












FLUJOS DE CO₂ EN EL ESTRECHO DE BRANSFIELD Y ALREDEDOR DE LA ISLA ELEFANTE DURANTE EL VERANO AUSTRAL 2018

CO₂ FLUXES IN THE BRANSFIELD STRAIT AND SURROUNDING AREAS OF ELEPHANT ISLAND DURING THE AUSTRAL SUMMER 2018

Wilson Carhuapoma^{1,*}  Michelle Graco¹  Luis Vásquez¹  Jesús Ledesma¹ 
Dimitri Gutiérrez¹  Pedro Tapia²  Katy Medina³  Edwin Loarte³ 
Hairo León³ 

¹ Instituto del Mar del Perú, Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático, Callao, Perú.

² Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Huaraz, Perú.

³ Facultad de Ciencias del Ambiente, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Huaraz, Perú.

* Email: wcarhuapoma@imarpe.gob.pe

Recibido: 31-01-2023, Aceptado: 02-08-2024, Publicado: 15-08-2024

RESUMEN

Del 03 al 15 de enero 2018 (verano austral), se realizó el crucero de investigación ANTAR XXV, abarcando desde la isla Trinidad, por el estrecho de Bransfield, alrededor de la isla Elefante, hasta la bahía Almirantazgo. Se efectuaron 14.970 mediciones superficiales que comprendieron: la presión parcial de CO₂ para determinar los flujos de CO₂ en el estrecho de Bransfield y alrededor de la isla Elefante, así como temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila-*a*; además, se determinaron las masas de aguas transicionales de Bellingshausen (TBW), Weddell (TWW) y del mar de Escocia. También, se identificó el frente de Bransfield, definido por la isoterma de 1 °C el cual se ubicó en la zona intermedia del estrecho, donde los valores del oxígeno disuelto superficial estuvieron entre 330 y 340 μmol kg⁻¹ en la mayor parte del estrecho y valores entre 350 y 360 μmol kg⁻¹ alrededor de la isla Elefante, asociados al deshielo de los glaciares contiguos al continente. Se determinaron concentraciones de clorofila-*a*, como un indicador de fitoplancton y productividad primaria, con concentraciones mayores a 0,7 μg L⁻¹ en las TBW asociado al mayor contenido de nutrientes del derretimiento de los glaciares de las islas Shetland del Sur. La velocidad de los vientos fue menor a 6 m s⁻¹ en el estrecho, mientras que, en los alrededores de la isla Elefante las velocidades fueron cercanas a 10 m s⁻¹. Los valores de $(pCO_2)_{in situ}$ estuvieron entre 427,7 y 574,6 μatm con flujos positivos de CO₂ entre 5 y 20 mmol m⁻² día⁻¹ en el estrecho de Bransfield y para el área alrededor de la isla Elefante entre 25 y 35 mmol m⁻² día⁻¹. Por otra parte, las concentraciones de clorofila-*a* en las masas de agua TBW se asocian con la disminución del pCO_2 del agua de mar y en consecuencia en los flujos de CO₂ en comparación con la zona sur del estrecho cerca de la península que tiene el efecto de las TWW menos productivas. La zona este de la isla Elefante presentó el mayor flujo de CO₂, asociado a los vientos más intensos. Los resultados muestran que el estrecho de Bransfield e Isla Elefante se comportan predominantemente como fuente de CO₂ con un flujo promedio de 11,3 mmol m⁻² día⁻¹.

PALABRAS CLAVE: flujos de CO₂, viento, océano-atmósfera, Bransfield, Antártica

ABSTRACT

From January 3 to 15, 2018 (austral summer), the ANTAR XXV research cruise took place, covering the area from Trinity Island through the Bransfield Strait, around Elephant Island, and up to Admiralty Bay. During this expedition, 14,970 surface measurements were conducted, including the partial pressure of CO₂ to determine the CO₂ fluxes in the Bransfield Strait and around Elephant Island, as well as temperature, salinity, dissolved oxygen, and chlorophyll-*a*. The transitional water masses of Bellingshausen (TBW), Weddell (TWW), and the Scotia Sea were also characterized. The Bransfield Front was identified, defined by the 1 °C isotherm located in the intermediate zone of the strait, where surface dissolved oxygen values ranged from 330 to 340 μmol kg⁻¹ in most of the strait and between 350 and 360 μmol kg⁻¹ around Elephant Island, associated with the melting of glaciers adjacent to the continent. Chlorophyll-*a* concentrations were measured as an indicator of phytoplankton and primary productivity, with values exceeding 0.7 μg L⁻¹ in the TBW, linked to the higher nutrient content from the melting glaciers of the South Shetland Islands. Wind speeds were below 6 m s⁻¹ in the strait, while around Elephant Island, speeds were close to 10 m s⁻¹. The in situ pCO_2 values ranged between 427.7 and 574.6 μatm, with positive CO₂ fluxes from 5 to 20 mmol m⁻² day⁻¹ in the Bransfield Strait and from 25 to 35 mmol m⁻² day⁻¹ around Elephant Island. Additionally, chlorophyll-*a* concentrations in the TBW water masses were associated with decreased seawater pCO_2 and,

COMO REFERENCIAR ESTE ARTÍCULO (APA 7ed): Carhuapoma, W., Graco, M., Vásquez, L., Ledesma, J., Gutiérrez, D., Tapia, P., Medina, K., Loarte, E. & León, H. (2024). Flujos de CO₂ en el estrecho de Bransfield y alrededor de la isla Elefante durante el verano austral 2018. *Bol Inst Mar Perú*, 39(2), e410. <https://doi.org/10.53554/boletin.v39i2.410>

consequently, lower CO₂ fluxes compared to the southern zone of the strait near the peninsula, which is affected by the less productive TWW. The eastern zone of Elephant Island exhibited the highest CO₂ flux, attributed to stronger winds. The results indicate that the Bransfield Strait and Elephant Island predominantly act as a CO₂ source, with an average flux of 11.3 mmol m⁻² day⁻¹.

KEYWORDS: CO₂ fluxes, ocean-atmosphere, Bransfield Strait, Antarctica

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el aumento de las emisiones de CO₂ hacia la atmósfera ha sobrepasado niveles nunca registrados por el hombre. Este incremento es debido a diversas actividades antropogénicas como quema de combustibles fósiles, deforestación de los bosques, producción de cemento, actividades industriales y cambios en el uso de suelos (SABINE *et al.*, 2004; LE QUÉRÉ *et al.*, 2015).

Gran parte de estas emisiones de CO₂ a la atmósfera son absorbidas por las plantas terrestres, mientras que otra parte, por los océanos. Se estima que 30% del CO₂ atmosférico de origen antropogénico es absorbido en la capa superficial de los océanos y de este porcentaje, 20% por la zona polar Antártica, la cual está comprendida por toda el área al sur de los 50°S (TAKAHASHI *et al.*, 1997).

La alta absorción de CO₂ ha provocado una disminución en el pH del océano y a su vez, alteración en el sistema de carbonatos causando el proceso conocido como acidificación de los océanos (DONEY *et al.*, 2009; RAVEN *et al.*, 2005). Las zonas australes y polares se reconocen por jugar un rol clave en el intercambio de gases aire océano y son de gran interés científico, asociado a la disminución de su cobertura de hielo debido al cambio climático. En este contexto, es muy importante el estudio del intercambio de gases de efecto invernadero como es el CO₂, como también de los procesos biológicos, químicos y físicos que controlan este intercambio (LAW *et al.*, 2013). Estos estudios permitirán tener mayor precisión en las proyecciones de los efectos de las emisiones de CO₂ a futuro.

El estrecho de Bransfield es una cuenca oceánica semi-cerrada localizada en la península Antártica entre las latitudes 60 - 64°S, 53 - 62°W. Es una región bajo la influencia de diferentes condiciones oceanográficas químicas, biológicas, masas de agua y regímenes biogeoquímicos (COLLARES *et al.*, 2018; ITO *et al.*, 2018; KERR *et al.*, 2018; DOTTO *et al.*, 2021). Presenta un complejo patrón de circulación influenciado por la Corriente Circumpolar Antártica, siendo esta corriente la que fluye

1. INTRODUCTION

In recent decades, CO₂ emissions into the atmosphere have reached unprecedented levels in human history. This increase is primarily due to various anthropogenic activities, such as the burning of fossil fuels, deforestation, cement production, industrial activities, and changes in land use (SABINE *et al.*, 2004; LE QUÉRÉ *et al.*, 2015).

Terrestrial plants absorb a significant portion of these atmospheric CO₂ emissions, while another substantial amount is absorbed by the oceans. It is estimated that 30% of atmospheric CO₂ from anthropogenic sources is absorbed by the ocean's surface layer, with 20% of this uptake occurring in the Antarctic polar zone, which includes all areas south of 50°S (TAKAHASHI *et al.*, 1997).

This high rate of CO₂ absorption has led to a decrease in ocean pH, altering the carbonate system and causing a process known as ocean acidification (DONEY *et al.*, 2009; RAVEN *et al.*, 2005). The austral and polar regions are recognized for their crucial role in air-sea gas exchange, making them of significant scientific interest due to their diminishing ice coverage resulting from climate change. In this context, it is essential to study the exchange of greenhouse gases, such as CO₂, and the biological, chemical, and physical processes that regulate this exchange (LAW *et al.*, 2013). These studies will improve the accuracy of projections regarding the future impacts of CO₂ emissions.

The Bransfield Strait is a semi-enclosed oceanic basin located on the Antarctic Peninsula between latitudes 60 - 64°S and longitudes 53 - 62°W. This region is influenced by a variety of oceanographic conditions, including chemical and biological processes, water masses, and biogeochemical regimes (COLLARES *et al.*, 2018; ITO *et al.*, 2018; KERR *et al.*, 2018; DOTTO *et al.*, 2021). The strait exhibits a complex circulation pattern affected

alrededor del continente antártico y cruza gran parte del paso Drake. El estrecho de Bransfield y las islas Shetland del Sur generan un obstáculo a la libre circulación de esta corriente, influenciando así a los cambios en el estrecho de Bransfield, junto a otras corrientes que transportan aguas de los mares de Bellingshausen, Weddell y Escocia.

La zona de estudio se encuentra rodeada por el mar de Bellingshausen, el mar de Weddell y el mar de Escocia (GORDON *et al.*, 2000). Esta zona es conocida como la península Antártica norte, la cual se caracteriza por una marcada estacionalidad (RAKUSA-SUSZCZEWSKI, 1996). Dentro del estrecho de Bransfield, se reconocen dos masas de agua de mayor predominancia, con características muy diferenciadas entre sí, como son la temperatura y salinidad, siendo las Aguas Transicionales de Bellingshausen (TBW) que presentan mayor temperatura (0,8 a 1,8 °C) y menor salinidad (33,72 a 34,16) y las Aguas Transicionales de Weddell (TWW) con menor temperatura (-0,92 a 0,66 °C) y mayor salinidad (34,08 a 34,53) (GARCÍA *et al.*, 2002). Las TBW ingresan al estrecho por la zona noroeste y se desplazan hacia el noreste del estrecho cercano a la plataforma de las islas Shetland del sur. Las TWW ingresan al estrecho de Bransfield por la zona sur y fluyen hacia el suroeste del estrecho, cerca de la plataforma continental de la península Antártica (ZHOU *et al.*, 2002; MOROZOV, 2007; SANGRÀ *et al.*, 2011). Las interacciones de ambas masas de agua generan condiciones físicas, químicas y biológicas únicas en este ecosistema que determinan un hábitat ideal para el krill, aves migratorias, cetáceos y pingüinos.

En las últimas décadas, las capas de hielo de la Antártica han perdido masa y volumen, generando aumento en el nivel del mar, condición que es probable se haya intensificado desde el año 1992 debido principalmente al cambio climático (SHEPHERD *et al.*, 2018). En promedio, ambas masas de agua muestran calentamiento de 0,78 °C comparando el periodo 1850-1900 y el periodo 2003-2012 (IPCC, 2014). Algunos estudios han demostrado que existe relación entre los flujos de CO₂ y el derretimiento de los glaciares que se dan en ambientes como la Antártida (rodeados por glaciares y mar). TRANTER *et al.* (2002) señalan que existe cierta influencia de la escorrentía proveniente de la fusión glacial en las concentraciones de CO₂ atmosférico, debido a la influencia de solutos glaciares (sedimentos, fosfatos y silicatos).

by the Antarctic Circumpolar Current, which flows around the Antarctic continent and crosses much of the Drake Passage. The Bransfield Strait and the South Shetland Islands act as barriers to this current, influencing changes within the strait and interacting with other currents that carry waters from the Bellingshausen, Weddell, and Scotia Seas.

The study area is bordered by the Bellingshausen Sea, the Weddell Sea, and the Scotia Sea (GORDON *et al.*, 2000). This region is referred to as the northern Antarctic Peninsula, known for its pronounced seasonality (RAKUSA-SUSZCZEWSKI, 1996). Within the Bransfield Strait, two dominant water masses are identified, each with distinct characteristics such as temperature and salinity. These are the Transitional Bellingshausen Waters (TBW), characterized by higher temperatures (0.8 to 1.8 °C) and lower salinity (33.72 to 34.16), and the Transitional Weddell Waters (TWW), which have lower temperatures (-0.92 to 0.66 °C) and higher salinity (34.08 to 34.53) (GARCÍA *et al.*, 2002). The TBWs enter the strait from the northwest and flow northeastward towards the shelf of the South Shetland Islands. In contrast, the TWWs enter the Bransfield Strait from the south and flow southwestward near the continental shelf of the Antarctic Peninsula (ZHOU *et al.*, 2002; MOROZOV, 2007; SANGRÀ *et al.*, 2011). The interactions between these water masses create unique physical, chemical, and biological conditions in this ecosystem, providing an ideal habitat for krill, migratory birds, cetaceans, and penguins.

The Antarctic ice sheets have lost mass and volume in recent decades, contributing to sea level rise. This condition has likely intensified since 1992, primarily due to climate change (SHEPHERD *et al.*, 2018). On average, both water masses have shown a warming pattern of 0.78 °C when comparing the periods 1850-1900 and 2003-2012 (IPCC, 2014). Some studies have demonstrated a link between CO₂ fluxes and glacier melting in environments like Antarctica, where glaciers and the ocean surround the land. TRANTER *et al.* (2002) noted that glacial runoff influences atmospheric CO₂ concentrations, due to the presence of glacial solutes, such as sediments, phosphates, and silicates.

El océano Austral ha sido reconocido como un importante sumidero de CO₂ y autores como SEJR *et al.* (2011) han encontrado zonas glaciares grandes que actúan como sumideros de CO₂ en este tipo de entornos. Estudios realizados con series de tiempo indican que el efecto como sumidero de CO₂ del océano austral se ha debilitado, aunque, a partir del 2012, empezó nuevamente a intensificarse debido al incremento del CO₂ atmosférico (LANDSCHÜTZER *et al.*, 2015). En el paso Drake, por ejemplo, se ha encontrado incremento en la absorción de CO₂ por parte del océano en los últimos 13 años, con una tendencia de ΔpCO_2 de $-0,37 \pm 0,16 \mu\text{atm yr}^{-1}$ (MUNRO *et al.*, 2015).

Estudios realizados anteriormente en el estrecho de Bransfield, indican que este sistema se puede comportar como fuente o sumidero de CO₂ en los meses de verano austral, desde 1995 hasta 2010 no se ha observado una tendencia definida (Ito *et al.*, 2018; ÁLVAREZ *et al.*, 2002). En el 2015, se registró un comportamiento de fuente en el estrecho de Gerlache (KERR *et al.*, 2018). Los modelos utilizados para estimar cambios climáticos futuros muestran variación estacional, principalmente en otoño debido al incremento de los vientos circumpolares; estos modelos también indican calentamiento superficial del continente (BRACEGIRDLE *et al.*, 2008).

El presente estudio se realizó en el crucero ANTAR XXV durante el verano 2018 en el estrecho de Bransfield y alrededor de la isla Elefante. Se efectuaron mediciones de presión parcial (pCO_2) a fin de conocer los flujos netos de CO₂, comprender mejor el rol de estas áreas como sumideros o fuentes de CO₂ y compararlos con otros estudios realizados durante los últimos años en el estrecho de Bransfield y áreas cercanas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el verano austral del 03 al 15 de enero 2018, se realizó el crucero de investigación ANTAR XXV a bordo del buque oceanográfico polar BAP Carrasco (BOP-171) a cargo de la Marina de Guerra del Perú. Los datos presentados abarcan desde la isla Trinidad, por el estrecho de Bransfield, alrededor de la isla Elefante, hasta la bahía Almirantazgo (Fig. 1).

The Southern Ocean is recognized as a significant CO₂ sink. Researchers such as SEJR *et al.* (2011) have identified large glacial areas that act as CO₂ sinks in these environments. Time series studies indicate that the Southern Ocean's role as a CO₂ sink has weakened, although it began to intensify again starting in 2012, likely due to increased atmospheric CO₂ levels (LANDSCHÜTZER *et al.*, 2015). For example, in the Drake Passage, CO₂ absorption by the ocean has increased over the past 13 years, with a trend in ΔpCO_2 of $-0.37 \pm 0.16 \mu\text{atm yr}^{-1}$ (MUNRO *et al.*, 2015).

Previous studies in the Bransfield Strait indicate that this system can act as either a CO₂ source or sink during the austral summer months. However, from 1995 to 2010, no clear pattern was observed (ITO *et al.*, 2018; ÁLVAREZ *et al.*, 2002). During 2015, the Gerlache Strait showed a source-like behavior (KERR *et al.*, 2018). Models predicting future climate changes reveal seasonal variations, particularly in autumn, due to increased circumpolar winds. These models also project surface warming of the continent (BRACEGIRDLE *et al.*, 2008).

This study was conducted during the ANTAR XXV cruise in the summer of 2018, focusing on the Bransfield Strait and the area surrounding Elephant Island. Partial pressure (pCO_2) measurements were taken to determine the net CO₂ fluxes, to better understand the role of these areas as CO₂ sinks or sources, and to compare these findings with other studies conducted in the Bransfield Strait and nearby regions in recent years.

2. MATERIALS AND METHODS

From January 3rd to 15th, 2018, during the austral summer, the ANTAR XXV research cruise took place aboard the polar oceanographic vessel BAP Carrasco (BOP-171), operated by the Peruvian Navy. This expedition collected data covering the area from Trinity Island through the Bransfield Strait, around Elephant Island, to Admiralty Bay (Fig. 1).

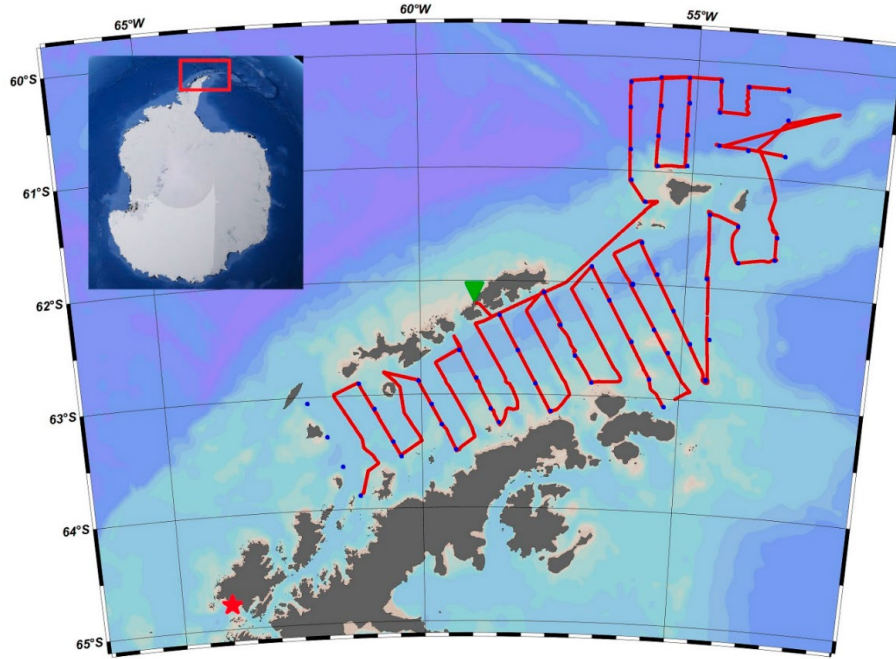


Figura 1.- Península antártica, las islas Shetland del Sur y la isla Elefante. La línea roja continua indica el recorrido del Crucero en enero 2018. La estrella roja indica la estación Palmer de los Estados Unidos de Norteamérica, el triángulo verde la bahía Almirantazgo y los puntos azules indican estaciones fijas

Figure 1. Antarctic Peninsula, South Shetland Islands, and Elephant Island. The solid red line indicates the Cruise's route in January 2018. The red star indicates the U.S. Palmer Station, the green triangle indicates Admiralty Bay, and the blue dots indicate fixed stations

La salinidad, temperatura y $p\text{CO}_2$, se midieron en forma continua, realizándose 14.970 mediciones, se utilizó un termosalinógrafo acoplado a un sensor de $p\text{CO}_2$ modelo $p\text{CO}_2\text{pro CV}$ Oceanus, las mediciones se realizaron cada minuto durante todo el recorrido del buque. El equipo utiliza un detector infrarrojo no dispersivo que facilita la medición de la fracción molar húmeda de CO_2 en fase gaseosa que se encuentra en equilibrio con el agua circundante, por ello, no necesita corrección por efecto de vapor de agua. Además, el sensor tiene compensación de presión por lo cual los datos no necesitan ser corregidos por efecto de presión. Se realizó una corrección por el efecto de la temperatura, teniendo en cuenta que la temperatura del equilibrador no excede en $1\text{ }^\circ\text{C}$ la temperatura *in situ*. La corrección por efecto de temperatura se realizó acorde a TAKAHASHI *et al.* (2009) usando la siguiente ecuación:

Salinity, temperature, and $p\text{CO}_2$ were measured continuously, resulting in 14,970 measurements. A thermosalinograph coupled with a $p\text{CO}_2$ sensor, model $p\text{CO}_2\text{pro CV}$ Oceanus, was employed, capturing data every minute throughout the vessel's journey. This equipment utilizes a non-dispersive infrared detector, which facilitates the measurement of the moist molar fraction of CO_2 in the gas phase that equilibrates with the surrounding water. As a result, no correction for the water vapor effect is required. Additionally, the sensor features pressure compensation, which eliminates the need to adjust the data for pressure effects. A correction was applied for temperature effects, given that the equilibrator temperature does not exceed the *in situ* temperature by more than $1\text{ }^\circ\text{C}$. This temperature correction was performed following TAKAHASHI *et al.* (2009) using the following equation:

$$(p\text{CO}_2)_{in\ situ} = \left[(p\text{CO}_2)_{eq} \right] \text{Exp} \left\{ 0.0433(T_{in\ situ} - T_{eq}) - 4.35 \times 10^{-5} [T_{in\ situ}^2 - T_{eq}^2] \right\} \quad (1)$$

Donde $(p\text{CO}_2)_{in\ situ}$ es la presión parcial del CO_2 en la superficie del agua de mar, $(p\text{CO}_2)_{eq}$

In this equation, $(p\text{CO}_2)_{in\ situ}$ represents the partial pressure of CO_2 at the sea surface,

es la presión parcial del CO₂ en el equilibrador, $T_{in\ situ}$ es la Temperatura *in situ* (°C) y T_{eq} la Temperatura en el equilibrador (°C).

El pCO_2 atmosférico o $(pCO_2)_{aire}$ utilizado para los cálculos de flujos de CO₂ fue 403 μatm , que fue el valor promedio que coincide con el intervalo de medición *in situ* durante el crucero, este valor se obtuvo de la serie de tiempo de la estación Palmer, ubicada en la zona oeste del estrecho de Gerlache, perteneciente a los Estados Unidos de Norteamérica (64,92°S, 64,00°W). Estos datos son reportados por el *Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division* de la NOAA.

En el caso de las velocidades y direcciones del viento, estas se registraron en continuo durante el periodo de muestreo usando una estación meteorológica autónoma *Campbell Scientific*, ubicada a una altura cercana a 10 m. Por otro lado, el ΔpCO_2 se obtuvo mediante la diferencia entre el $(pCO_2)_{in\ situ}$ y el $(pCO_2)_{aire}$. Valores negativos indican absorción de CO₂ en la superficie del océano, mientras que valores positivos indican emisión de CO₂ en la superficie del océano.

Los flujos de CO₂ se determinaron acorde a (WANNINKHOF, 2014), usando la siguiente ecuación:

$$F = 7.7 \times 10^{-4} * U^2 * \Delta pCO_2 \quad (2)$$

Donde F es el flujo de CO₂ en mol m² año⁻¹, U es el promedio de la velocidad del viento en m s⁻¹ y ΔpCO_2 es la diferencia entre $(pCO_2)_{in\ situ}$ y el $(pCO_2)_{aire}$. Usando esta fórmula se obtienen valores mayores en 1% de flujos de CO₂ con respecto al usado por (TAKAHASHI *et al.*, 2009). Para poder comparar los valores de flujo de CO₂, las unidades de mol m² año⁻¹ se convirtieron a mmol m² día⁻¹, multiplicando por 2,74 a los flujos obtenidos en la ecuación (2).

Para el análisis de oxígeno disuelto superficial y clorofila-*a* superficial se tomaron muestras en 63 estaciones usando una roseta de 24 botellas de 5 L de capacidad. Para el análisis de oxígeno disuelto se utilizó el método descrito por GRASSHOFF *et al.* (1999), el cual es una modificación del método de Winkler en agua de mar, calibrando el método mediante la estandarización de la solución de tiosulfato de sodio. La clorofila-*a* se midió mediante el método descrito por YENTSCH & MENZEL (1963)

$(pCO_2)_{eq}$ is the partial pressure of CO₂ within the equilibrador, $T_{in\ situ}$ is the *in situ* temperature (°C), and T_{eq} denotes the temperature in the equilibrador (°C).

The atmospheric pCO_2 or $(pCO_2)_{air}$ used for the CO₂ flux calculations was set at 403 μatm , which was the average value coinciding with the *in situ* measurement interval during the cruise. This value was obtained from the time series data of the Palmer Station, located on the western side of the Gerlache Strait and operated by the United States (64.92°S, 64.00°W). These data are reported by the NOAA Earth System Research Laboratory Global Monitoring Division.

Wind speeds and directions were continuously recorded during the sampling period using a Campbell Scientific autonomous weather station positioned at a height of approximately 10 m. The ΔpCO_2 was calculated as the difference between $(pCO_2)_{in\ situ}$ and $(pCO_2)_{air}$. Negative values indicate the absorption of CO₂ at the ocean's surface, while positive values signify CO₂ emission from the ocean's surface.

The CO₂ fluxes were calculated according to WANNINKHOF, (2014), using the following equation:

$$F = 7.7 \times 10^{-4} * U^2 * \Delta pCO_2 \quad (2)$$

Here, F represents the CO₂ flux in mol m² año⁻¹, U is the average wind speed in m s⁻¹, and ΔpCO_2 is the difference between $(pCO_2)_{in\ situ}$ and $(pCO_2)_{air}$. The use of this formula yields CO₂ flux values that are 1% higher than those calculated using TAKAHASHI *et al.* (2009). To enable comparison with other CO₂ flux studies, the units of mol m² year⁻¹ were converted to mmol m² day⁻¹, by multiplying the flux values obtained from equation (2) by 2.74.

Samples for surface dissolved oxygen and surface chlorophyll-*a* were collected at 63 stations using a 24-bottle rosette, with each bottle having a 5-liter capacity. The analysis of dissolved oxygen followed the method described by GRASSHOFF *et al.* (1999), a modified version of the Winkler method for seawater. This involved calibrating the technique by standardizing the sodium thiosulfate solution. Chlorophyll-*a* was measured using the fluorometry technique described by YENTSCH &

usando la técnica de fluorimetría, la calibración se realizó usando ampollas de clorofila-*a* de *Anacystis nidulans* de 1 mg.

3. RESULTADOS

MASAS DE AGUA SUPERFICIALES

Se identificaron las aguas transicionales de Bellingshausen (TBW), con temperaturas entre 1 y 2 °C y salinidad entre 33,8 y 34,2. Con respecto a las masas de agua transicionales de Weddell (TWW) se encontraron temperaturas entre -0,7 y 1 °C, y la salinidad se registró entre 34,2 y 34,5 es decir, más frías y con mayor salinidad que las primeras. Estos datos obtenidos son similares a los encontrados por GARCÍA *et al.* (2002) al oeste del estrecho de Bransfield (Fig. 2a, 2b). Se encontró aguas del mar de Escocia en la zona norte de la isla Elefante, con temperaturas entre 1,2 y 1,8 °C y salinidades entre 33,6 y 33,8. El frente de Bransfield (FB), definido por la isoterma de 1 °C (LÓPEZ *et al.*, 1999) se ubicó en la zona intermedia del estrecho de Bransfield (Fig. 2b).

MENZEL (1963) with calibration carried out using 1 mg chlorophyll-*a* ampoules from *Anacystis nidulans*.

3. RESULTS

SURFACE WATER MASSES

The transitional Bellingshausen waters (TBW) were identified with temperatures ranging from 1 to 2 °C and salinities between 33.8 and 34.2. In contrast, the transitional Weddell waters (TWW) exhibited temperatures from -0.7 to 1 °C, with salinity levels recorded between 34.2 and 34.5, indicating they are colder and saltier than the TBW. These findings are consistent with those GARCÍA *et al.* (2002) reported in the western Bransfield Strait (Fig. 2a, 2b). The waters from the Scotia Sea were located in the northern region of Elephant Island, with temperatures ranging from 1.2 to 1.8 °C and salinity levels between 33.6 and 33.8. The Bransfield Front (BF), defined by the 1 °C isotherm (LÓPEZ *et al.*, 1999), was situated in the central area of the Bransfield Strait (Fig. 2b).

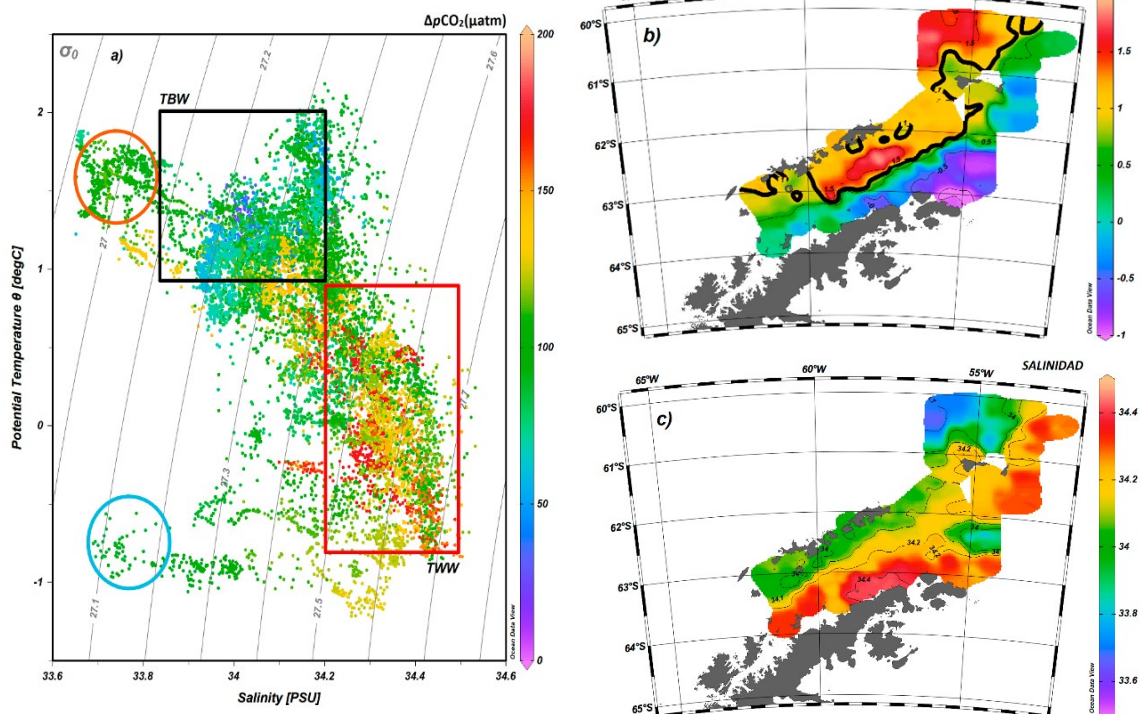


Figura 2.- a) Diagrama T-S de las aguas superficiales en el estrecho de Bransfield, el cuadro negro muestra a TBW, el cuadro rojo muestra a TWW, el círculo naranja corresponde a las masas del agua del mar de Escocia, el círculo celeste a un núcleo de agua de mezcla entre TBW y TWW, b) Temperatura superficial (°C), la línea negra muestra la isoterma de 1 °C considerado como el frente de Bransfield (BF), c) Salinidad superficial

Figure 2. a) T-S diagram of surface waters in the Bransfield Strait, where the black square represents TBW, the red square denotes TWW, the orange circle corresponds to the Scotia Sea water masses, and the light blue circle indicates a mixing core of TBW and TWW. b) Surface temperature (°C), with the black line representing the 1 °C isotherm, marking the Bransfield Front (BF). c) Surface salinity

Oxígeno disuelto y clorofila-a

Las concentraciones de oxígeno disuelto presentaron distribución superficial heterogénea. Se detectaron concentraciones menores a 330 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ en la zona suroeste cerca al estrecho de Gerlache, entre 330 y 340 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ en la mayor parte del estrecho de Bransfield y valores mayores a 340 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ en toda la zona noreste alrededor de la isla Elefante y en el límite del mar de Weddell (Fig. 3a). Las concentraciones de clorofila-a presentaron valores menores a 0,3 $\mu\text{g L}^{-1}$ próximos a la Península Antártica, influenciadas por las TWW; mientras que, las concentraciones mayores a 0,7 $\mu\text{g L}^{-1}$ se encontraron cerca de las islas Shetland del Sur y 0,5 $\mu\text{g L}^{-1}$ alrededor de la isla Elefante influenciadas por las TBW (Fig. 3b). En general, las concentraciones de clorofila-a presentaron valores menores a 1 $\mu\text{g L}^{-1}$.

DISSOLVED OXYGEN AND CHLOROPHYLL-A

Dissolved oxygen concentrations exhibited a heterogeneous surface distribution. Levels below 330 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ were detected in the southwestern region near the Gerlache Strait, with concentrations ranging from 330 to 340 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ across most of the Bransfield Strait, and values exceeding 340 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ in the entire northeastern area around Elephant Island and at the boundary of the Weddell Sea (Fig. 3a). Chlorophyll-a concentrations showed values below 0.3 $\mu\text{g L}^{-1}$ near the Antarctic Peninsula, influenced by the TWW, while concentrations greater than 0.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ were found near the South Shetland Islands and 0.5 $\mu\text{g L}^{-1}$ around Elephant Island, influenced by the TBW (Fig. 3b). Overall, chlorophyll-a concentrations were below 1 $\mu\text{g L}^{-1}$.

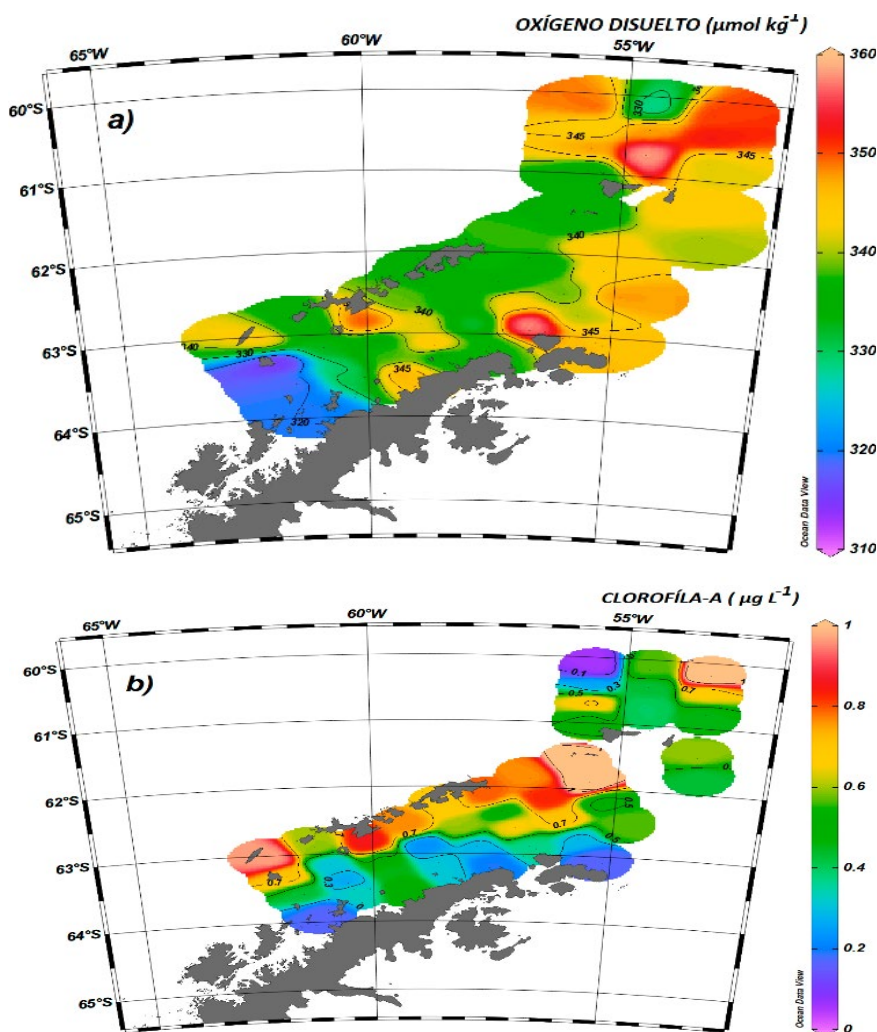


Figura 3.- Distribución superficial de a) Oxígeno disuelto ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), b) Clorofila-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)
 Figure 3. Surface distribution of a) Dissolved oxygen ($\mu\text{mol kg}^{-1}$), b) Chlorophyll-a ($\mu\text{g L}^{-1}$)

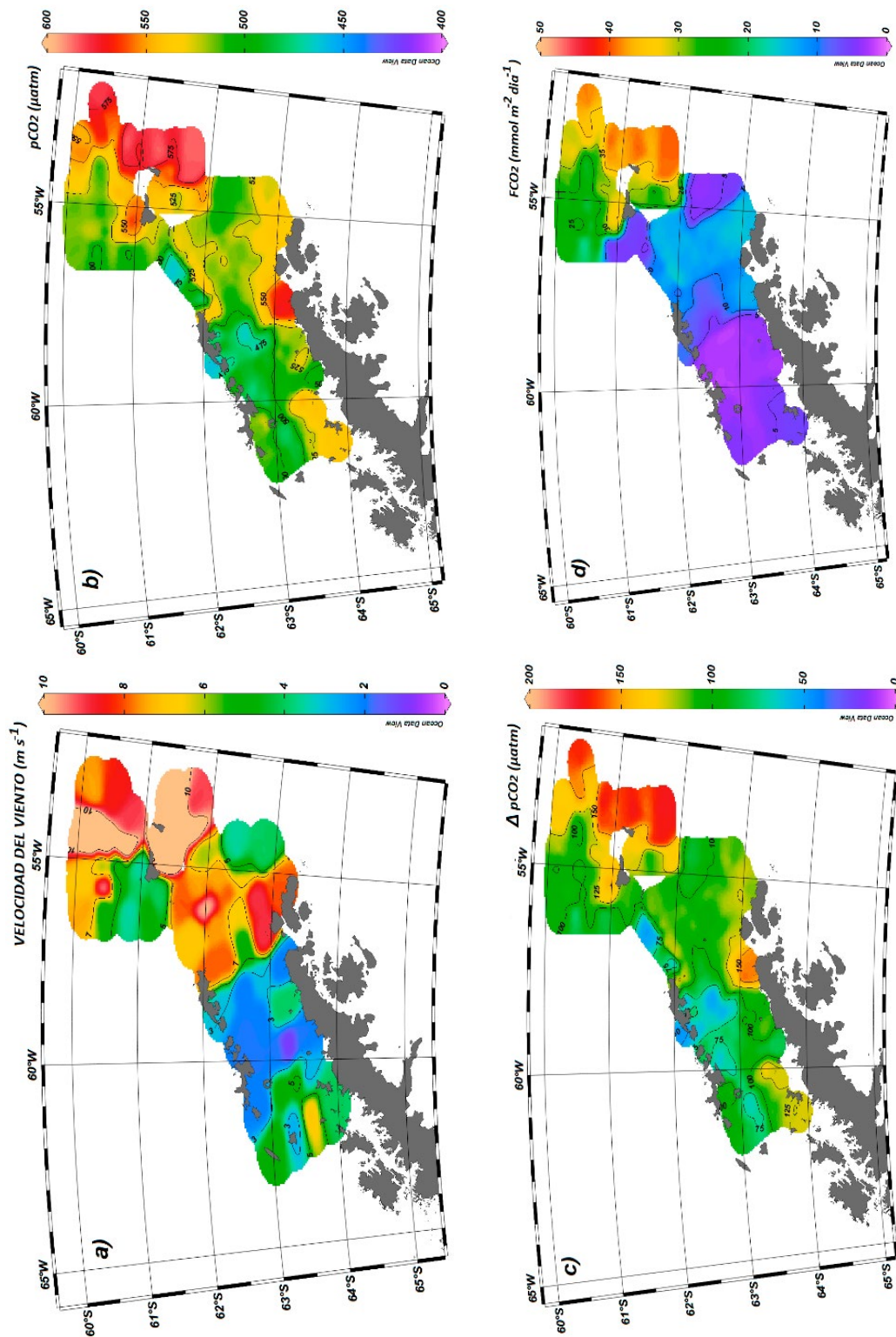


Figura 4.- Distribución superficial de a) velocidad del viento, b) presión parcial de CO₂, c) diferencia entre pCO₂ *in situ* y pCO₂ aire, d) Flujos de CO₂

Figure 4. Surface distribution of a) wind speed, b) partial pressure of CO₂, c) difference between pCO₂ *in situ* and pCO₂ air, d) CO₂ fluxes

FLUJOS NETOS DE CO₂ ENTRE EL OCEANO Y LA ATMÓSFERA

Dentro del estrecho de Bransfield, se registraron velocidades del viento menores a 6 m s⁻¹ y en la zona noroeste, alrededor de la isla Elefante, valores cercanos a 10 m s⁻¹ (Fig. 4a). Se midieron

NET CO₂ FLUXES BETWEEN THE OCEAN AND THE ATMOSPHERE

In the Bransfield Strait, wind speeds were recorded at less than 6 m s⁻¹, while in the northwest area surrounding Elephant Island, speeds were close to 10 m s⁻¹ (Fig. 4a). (pCO₂) *in situ*

valores de $(pCO_2)_{in\ situ}$ entre 427,7 y 574,6 μatm , de los cuales los valores más altos fueron registrados en el lado este de la isla Elefante; mientras que, los más bajos fueron registrados alrededor de la isla Rey Jorge. También, se observó que el $(pCO_2)_{in\ situ}$ de 500 μatm coincidió con el frente de Bransfield (isoterma de 1 °C) (Fig. 4b).

Teniendo en cuenta los 403 μatm de $(pCO_2)_{aire}$ registrado en la estación Palmer (E.E.U.U.), en la presente investigación se determinó que los valores de ΔpCO_2 estuvieron entre 24,7 y 171,6 μatm . Cabe agregar que todos los valores de ΔpCO_2 fueron positivos, evidenciando que el contenido de CO_2 en el agua de mar del estrecho de Bransfield es mayor al CO_2 atmosférico. Esto último indicó que el estrecho se comporta como una fuente de CO_2 , con transferencias del océano hacia la atmósfera con valores entre 5 y 20 $\text{mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$; mientras que, alrededor de la isla Elefante los flujos variaron de 25 a 35 $\text{mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, siendo menores en la isla del Rey Jorge y la Península Antártica donde alcanzaron entre 3 y 15 $\text{mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La variabilidad superficial de las condiciones hidrográficas dentro del estrecho de Bransfield resulta de la interacción de dos masas de agua, las Aguas Transicionales de Bellingshausen (TBW) registradas en la zona noroeste y las Aguas Transicionales de Weddell (TWW) al sureste del estrecho de Bransfield (SANGRÀ *et al.*, 2011). Los resultados de este estudio mostraron presencia de TBW y TWW, siendo las primeras menos frías y menos salinas que las segundas (Fig. 2), que coinciden con estudios previos en el área (GRELOWSKI *et al.*, 1986; LÓPEZ *et al.*, 1999). Sin embargo, se ha observado que en el frente de Bransfield (FB), ambas masas de agua interactúan y la intensidad de sus flujos determinan la posición del frente de Bransfield (FB) (LÓPEZ *et al.*, 1999). En la zona norte de la isla Elefante se encontró presencia de aguas del mar de Escocia, los valores bajos de salinidad se deben a la influencia del borde sur de la corriente circumpolar antártica, la interacción de estas aguas de baja salinidad y temperaturas más elevadas, generan otro frente que se une al frente del Bransfield (WHITWORTH *et al.*, 1994; PALMER *et al.*, 2012).

values ranged from 427.7 to 574.6 μatm , with the highest measurements recorded on the eastern side of Elephant Island, while the lowest values were recorded around King George Island. Additionally, $(pCO_2)_{in\ situ}$ levels of 500 μatm was observed to align with the Bransfield Front (1 °C isotherm) (Fig. 4b).

With the $(pCO_2)_{air}$ recorded at 403 μatm at Palmer Station (U.S.A.), this study determined that ΔpCO_2 values ranged from 24.7 to 171.6 μatm . Notably, all ΔpCO_2 values were positive, indicating that the CO_2 content in the seawater of the Bransfield Strait is higher than the atmospheric CO_2 . This suggests that the strait functions as a source of CO_2 , with ocean-to-atmosphere transfer rates between 5 and 20 $\text{mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$. Around Elephant Island, the fluxes varied from 25 to 35 $\text{mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, while in the vicinity of King George Island and the Antarctic Peninsula, the rates ranged from 3 to 15 $\text{mmol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The surface variability of hydrographic conditions within the Bransfield Strait arises from the interaction between two water masses: the Transitional Bellingshausen Waters (TBW) found in the northwest area and the Transitional Weddell Waters (TWW) located to the southeast of the Bransfield Strait (SANGRÀ *et al.*, 2011). Our results indicated the presence of both TBW and TWW, with TBW being relatively warmer and less saline compared to TWW (Fig. 2). These findings are consistent with previous research conducted in the region (GRELOWSKI *et al.*, 1986; LÓPEZ *et al.*, 1999). However, it has been observed that at the Bransfield Front (BF), these two water masses interact, and the intensity of their flows determines the position of the BF (LÓPEZ *et al.*, 1999). The presence of waters from the Scotia Sea was detected north of Elephant Island. The low salinity values are attributed to the influence of the southern edge of the Antarctic Circumpolar Current. The interaction of these low-salinity waters with higher temperatures creates another front that joins the Bransfield Front (WHITWORTH *et al.*, 1994; PALMER *et al.*, 2012).

El estrecho recibe un importante aporte de deshielo de la península Antártica y las islas que lo rodean (KERR *et al.*, 2018; MOFFAT & MEREDITH, 2018). En el caso de la isla Elefante, trabajos recientes mostraron cómo el glaciar Endurance ha retrocedido 4,5 km² de 1990 a 2015 (PELTO, 2016); mientras que, varios glaciares de la isla del Rey Jorge, para el mismo intervalo de tiempo, han retrocedido 20,5 km² (RÜCKAMP *et al.*, 2011). Junto con este derretimiento de los glaciares, además de agua dulce se aporta gran cantidad de sedimentos y nutrientes (nitrógeno, fósforo, nitratos, fosfatos y silicatos) a las costas marinas beneficiando el crecimiento de fitoplancton, el cual también se asocia a las aguas cálidas y ricas en nutrientes de las aguas de Bellingshausen (TBW) (PAPARAZZO, 2003; PICHLMAIER *et al.*, 2004). Por ello, las concentraciones de clorofila-*a* fueron mayores en las zonas cercanas a la isla del Rey Jorge (~0,7 µg L⁻¹) y la isla Elefante (~0,5 µg L⁻¹) y esto afecta la *p*CO₂ que se refleja en los menores flujos de CO₂. Esta disminución en los flujos de CO₂ hacia la atmósfera es debido a la fijación del carbono mediante el consumo de CO₂ por el fitoplancton, en otros sistemas se encontró que una fijación intensa genera flujos negativos, comportándose como sumidero (ROBERTSON & WATSON, 1995; MONTEIRO *et al.*, 2020).

Las concentraciones de clorofila-*a* son menores en la zona sureste del estrecho de Bransfield debido al efecto de las TWW, aguas de reciente formación, caracterizadas por mayor salinidad y menores concentraciones de nutrientes (GONÇALVES-ARAÚJO *et al.*, 2015). Si bien la temperatura en las zonas próximas a estos glaciares disminuye ~1,2 °C por el retroceso del glaciar (BAYLÓN, 2019), este efecto es contrarrestado por la TBW (1-2 °C) que tienen una dirección de flujo de oeste a este dentro del estrecho de Bransfield (GARCÍA *et al.*, 2002).

En la zona sureste del estrecho de Bransfield, se da la convergencia entre masas de agua provenientes de este estrecho y el de Gerlache. En esta zona, la distribución superficial del oxígeno disuelto presentó valores menores a 330 µmol kg⁻¹ y estos resultados no son anómalos, sino característicos de la zona. Posiblemente, se den por una mezcla de capas de aguas en el fondo que luego se desplazan hacia el estrecho de Bransfield (GARCÍA *et al.*, 2002).

The Bransfield Strait receives substantial meltwater input from the Antarctic Peninsula and the surrounding islands (KERR *et al.*, 2018; MOFFAT & MEREDITH, 2018). Recent studies have shown that the Endurance Glacier on Elephant Island has retreated by 4.5 km² from 1990 to 2015 (PELTO, 2016). Similarly, glaciers on King George Island have experienced a retreat of 20.5 km² over the same period (RÜCKAMP *et al.*, 2011). In addition to freshwater, this glacial melting also supplies a significant amount of sediments and nutrients (nitrogen, phosphorus, nitrates, phosphates, and silicates) to the coastal areas, promoting phytoplankton growth. This growth is also associated with the warm, nutrient-rich Bellingshausen waters (TBW) (PAPARAZZO, 2003; PICHLMAIER *et al.*, 2004). As a result, higher chlorophyll-*a* concentrations were observed in the vicinity of King George Island (~0.7 µg L⁻¹) and Elephant Island (~0.5 µg L⁻¹), influencing *p*CO₂ levels, and originating reduced CO₂ fluxes. This decrease in CO₂ flux to the atmosphere is attributed to carbon fixation through CO₂ uptake by phytoplankton. In other systems, intense carbon fixation can lead to negative fluxes, indicating a sink behavior (ROBERTSON & WATSON, 1995; MONTEIRO *et al.*, 2020).

Chlorophyll-*a* concentrations are lower in the southeastern region of the Bransfield Strait due to the influence of the TWW, which are characterized by higher salinity and lower nutrient concentrations due to their recent formation (GONÇALVES-ARAÚJO *et al.*, 2015). Although the temperature in areas near these glaciers decreases by approximately 1.2 °C as a result of glacier retreat (BAYLÓN, 2019), this effect is offset by the TBWs, which have temperatures ranging from 1-2 °C and flow from west to east within the Bransfield Strait (GARCÍA *et al.*, 2002).

In the southeastern area of the Bransfield Strait, there is a convergence of water masses originating from both the Bransfield Strait and the Gerlache Strait. In this region, the surface distribution of dissolved oxygen showed values below 330 µmol kg⁻¹, which are characteristic rather than anomalous. This is likely due to the mixing of deeper water layers that subsequently migrate into the Bransfield Strait (GARCÍA *et al.*, 2002).

En promedio, las masas de agua en toda la zona del estrecho de Gerlache contienen 231,6 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ de oxígeno disuelto, donde las mayores concentraciones se registraron cerca del estrecho de Bransfield. KERR *et al.* (2018) explicaron que las concentraciones de oxígeno disuelto más elevadas, se deben al ingreso de Aguas de la Plataforma de Alta Salinidad (HSSW) provenientes del mar de Weddell que se mezclan con Aguas Circumpolares Profundas (UCDW).

En cambio, el ingreso de las TBW por la zona norte del estrecho de Bransfield confirió mayores temperaturas que las TWW y concentraciones relativamente bajas de oxígeno disuelto, cercanos a 330 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, alrededor de las islas Shetland del Sur. Por otro lado, las altas concentraciones de oxígeno disuelto mayores a 340 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ alrededor de la isla Elefante fueron debido, primordialmente, a la mayor intensidad del viento, siendo la interacción océano-atmósfera el principal forzante de las mayores concentraciones de oxígeno disuelto y en menor grado a la abundancia de fitoplancton.

Los valores de $(p\text{CO}_2)_{in situ}$ menores a 520 μatm fueron registrados alrededor de la isla Rey Jorge y cercanos al frente de Bransfield, estos están asociados a la mayor cantidad de fitoplancton evidenciado por mayores concentraciones de clorofila-*a*. En consecuencia, los valores bajos de $(p\text{CO}_2)_{in situ}$ pueden atribuirse a la remoción de CO_2 por el fitoplancton en el proceso de fotosíntesis (Ito *et al.*, 2018; RUIZ-HALPERN *et al.*, 2014) (Tabla 1). Los valores más altos de $(p\text{CO}_2)_{in situ}$ al lado este de la isla Elefante y en la zona sur del estrecho de Bransfield (cerca de la península Antártica), se asociaron a una menor concentración de fitoplancton debido a la presencia de TWW.

On average, the water masses throughout the Gerlache Strait contain 231.6 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ of dissolved oxygen, with higher concentrations recorded near the Bransfield Strait. According to KERR *et al.* (2018), the elevated concentrations of dissolved oxygen are the result of High Salinity Shelf Water (HSSW) from the Weddell Sea mixing with Upper Circumpolar Deep Water (UCDW).

In contrast, the inflow of TBW from the northern area of the Bransfield Strait leads to higher temperatures when compared to TWW and relatively low dissolved oxygen concentrations, around 330 $\mu\text{mol kg}^{-1}$, near the South Shetland Islands. Meanwhile, high dissolved oxygen concentrations exceeding 340 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ around Elephant Island are primarily due to the increased wind intensity, with ocean-atmosphere interactions being the main factor driving these higher concentrations, supplemented by the abundance of phytoplankton.

The values of $(p\text{CO}_2)_{in situ}$ less than 520 μatm were recorded around King George Island and near the Bransfield Front, where higher concentrations of phytoplankton were evident from the elevated chlorophyll-*a* concentrations. Consequently, the low $(p\text{CO}_2)_{in situ}$ values can be attributed to CO_2 removal by phytoplankton during photosynthesis (Ito *et al.*, 2018; RUIZ-HALPERN *et al.*, 2014) (Table 1). The highest $(p\text{CO}_2)_{in situ}$ values were observed on the eastern side of Elephant Island and in the southern region of the Bransfield Strait (near the Antarctic Peninsula), which were linked to lower phytoplankton concentrations due to the occurrence of TWW.

Tabla 1.- Comparación de valores de $p\text{CO}_2$ *in situ*, $\Delta p\text{CO}_2$ (μatm) y FCO_2 en el estrecho de Bransfield y alrededores, en diferentes años. Entre paréntesis se indica la desviación estándar

Table 1. Comparison of $p\text{CO}_2$ *in situ*, $\Delta p\text{CO}_2$ (μatm), and FCO_2 values in and around Bransfield Strait in different years. Standard deviation is indicated in parentheses

Referencia Reference	Región-año Region-year	$p\text{CO}_2$ <i>in situ</i> (μatm)	$p\text{CO}_2$ aire (μatm)	$\Delta p\text{CO}_2$ (μatm)	FCO_2 ($\text{mmol m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
En este artículo In this paper	Bransfield-2018	507,6 ($\pm 29,35$)	403	104,60 ($\pm 29,35$)	11,30 ($\pm 10,85$)
Kerr <i>et al.</i> 2018	Gerlache- 2015	545,9 ($\pm 84,1$)*	395,7	150,3 ($\pm 84,1$)	16,7 ($\pm 14,90$)
	2008	370,7 ($\pm 23,2$)	372,5 ($\pm 4,5$)	-1,9 ($\pm 21,3$)	-0,3 ($\pm 3,4$)
Ito <i>et al.</i> 2018	Bransfield 2009	391,5 ($\pm 24,4$)	371,3 ($\pm 2,8$)	20,1 ($\pm 23,6$)	3,6 ($\pm 4,2$)
	2010	361,3 ($\pm 27,6$)	376,8 ($\pm 1,8$)	-15,5 ($\pm 27,3$)	-3,4 ($\pm 5,9$)
Alvarez <i>et al.</i> 2002	Bransfield 1995,	372 ($\pm 10,0$)*	358,5	13,5	1,3 ($\pm 1,1$)
	1996	342 ($\pm 26,0$)*	358,5	-16,5	-0,9 ($\pm 1,6$)

* Usando ecuaciones del sistema de carbonatos / Using equations of the carbonate system

Los valores de ΔpCO_2 fueron positivos, evidenciando que el contenido de CO₂ en el agua de mar del estrecho de Bransfield fue mayor al CO₂ atmosférico y en consecuencia presentó comportamiento de fuente. Nuestros resultados en el presente trabajo, al igual que otros trabajos (e.g., KERR *et al.*, 2018) sugieren que el sistema tiene una tendencia a ser una fuente de CO₂, con flujos en promedio hacia la atmósfera de $11,30 \pm 10,85$ mmol m⁻² día⁻¹, que son similares a los encontrados por KERR *et al.* (2018) de $16,7 \pm 14,90$ mmol m⁻² día⁻¹ (Tabla 1). Uno de los principales factores identificados como forzante del aumento de los flujos fue el incremento en la intensidad de los vientos en el estrecho de Bransfield y principalmente alrededor de la isla Elefante. En efecto, se encontraron velocidades de viento cercanas a 10 m s⁻¹ alrededor de la isla Elefante donde se observaron los valores más altos de $(pCO_2)_{in situ}$ mientras los valores más bajos se presentaron alrededor de la isla Rey Jorge. Sin embargo, los valores de $(pCO_2)_{in situ}$ no se han mantenido constantes en el tiempo, ya que valores más bajos al atmosférico fueron reportados en estudios previos, en 1995 (ÁLVAREZ *et al.*, 2002) y en 2009 (ITO *et al.*, 2018).

Con estos resultados, se puede concluir que el estrecho de Bransfield y alrededor de la isla Elefante, muestran un comportamiento como fuente de CO₂ hacia la atmósfera, lo cual coincide con lo reportado por otros autores. Los flujos de CO₂ respondieron a los vientos y a las características de las masas de agua que determinan la variación de clorofila-*a*. En el estrecho de Bransfield el aporte de nutrientes por las TBW y por el retroceso continuo de los glaciares ubicados en la zona norte y noreste del estrecho de Bransfield determinaron zonas de mayor productividad, donde disminuyó la $(pCO_2)_{in situ}$ mientras que las TWW se asocian con menor productividad y mayores flujos de CO₂ sobre todo al este de la isla Elefante donde se encontraron vientos más intensos.

The positive $(pCO_2)_{in situ}$ values indicate that the concentration of CO₂ in the seawater of the Bransfield Strait is higher than in the atmosphere, behaving as a CO₂ source. Our findings, consistent with previous research (e.g., KERR *et al.*, 2018), suggest that this system typically acts as a CO₂ source, with an average flux to the atmosphere of 11.30 ± 10.85 mmol m⁻² day⁻¹. These figures align closely with those reported by KERR *et al.* (2018) who documented fluxes of 16.7 ± 14.90 mmol m⁻² day⁻¹ (Table 1). A significant factor contributing to the increased CO₂ flux is the strengthening of winds in the Bransfield Strait, especially around Elephant Island. Indeed, wind speeds close to 10 m s⁻¹ were observed near Elephant Island, where the highest $(pCO_2)_{in situ}$ values were measured, while the lowest were found near King George Island. Nevertheless, $(pCO_2)_{in situ}$ levels have not remained constant over time, as lower atmospheric values were reported in earlier studies conducted in 1995 (ÁLVAREZ *et al.*, 2002) and 2009 (ITO *et al.*, 2018).

These results allow us to conclude that the Bransfield Strait and the area surrounding Elephant Island behave as a CO₂ source to the atmosphere, consistent with reports from other authors. The CO₂ fluxes are influenced by wind conditions and the characteristics of the water masses, which also affect the variation in chlorophyll-*a* levels. In the Bransfield Strait, the nutrient input from the TBW and the ongoing retreat of glaciers in the northern and northeastern regions have created areas of higher productivity, leading to reduced $(pCO_2)_{in situ}$ levels. In contrast, the TWW is associated with lower productivity and higher CO₂ fluxes, especially to the east of Elephant Island, where more intense winds have been observed.

5. REFERENCIAS

- ÁLVAREZ, M., RIOS A. & ROSÓN G. (2002). Spatio-temporal variability of air-sea fluxes of carbon dioxide and oxygen in the Bransfield and Gerlache Straits during Austral summer 1995-96. *Deep-Sea Research Part II-Tropical Studies in Oceanography*, 49, 643-662. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00116-3)
- BAYLÓN, M. (2019). *Variación espacial e interanual del fitoplancton durante los veranos australes de la ensenada Mackellar-Isla Rey Jorge, Antártica: 2008-2013* [Tesis para optar el Grado Académico de Magister en Ecosistemas y Recursos Acuáticos con mención en Ecosistemas Acuáticos]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Biológicas. Unidad de Posgrado. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10494>
- BRACEGIRDLE, T. J., CONNOLLEY, W. M. & TURNER, J. (2008). Antarctic climate change over the twenty first century. *Journal of Geophysical Research*, 113, D03103. <https://doi.org/10.1029/2007JD008933>

- COLLARES, L. L., MATA, M. M., KERR, R., ARIGONY-NETO, J. & BARBAT, M. M. (2018). Iceberg drift and ocean circulation in the northwestern Weddell Sea, Antarctica. *Deep Res. Part II Top Stud Oceanogr*, 149, 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.02.014>
- DONEY, S. C., FABRY, V. J., FEELY, R. A. & KLEYPAS, J. A. (2009). Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 169-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>
- DOTTO, T. S., MATA, M. M., KERR, R., & GARCIA, C. A. E. (2021). A novel hydrographic gridded data set for the Northern Antarctic Peninsula. *Earth Syst. Sci. Data*, 13(2), 671-696. <https://doi.org/10.5194/essd-13-671-2021>
- GARCÍA, M. A., CASTRO, C. G., RIOS, A. F., DOVAL, M. D., ROSÓN, G., GOMIS, D. & LÓPEZ, O. (2002). Water masses and distribution of physic-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)
- GONÇALVES-ARAÚJO, R., SILVA DE SOUZA, M., TAVANO, V. M. & EIRAS, C. A. (2015). Influence of oceanographic features on spatial and interannual variability of phytoplankton in the Bransfield Strait, Antarctica. *Journal of Marine Systems*, 142, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.09.007>
- GORDON, A. L., MENSCH, M., DONG, Z., SMETHIE JR., W. M. & DE BETTENCOURT, J. (2000). Deep and bottom water of the Bransfield Strait eastern and western basins. *Journal of Geophysical Research* 105(C5), 11337-11346. <https://doi.org/10.1029/2000JC900030>
- GRASSHOFF, K. KREMLING, K. & EHRHARDT, M. (Eds.). (1999). *Methods of Seawater Analysis*. Wiley-VCH, Verlag GmbH. <https://doi.org/10.1002/9783527613984>
- GRELOWSKI, A., MAJEWICZ, A. & PASTUSZAK, M. (1986). Mesoscale hydrodynamic processes in the region of the Bransfield Strait and the southern part of Drake Passage during BIOMASS-SIBEX 1983/1984. *Polish Polar Research*, 7(4), 353-369. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133413197>
- ITO, R. G., TAVANO, V. M., BORGES, C. R. & EIRAS, C. A. (2018). Sea-air CO₂ fluxes and pCO₂ variability in the Northern Antarctic Peninsula during three summer periods (2008-2010). *Deep-Sea Research Part II: Tropical studies in oceanography*, 149, 84-98. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.09.004>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R. K. Pachauri & L. Meyer (Eds.)]. https://epic.awi.de/id/eprint/37530/1/IPCC_AR5_SYR_Final.pdf
- KERR, R., ORSELLI, I. B. M., LENCINA-ÁVILA, J., EIDT, R. T., MENDES, C., 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, 171-181. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2017.02.008>
- LANDSCHÜTZER, P., GRUBER, N., HAUMANN, F. A., RÖDENBECK, C., BAKKER, D. C., VAN HEUVEN, S., HOPPEMA M., METZL, N., SWEENEY, C., TAKAHASHI, T., TILBROOK, B. & WANNINKHOF, R. (2015). The reinvigoration of the Southern Ocean carbon sink. *Science*, 349(6253), 1221-1224. <https://doi.org/10.1126/science.aab2620>
- LAW, C., BREVIERE, E., LEEUW, G., GARCON, V., GUIEU, C., KIEBER, D., KONTRADOWITZ, S., PAULMIER, A., QUINN, P., SALTZMAN, E., STEFELS, J. & VON GLASOW, R. (2013). Evolving research directions in Surface Ocean-Lower Atmosphere (SOLAS) science. *Environ. Chem.*, 10, 1-16. <https://doi.org/10.1071/EN12159>
- LE QUÉRE, C., MORIARTY, R., ANDREW, R. M., CANADELL, J. G., SITCH, S., KORSBAKKEN, J. I., FRIEDLINGSTEIN, P., PETERS, G. P., ANDRES, R. J., BODEN, T. A., HOUGHTON, R. A., HOUSE, J. I., KEELING, R. F., TANS, P., ARNETH, A., BAKKER, D. C. E., BARBERO, L., BOPP, L., CHANG, J., ... ZENG, N. (2015). Global Carbon Budget 2014. *Earth System Science Data*, 7(2), 349-396. <https://doi.org/10.5194/essd-7-349-2015>
- LÓPEZ, O., GARCÍA, M.A., GOMIS, D., ROJAS, P., SOSPEDRA, J. & SÁNCHEZ-ARCILLA, A. (1999). Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica). *Deep-Sea Research I*, 46(10), 1755-1778. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00017-5)
- MOFFAT, C. & MEREDITH, M. (2018). Shelf-ocean exchange and hydrography west of the Antarctic Peninsula: a review. *Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 376(2122), 20170164. <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0164>
- MONTEIRO, T., KERR, R. & DA COSTA MACHADO, E. (2020). Seasonal Variability of net sea-air CO₂ fluxes in a coastal region of the northern Antarctic Peninsula. *Scientific Reports*, 10, 14875. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71814-0>
- MOROZOV, E. G. (2007). Currents in Bransfield Strait. *Doklady Earth Sciences*, 415A(6), 984-986. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07060347>
- MUNRO, D. R., LOVENDUSKI, N. S., TAKAHASHI, T., STEPHENS, B. B., NEWBERGER, T. & SWEENEY, C. (2015). Recent evidence for a strengthening CO₂ sink in the Southern Ocean from carbonate system measurements in the Drake Passage (2002-2015). *Geophysical Research Letter*, 42(18), 7623-7630. <https://doi.org/10.1002/2015GL065194>
- PALMER, M., GOMIS, D., FLEXAS, M., JORDÁ, G., JULLION, L., TSUBOUCHI, T. & NAVEIRA GARABATO, A. C. (2012). Water mass pathways and transports over the South Scotia Ridge west of 50°W. *Deep-Sea Research I*, 59, 8-24. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.10.005>
- PAPARAZZO, F. E. (2003). *Evaluación de nutrientes inorgánicos en aguas oceánicas y su relación con la biomasa fitoplanctónica*. [Tesis para optar el Título Profesional en Ciencias Biológicas]. Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Facultad de Ciencias Naturales.
- PELTO, M. (4 de enero de 2016). *Endurance Glacier, Elephant Island Retreat*. AGU Advancing Earth and Space Science.
- PICHLMAIER, M., AQUINO, F., DA SILVA, C., & BRAUN, M. (2004). Suspended sediments in Admiralty Bay, King George Island (Antarctica). *Pesquisa Antártica Brasileira*, 4, 77-85.
- RAKUSA-SUSZCZEWSKI, S. (1996). Spatial and seasonal variability of temperature and salinity in Bransfield strait and Admiralty Bay, Antarctica. *Polish Polar Research*, 17(1-2), 29-42.
- RAVEN, J., CALDEIRA, K., ELDERFIELD, H., HOEGH-GULDBERG, O., LISS, P., RIEBESELL, U., SHEPHERD, J., TURLEY, C., & WATSON, A. (2005). *Ocean Acidification due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. The Royal Society.

- ROBERTSON, J. & WATSON, A. (1995). A summer-time sink for atmospheric carbon dioxide in the Southern Ocean between 88°W and 80°E. *Deep Sea Research II*, 42(4-5), 1081-1091. [https://doi.org/10.1016/0967-0645\(95\)00067-Z](https://doi.org/10.1016/0967-0645(95)00067-Z)
- RÜCKAMP, M., BRAUN, M., SUCKRO, S. & BLINDOW, N. (2011). Observed glacial changes on the King George Island ice cap, Antarctica, in the last decade. *Global and Planetary Change*, 79(1-2), 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.009>
- RUIZ-HALPERN, S., CALLEJA, M., DACHS, J., DEL VEN-TO, S., PASTOR, M., PALMER, M., AGUSTÍ, S. & DUARTE, C. (2014). Ocean-atmosphere exchange of organic carbon and CO₂ surrounding the Antarctic Peninsula. *Biogeosciences*, 11(10), 2755-2770. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2755-2014>
- SABINE, C. L., FEELY, R. A., GRUBER, N., KEY, R. M., LEE, K., BULLISTER, J. L., WANNINKHOF, R., WONG, C. S., WALLACE, D. W. R., TILBROOK, B., MILLERO, F. J., PENG, T. H., KOZYSR, A., ONO, T. & RIOS, A. F. (2004). The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682), 367-371. <https://doi.org/10.1126/science.1097403>
- SANGRÀ, P., GORDO, C., HERNÁNDEZ-ARENCIBIA, M., MARRERO-DÍAZ, A., RODRÍGUEZ-SANTANA, A., STEGNER, A., MARTÍNEZ-MARRERO, A., PELEGRÍ, J.L. & PICHON, T. (2011). The Bransfield current system. *Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers*, 58(4), 390-402. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2011.01.011>
- SEJR, M., KRAUSE-JENSEN, D., RYSGAARD, S., SORENSEN, L. L., CHRISTENSEN, P. B., & GLUD, R. N. (2011). Air-sea flux of CO₂ in arctic coastal waters influenced by glacial melt water and sea ice. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 63(5), 815-822. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2011.00540.x>
- SHEPHERD, A., IVINS, E., RIGNOT, E., SMITH, B., VAN DEN BROEKE, M., VELICOGNA, I., WHITEHOUSE, P., BRIGGS, K., JOUGHIN, I., KRINNER, G., NOWICKI, S., PAYNE, T., SCAMBOS, T., SCHLEGE, N., GERUO, A., AGOSTA, C., AHLSTRØM, A., BABONIS, G., BARLETTA, V., ... WOUTERS, B. (2018). Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*, 558, 219-235. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y>
- TAKAHASHI, T., FEELY, R. A., WEISS, R. F., WANNINKHOF, R. H., CHIPMAN, D. W., SUTHERLAND, S. C. & TAKAHASHI, T. T. (1997). Global air-sea flux of CO₂: An estimate based on measurements of sea-air pCO₂ difference. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 94(16), 8292-8299. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.16.8292>
- TAKAHASHI, T., SUTHERLAND, S. C., WANNINKHOF, R., SWEENEY, C., FEELY, R. A., CHIPMAN, D. W., HALES, B., FRIEDERICH, G., CHAVEZ, F., SABINE, C., WATSON, A., BAKKER, D. C. E., SCHUSTER, U., METZL, N., YOSHIKAWA-INOUE, H., ISHII, M., MIDORIKAWA, T., NOJIRI, Y., KÖRTZINGER, A., ... BAAR, H. J. W. D. (2009). Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO₂, and net sea-air CO₂ flux over the global oceans. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(8-10), 554-577. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.009>
- TRANter, M., HUYBRECHTS, P., MUNHOVEN, G., SHARP, C., BROWN, G., JONES, I. W., HODSON, A. J., HODGKINS, R. & WADHAM, J. L. (2002). Direct effect of ice sheets on terrestrial bicarbonate, sulphate and base cation fluxes during the last glacial cycle: minimal impact on atmospheric CO₂ concentrations. *Chemical Geology*, 190(1-4), 33-44. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00109-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00109-2)
- WANNINKHOF, R. (2014). Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnol. Oceanogr. Methods*, 12(6), 351-362. <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
- WHITWORTH III, T., NOWLIN JR., W., ORSI, A. H., LOCARNINI, R. A. & SMITH, S. G. (1994). Weddell sea shelf water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia confluence. *Deep-Sea Research I*, 41(4), 629-641. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0967-0637(94)90046-9)
- YENTSCH, C. & MENZEL, D. (1963). A Method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 10(3), 221-231. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(63\)90358-9](https://doi.org/10.1016/0011-7471(63)90358-9)
- ZHOU, M., NIILER, P.P. & HU, J.H. (2002). Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep Sea Res. Part I: Ocean. Res. Pap.*, 49(2), 267-280. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(01\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(01)00062-0)