 2: Salinity. *NOAA Atlas NESDIS 82*, 2, 1–41.