



Estrutura termohalina e massas de água ao norte da Península Antártica revelada a partir de dados in situ coletados por elefantes-marinhos do sul (*Mirounga leonina*)

doi: 10.4136/ambi-agua.893

**Marcelo Freitas Santini^{1*}; Mônica M. C. Muelbert²; Ronald Buss de Souza¹;
Ilana E. K. C. Wainer³; Mark A. Hindell⁴**

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais –INPE – SP, Brasil
CRS-Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

²Instituto Oceanográfico, Universidade Federal do Rio Grande – IO-FURG – RN, Brasil

³Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo – IOUSP – SP, Brasil

⁴Antarctic Wildlife Research Unit, University of Tasmania, Australia

*Autor correspondente: e-mail: marcelo.santini@inpe.br,
ronald@dsr.inpe.br, monica.muelbert@furg.br,
wainer@usp.br, mark.hindell@utas.edu.au

RESUMO

A Península Antártica Oeste é uma das regiões do planeta que está se aquecendo rapidamente e apresenta alta diversidade animal principalmente ao longo de sua plataforma continental. Esta região também é de grande importância devido à mistura causada pela interação de águas do Mar de Weddell (MW), do Estreito de Bransfield (EB) e da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) que transmitem características termohalinas e nutrientes de diferentes locais de formação e mais tarde se conectam com todos os oceanos do planeta. Entretanto, estudos sobre a variabilidade temporal das condições oceanográficas desta região que consequentemente determinam a formação de massas d'água, são escassos em função das dificuldades logísticas envolvidas em levantamentos oceanográficos e monitoramentos tradicionais durante os meses de inverno. Para esse trabalho, variações da estrutura termohalina e das massas d'água nas proximidades e abaixo do gelo marinho na região norte da Península Antártica (PA) e Mar da Escócia (ME) foram registradas entre os meses de fevereiro e novembro de 2008 por duas fêmeas de elefante-marinho do sul (EMS, *Mirounga leonina*) instrumentadas com *Conductivity–Temperature–Depth/Satellite-Relay Data Logger* (CTD–SRDL). 1330 perfis verticais de temperatura e salinidade foram coletados por estes indivíduos que foram instrumentados pelo Projeto MEOP-BR na Ilha Elefante, Shetlands do Sul. Esses perfis, juntamente com diagramas de estado espalhado permitiram a identificação de massas d'água e suas alterações na estrutura vertical oceânica. Dentre as massas d'água identificadas citamos: Água de Superfície Antártica (AASW), Água de Inverno (WW), Água Cálida Profunda (WDW), Água Cálida Profunda Modificada (MWDW), Água Circumpolar Profunda (CDW), Água Profunda Circumpolar Superior (UCDW), Água Profunda Circumpolar Inferior (LCDW) e Água de Plataforma de Gelo (ISW). Nossos resultados mostram que a estrutura vertical oceânica sofre alterações que tradicionalmente não podem ser monitoradas, principalmente durante o inverno austral, e que os EMS são importantes e modernas plataformas para coleta de dados oceanográficos, permitindo um aumento em nosso conhecimento dos processos oceanográficos na região antártica.

Palavras-chave: Estrutura termohalina, massas de água, península Antártica, elefante-marinho do sul, oceano austral.

Thermohaline structure and water masses in the north of Antarctic Peninsula from data collected *in situ* by southern elephant seals (*Mirounga leonina*)

ABSTRACT

The Western Antarctic Peninsula is rapidly warming and exhibits high indices of biodiversity concentrated mostly along its continental shelf. This region has great importance due to the the mixing caused by the interaction of waters from Weddell Sea (MW), Bransfield Strait (EB) and the Antarctic Circumpolar Current (CCA) transmits thermohaline characteristics and nutrients of different sites and finally connects with all the world's oceans. However, studies focusing on the temporal variability of the region's oceanographic conditions that finally determine the water mass formation are sparse due to the logistical difficulties of conducting oceanographic surveys and traditional monitoring during the winter. For this study, variations of the thermohaline structure and water masses in the vicinity and below the sea ice in the North of the Antarctic Peninsula (AP) and Scotia Sea (SS) were recorded between February and November 2008 by two female southern elephant seals (SES, *Mirounga leonina*) tagged with Conductivity–Temperature–Depth/Satellite-Relay Data Logger (CTD–SRDL). One thousand three hundred and thirty vertical profiles of temperature and salinity were collected by seals which were tagged by the MEOP-BR Project team at the Elephant Island, South Shetlands. These profiles, together with spread state diagrams allowed the identification of water masses and their variances in the ocean's vertical structure. Among the set of identified water masses we cite: Antarctic Surface Water (AASW), Winter Water (WW), Warm Deep Water (WDW), Modified Warm Deep Water (MWDW), Circumpolar Deep Water (CDW), Upper Circumpolar Deep Water (UCDW), Lower Circumpolar Deep Water (LCDW) and Ice Shelf Water (ISW). Our results show that the oceanic vertical structure undergoes changes that cannot be traditionally monitored, particularly during the Austral winter and that SES are important and modern oceanographic data collection platforms allowing for the improvement of our knowledge of oceanographic processes in the Antarctic region.

Keywords: Thermohaline structure, water masses, Antarctic peninsula, southern elephant seal, austral ocean.

1. INTRODUÇÃO

Dificuldades na realização de medidas *in situ* no Oceano Austral (OA) comprometem o entendimento deste sistema, dificultando a interpretação da influência das mudanças climáticas sobre esta região (Hofmann e Klinck, 1998; Boehme et al., 2009; Gordon, 1966). A maioria das medições realizadas nesta área se concentra durante o verão austral, quando a ausência de gelo marinho permite a navegação e possibilita a realização de expedições científicas. A concentração de dados obtidos nessa época faz com que os resultados encontrados sejam extremamente tendenciosos, não revelando a variabilidade associada às verdadeiras feições oceânicas entre o final do outono e final da primavera e fazem com que abaixo do gelo marinho, o Oceano Antártico permaneça pouco ou praticamente sem observações (Hofmann e Klinck, 1998; Boehme et al., 2009).

Graças ao avanço da microeletrônica, foram desenvolvidas plataformas remotas de coletas de dados (PCDs) que por possuírem sensores de pressão, temperatura e condutividade atuam como mini-CTDs (*Conductivity-Temperature-Depth*). Essas plataformas, por serem

relativamente pequenas, puderam ser fixadas em predadores topo de cadeia trófica e utilizadas como alternativa para coleta e transmissão de dados oceanográficos em tempo quase real (Charrassin et al., 2008). Diversos mamíferos marinhos, inclusive os elefantes marinhos do sul (EMS, *Mirounga leonina*), habitam oceanos sazonalmente cobertos de gelo, e regularmente mergulham abaixo e nas proximidades do gelo onde muitas técnicas observacionais não podem operar efetivamente (Biuw et al., 2007).

Motivado pelo sucesso do Projeto SEaOS (*Southern elephant seals as oceanographic samplers*), que aumentou cerca de 30 vezes o número de perfis oceanográficos coletados ao sul da latitude 60 °S durante o ano de 2005 (Charrassin et al., 2008), durante o 4º Ano Polar Internacional foi idealizado e executado o Projeto MEOP (*Marine Mammal Exploration of the Oceans Pole to Pole*). O projeto MEOP, através da ação conjunta de nove países, instrumentou simultaneamente mamíferos marinhos no Ártico e na Antártica objetivando os estudos comportamental e coleta de dados oceanográficos. Como contrapartida a esse projeto internacional, o MEOP-BR foi estabelecido no Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e instrumentou com mini-CTDs 32 indivíduos de EMS entre 2008 e 2010 na Ilha Elefante (IE, 61.2°S 55.3°W), norte do Estreito de Bransfield (EB), Antártica.

A região de estudo (Figura 1), composta pelas áreas a noroeste do Mar de Weddell (MW), o Mar de Escócia (ME) e a porção norte do EB, tem sido objeto de investigação de diversos autores (Gordon et al., 1977; Patterson e Sievers, 1980; Whitworth III et al., 1994; Muench e Gun, 1990; Orsi et al., 1995). A grande maioria desses autores, porém, utiliza dados de expedições científicas coletados durante uma única época do ano, o verão austral (Meredith et al., 2011), o que causa uma grande tendência nos resultados apresentados pois exclui a variabilidade sazonal dos mesmos.

O ME (Figura 1) é uma bacia relativamente pequena no sudoeste do setor Atlântico do OA. Este é contornado por uma batimetria acidentada a norte, sul e leste (Elevação Norte do Mar da Escócia (ENME), Elevação Sul do Mar da Escócia (ESME) e pelo Arco das Ilhas Sandwich do Sul, respectivamente) estando aberto para Passagem de Drake (PD) no Oeste. A bacia central é geralmente mais profunda que 3000 m, com relativamente poucas características topográficas onde a bacia leste tem a mais complexa batimetria. As Ilhas Georgia do Sul estão na porção final leste da Cordilheira Norte do Mar da Escócia (CNME), a leste é a passagem mais profunda, que permite trocas entre a bacia do Mar da Escócia e a Bacia da Georgia do Sul a norte (Thorpe et al., 2002). O ME é limitada pela Terra do Fogo, Ilhas Georgia do Sul (IGS), Ilhas Sandwich do Sul (ISdS), Ilhas Orcadas do Sul (IOrS) e pela Península Antártica (PA), contornado a oeste pela PD. A separação das águas do MW e do ME é denominada Confluência Weddell-Escócia (Gordon, 1967), onde há mistura de águas da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) e do Giro de Weddell (GW) com águas da plataforma noroeste do MW (Whitworth III et al., 1994).

A Confluência Weddell-Escócia (CWE) é considerada uma região de grande mistura de massas d'água devido à forte turbulência gerada pela elevação de águas originadas no MW ao atravessar a ESME e pelo cisalhamento do CCA com GW (Franco et al., 2007). O ME pode ser um importante contribuinte para a mistura de massas d'água necessária para o balanço da circulação de revolvimento oceânico global (Heywood et al., 2002). Este fato é importante para melhor quantificar quanto desta água densa e profunda entra através bacia da ESME. Além disso, o monitoramento desta região melhoraria as estimativas do transporte meridional de águas profundas do OA, o que levará a uma maior compreensão do clima global e sua variabilidade (Franco et al., 2007).

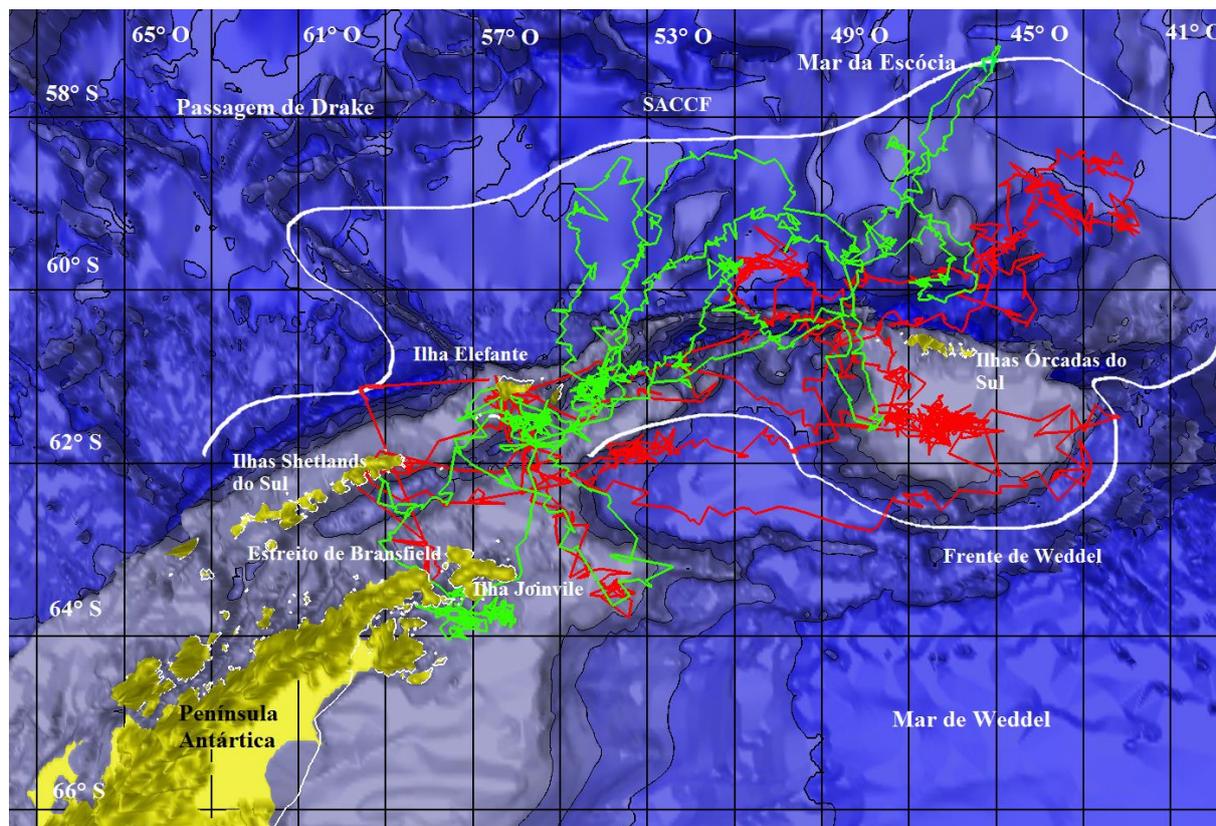


Figura 1. Localização dos perfis coletados na região norte da península Antártica pelos CTD 42 (06/02 à 29/08 – linha verde) e CTD 46 (04/02 à 15/11 – linha vermelha) e batimetria com isóbatas de 1000 m. Na figura estão representadas a frente sul da corrente circumpolar Antártica (SACCF) e a frente de Weddell (FW), demarcando o limite sul da confluência Weddell-Escócia (CWE). Estão também evidenciadas a península Antártica, as ilhas orcadadas do sul, o estreito de Bransfield, as ilhas Shetlands do sul, a ilha Joinville, o mar de Escócia, o mar de Weddell e a passagem de Drake.

As regiões do ME próximas ao norte da PA sofrem influência do regime de circulação atmosférica, formação e derretimento de gelo marinho, e através da circulação local de diferentes áreas oceânicas adjacentes. Os processos de inclusão e transporte se dão com águas de origem do EB, MW e da CCA (Whitworth III et al., 1994). No verão, a cobertura de gelo se restringe à porção mais oeste do MW enquanto que, no inverno, a extensão de gelo marinho cobre o MW e avança centenas de quilômetros na direção do ME (Muench et al., 1992). Porém, algumas características são dominantes, gerando um padrão nas massas d'água presentes.

Como características termohalinas das massas d'água presentes na região, a Água de Superfície Antártica (AASW), possui valores de temperatura potencial (Θ) menores que 1 °C e valores de salinidade entre 33.0 e 34.50 psu, sendo definida pela sua localização acima de 200 m na coluna d'água e não por valores fixos de temperatura potencial e salinidade. Essa massa d'água é relacionada com a alta variabilidade existente na sua região de formação devido à variação sazonal de temperatura. Devido à maior incidência do sol no verão há, consequentemente, um maior derretimento do gelo marinho e também uma dessalinização da água. Entretanto, as águas superficiais frias e mais salinas são formadas por convecção no inverno e persistem durante os meses de verão abaixo da camada superficial aquecida (Gordon e Huber, 1984). A água que é formada da camada de mistura durante o inverno e

permanece próxima a superfície (até ~ 100 m), é denominada de Água de Inverno (WW) e se identifica por valores de temperatura potencial menores que -1.7 °C e salinidade entre 34.3 e 34.44 psu. Entre 200 m e 1500 m de profundidade, a coluna d'água é preenchida em sua camada intermediária pela água cálida profunda (WDW), com temperatura potencial e salinidade entre 0 °C e 1 °C, 34.6 e 34.75 psu, respectivamente. A WDW é relativamente quente, salina e menos oxigenada do que as demais massas d'água da região. A WDW é resultante da mistura entre a água circumpolar profunda (CDW), a WW e as camadas inferiores da AASW que ocorre à medida que a CDW entra no MW e segue a circulação do GW. A CDW, que é formada principalmente pela água profunda circumpolar Inferior (LCDW) presente na circulação da CCA, é oriunda da água profunda do Atlântico norte, o que marca seu sinal de alta salinidade (Mantyla e Reid, 1983). A WDW está sujeita a outros processos de mistura com a AASW, WW e a água de plataforma (SW) próxima das margens continentais. Os índices termohalinos utilizados neste trabalho para as diversas massas d'água descritas para a região desse estudo estão apresentados na Tabela 1.

Neste trabalho são apresentados perfis verticais das variáveis termohalinas e diagramas de estado espalhado (Θ -S) construídos a partir de dados de salinidade e temperatura coletados por duas fêmeas adultas de EMS na região norte da PA e ME em 2008. Objetiva-se descrever a variabilidade espaço-temporal das massas d'água e as alterações da estrutura vertical oceânica entre os meses de fevereiro e novembro de 2008 a fim de contribuir para um melhor conhecimento oceanográfico da região de estudo. O presente trabalho também objetiva comprovar a viabilidade do uso de dados de mini-CTDs instalados em EMSs para estudos nas regiões de interesse do PROANTAR no Oceano Austral.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No ano de 2008 o projeto MEOP fixou 10 mini-CTDs – *Satellite Relay Data Loggers* (CTD-SRDLs) em fêmeas adultas de EMS objetivando conhecer os padrões de movimentação e comportamento dos animais, além das características do meio ambiente por elas habitados. Neste trabalho, são apresentados os perfis coletados por duas fêmeas adultas de EMS instrumentadas no verão de 2008 que coletaram dados até o mês de novembro do mesmo ano durante a fase pelágica de forrageio dos indivíduos doravante denominados CTD 42 e CTD 46. A escolha desses dois indivíduos se deu devido a particularidades em seus deslocamentos, sendo esses indivíduos as únicas fêmeas a permanecer na região desse estudo durante todo o período em que estiveram sendo rastreadas.

Os CTDs–SRDLs aqui empregados são construídos pelo *Sea Mammal Research Unit* (SMRU) da Universidade de St. Andrews, Escócia. Os sensores dos CTDs são desenvolvidos pela Valeport, constituídos basicamente de um sensor transdutor de pressão (P), um termômetro de resistência de platina (T) e uma célula indutiva para a medida de condutividade (C). Os sensores estão montados num molde de resina que são fixados na cabeça dos EMS utilizando-se uma resina epóxi de secagem rápida (Charrassin et al., 2008). Os sensores de temperatura e condutividade têm uma resolução de 0.001°C e 0.002 mS/cm respectivamente, e uma vez corrigidas as leituras de pressão, temperatura e salinidade estas possuem uma acurácia de 2 dbar, 0.02 °C a 0.03 °C, e 0.03 a 0.05 psu, respectivamente. georreferenciados transmitidos via sistema de satélites ARGOS de águas do Oceano Austral

Os dados dos CTDs são codificados e transmitidos através de PCDs via serviço de telemetria por satélites ARGOS. Por causa da pequena banda dos transmissores ARGOS, cada perfil foi transmitido em uma forma comprimida contendo 17 pontos de medições de T e C correspondendo aos mais importantes pontos de inflexão determinados no equipamento através do uso do algoritmo “*broken stick*” (Lydersen et al., 2002).

Para esse trabalho foram utilizados 1330 perfis de temperatura e salinidade em função da profundidade, sendo 599 coletados pelo CTD 42 e 731 pelo CTD 46. Estes dois EMS optaram por permanecer na região localizada entre as latitudes de 57° S a 64° S e longitudes de 59° W a 41° W durante quase todo período em que estiveram coletando dados, com pequenas diferenças entre as áreas amostradas por cada um (Figura 1). Eles seguiram um padrão de movimentação que alternaram coletas na CCA, na região leste da Ilha Elefante, na região noroeste do MW, nas proximidades das IOrS, sobre a EES, nas proximidades da porção norte da PA e através da CWE.

Foi realizada uma análise hidrográfica clássica com os dados disponíveis para as regiões escolhidas, usando a redação de softwares de leitura e diagramação, baseados na linguagem Matlab®. Assim, elaborou-se um conjunto de diagramas de mapeamento do ambiente. Uma análise deste tipo é importante para contextualizar o conjunto de observações (Duarte, 2006). O cálculo das propriedades termohalinas foi realizado a partir do pacote de rotinas SEAWATER (UNESCO, 1983) desenvolvidos para processamento e análise de dados oceanográficos. Além disso, foram elaborados diagramas de estado espalhado de temperatura potencial *versus* salinidade (Θ -S), com vistas a identificar as massas d'água presentes em cada área e época do ano amostrada. Também foram gerados transectos de temperatura potencial, salinidade e densidade potencial para verificar as características e variações espaciais e temporais estrutura termohalina na região de estudo.

As análises da estrutura termohalina do oceano na área de estudo foram realizadas em etapas de acordo com as áreas amostradas pelos animais em cada período. Cada animal realizou uma trajetória distinta que foi tratada separadamente e subamostrada para ressaltar aspectos oceanográficos importantes. Apesar de que mergulhos dos EMS possam ser bem profundos (2000 m ou mais) e frequentes (Santini et al., 2008), as profundidades médias desses mergulhos são próximas de 500 m, fato que motivou a geração dos perfis analisados nesse trabalho até 500 m de profundidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estrutura Termohalina

O EMS identificado como CTD 42 coletou dados no período entre 6 de fevereiro e 29 de agosto de 2008 na região indicada com a cor verde na Figura 1 (57°- 64°W/59°- 44°W). Enquanto isso, o CTD 46 coletou dados no período entre 4 de fevereiro e 15 de novembro de 2008 na região indicada como a cor vermelha (58°-64°W/59°-41°W) na Figura 1. Durante os deslocamentos foi coberta uma distância de 2242,8 km resultando em uma resolução amostral de 45,58 km/dia. A distância média entre cada perfil coletado foi 16.86 +/- 13.23 km com uma taxa de transmissão diária de 2,73 +/- 0,248 vezes. Deve-se ressaltar que o período amostrado pelo CTD 46 representa o maior período de coleta de dados *in situ* (ininterrupto) conhecido para essa região, demonstrando o ineditismo dos dados apresentados aqui e a importância da utilização dessa tecnologia para a descrição oceanográfica de regiões normalmente subamostradas por formas tradicionais de monitoramento.

O animal instrumentado com o CTD 42 iniciou a coleta de dados nas proximidades da Ilha Elefante no dia 6 de fevereiro de 2008. Dados foram obtidos de forma contínua por 206 dias, correspondendo a 599 perfis e uma taxa de transmissão diária de 2.9 vezes. Após a fixação da PCD no EMS, o indivíduo partiu em direção à parte norte da PA (NPA) onde permaneceu até 9 de março.

No período entre 6 de fevereiro e 9 de março, os perfis coletados pelo CTD 42 revelaram uma estrutura vertical estável com temperatura potencial negativa em praticamente toda a coluna d'água, salinidade entre 34.1 e 34.6 psu e densidade potencial entre 27.5 e 27.8 (Figura

2). Esses valores são característicos de massas d'água originárias do EB e do MW, já que esta região é influenciada pela circulação local que transporta águas relativamente mais frias do MW para o EB a noroeste (Heywood et al., 2004) e para o ME a norte (Whitworth III et al., 1994). Após este período, o CTD 42 permaneceu coletando dados na região da Elevação da Escócia do Sul (EES) e nas IOrS, com investidas através da CCA no ME.

Na região da CEW, os perfis coletados apresentaram uma estratificação marcada com a termoclina próxima dos 100 m de profundidade tendo temperaturas em torno de 0.5 °C em superfície e em torno de -0.5° C no restante da camada. A salinidade e a densidade potencial relevam uma camada estável, com valores próximos de 34.5 psu e 27.6 nos primeiros 100 m da coluna d'água. No restante da coluna, os valores são mais uniformes, estando entre 34.6 e 34.8 psu para salinidade e entre 27.7 e 27.9 para a densidade potencial.

Após este período inicial, a fêmea CTD 42 descreveu três migrações até a região central do ME, com retorno em direção às Ilhas Shetlands do Sul (IShS) a partir de meados do mês de março. A primeira ocorreu dia 19 de abril com duração de aproximadamente 10 dias e a segunda a partir de 10 de maio durante 19 dias. Foram observados valores de temperatura positivos (entre 0.5 °C e 2 °C) característicos da CCA em praticamente toda a coluna. Os valores de salinidade obtidos foram entre 34.2 e 34.4 psu e a densidade potencial permaneceu entre 27.2 e 27.5 para os 100 m superficiais. No restante da coluna, a salinidade e temperatura potencial tiveram valores observados mais uniformes, sendo próximos a 34.8 psu e 27.85, respectivamente. Esta estratificação é característica da ação de forçantes mecânicos na CCA, com uma pequena camada superficial sujeita à mistura e o restante da coluna mais uniforme.

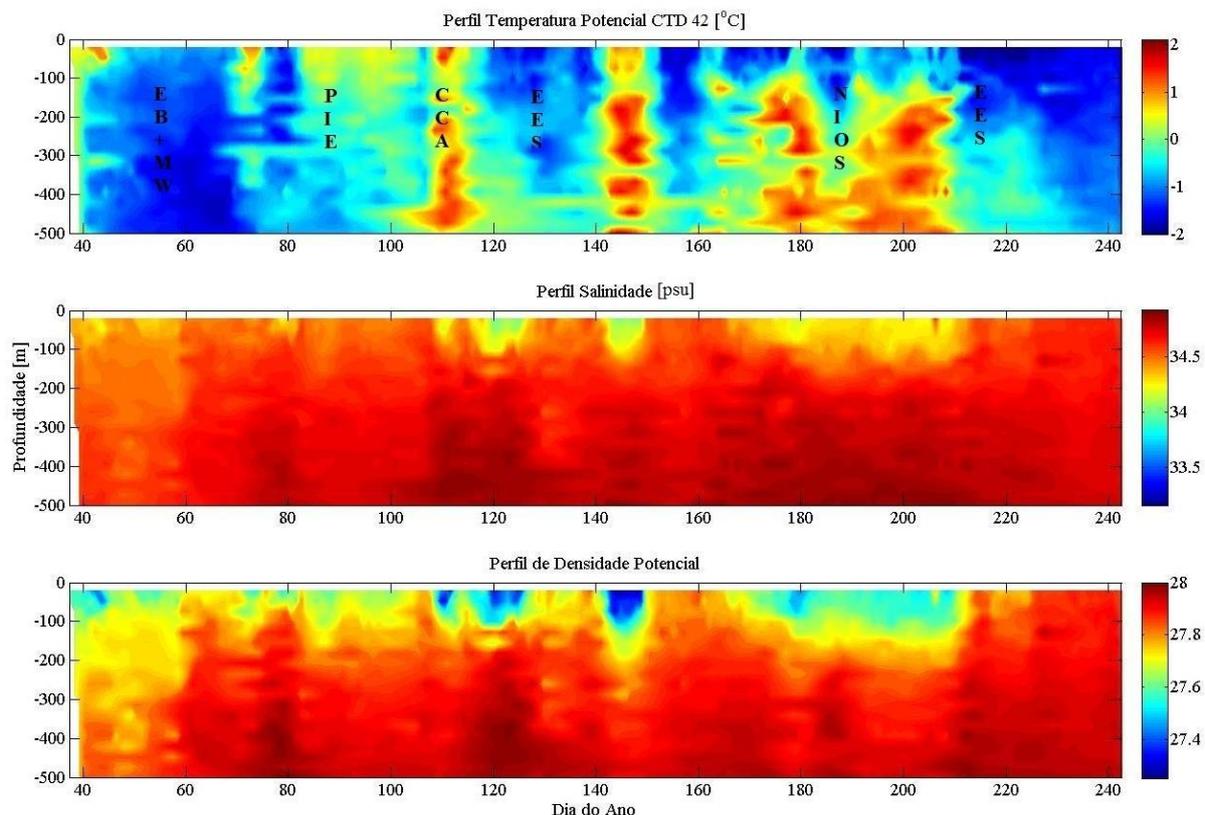


Figura 2. Perfis de temperatura potencial, salinidade e densidade potencial coletados pelo CTD 42. Os acrônimos no perfil superior servem de referência à localização onde foram obtidos os perfis (estreito de Bransfield [EB]; mar de Weddell [MW]; corrente circumpolar Antártica [CCA]; elevação da Escócia do sul [EES]; norte das ilhas Orkney do Sul [NIOS]).

A terceira inserção do CTD 42 no ME ocorreu a partir da terceira semana de junho e durou até final de julho de 2008. Nesse período o oceano apresentou uma termoclina bem definida com aproximadamente 150 m e com temperatura entre -1.5 °C e 0.5 °C causados, principalmente, pelo resfriamento sazonal. O restante da coluna d'água apresentou temperaturas próximas a 2 °C. A salinidade e a densidade potencial tiveram valores próximos a 34.4 psu e 27.6, respectivamente, na termoclina. O restante da camada esteve mais uniforme, com valores entre 34.6 e 34.7 psu para salinidade e entre 27.7 e 27.9 para a densidade potencial. No período final da coleta do CTD 42, compreendido entre os dias 29 de julho e 30 de agosto, o EMS esteve na região da EES e nas proximidades da ilha elefante, onde amostrou valores de temperatura potencial (-1.8 °C a 0.4 °C), salinidade (34.6 a 34.8 psu) e densidade potencial (27.75 a 28) distintos do restante do período amostrado. As temperaturas superficiais, com valores negativos, se deveram à influência do resfriamento ocorrido durante o inverno austral. A coluna vertical não apresentou, conforme era esperado, a estratificação marcante e característica da circulação dominante da CCA na PD. Nesta região, durante esta época do ano, ocorrem altas taxas de formação de gelo marinho e conseqüentemente liberação de sal, o que causa um aumento de salinidade e densidade potencial na camada superior (até ~200 m).

Tabela 1. Índices termohalinos utilizados neste trabalho e suas respectivas referências bibliográficas.

Massa de Água	Θ (°C)	Salinidade (psu)	Referências
AASW	$\Theta < 1^\circ$	$33 < S < 34.5$	Gordon e Huber (1984)
WW	$\Theta < - 1.7^\circ$	$34.3 < S < 34.44$	Mantyla e Reid (1983)
WDW	$0 < \Theta < 1^\circ$	$34.6 < S < 34.75$	Mantyla e Reid (1983)
MWDW	$-1.7^\circ < \Theta < -0.7^\circ$	$34.4 < S < 34.6$	Duarte (2006)
CDW	$1^\circ < \Theta$	$S \sim 34.7$	Hofmann e Klinck
UCDW	$1^\circ < \Theta < 1.4^\circ$	$S \sim 34.6$	(1998); Klinck et al.
LCDW	$1.25^\circ < \Theta < 1.75^\circ$	$S \sim 34.73$	(2004)
ISW	$\Theta < - 1.7^\circ$	$34.2 < S < 34.7$	Carter et al. (2008)

Os registros obtidos pelo segundo indivíduo analisado (CTD 46) representam a sequência de dados mais longa e ininterrupta na região ao nosso conhecimento na região de estudo. O registro se inicia em 4 de fevereiro de 2008 obtendo dados de forma contínua e ininterrupta por 286 dias. Esse registro corresponde a 731 perfis verticais de temperatura e salinidade e a uma taxa de transmissão diária de 2.55 vezes, com registros mais concentrados na área NPA e ME (Figura 1). Os dados registrados após a fixação da PCD no animal mostram seu deslocamento para o sul da PA até o Canal Antártico (CA), através do EB retornando às ISHS (em 19 de fevereiro). Nesse trajeto foram identificados valores de temperatura na superfície, até ~80 m, próximos a 1 °C, característicos do verão austral, devido ao aquecimento superficial, e valores de salinidade e densidade potencial uniformes em toda coluna d'água e próximos a 34.3 psu e 27.6, respectivamente (Figura 3).

Após o dia 29 de fevereiro, o CTD 46 migrou em direção às IOs através da CWE, onde permaneceu até o dia 25 de abril obtendo valores de temperatura potencial em superfície (até 50 m) entre 0 °C e -1 °C. Entre 50 m e 180 m notou-se a presença de um núcleo frio, com temperaturas próximas a -1.5 °C, provavelmente devido ao afundamento da camada superficial resfriada no inverno anterior com índices termohalinos representativos da AASW. Abaixo desse núcleo, a temperatura tem um aumento para valores próximos a 0 °C em toda a coluna d'água. Tanto a salinidade quanto a densidade potencial possuem valores relativamente menores entre a superfície e a profundidade próxima a 100 m (entre 33.2 e 34 psu e 26.8 a 27.1, respectivamente), causados principalmente pelo derretimento da cobertura

de gelo marinho e pela mistura superficial para formar a AASW. Nas camadas mais profundas, observamos a Água Circumpolar Profunda Superior (UCDW). Essa é uma variação da CDW, localizada em profundidades próximas aos 200 m (Hofmann e Klinck, 1998), com valores de salinidade mais uniformes na faixa de 34.2 a 34.7 psu e a densidade potencial na faixa 27.5 a 27.9.

Entre os dias 20 de abril e 10 de maio, o CTD 46 migra em direção a Ilha Elefante através do EB, onde encontra uma coluna d'água uniforme em praticamente toda sua extensão com temperatura potencial, salinidade e densidade potencial próximas a 0 °C, 34.3 psu e 27.6, respectivamente. Após esse período, o animal retorna em direção às IOrS e permanece sobre a CWE realizando algumas investidas no ME. Neste período, fica claro o resfriamento superficial da coluna d'água causado pelo inverno austral, com temperatura potencial na camada entre 0 m a 180 m de aproximadamente -1.7 °C e valores entre 0 °C e 1 °C nas camadas mais profundas. A salinidade e a densidade possuem um núcleo com valores relativamente menores, reflexo do degelo superficial, na camada desde a superfície até 150 m, e valores mais uniformes no restante da coluna. Até o final do período de inverno austral (início de setembro) ocorre uma uniformização nos campos de salinidade e densidade potencial com valores médios de 34.2 psu e 27.5, respectivamente, na camada que vai da superfície até aproximadamente 180 m, e valores a acima de 34.6 psu e 27.8 para profundidades maiores que 180 m. Após o início de setembro, o EMS retorna em direção às IShS e norte da PA, permanecendo nessa região até o dia 15 de novembro. Nessa época, devido à permanência do manto de gelo formado em superfície, não são notadas grandes modificações na estrutura vertical oceânica, que possui uma maior uniformidade. Valores de temperatura potencial estão na faixa de -0.5 °C a -1.8 °C, salinidade entre 34.4 e 34.6 psu e densidade potencial entre 27.5 e 27.7 em toda a coluna.

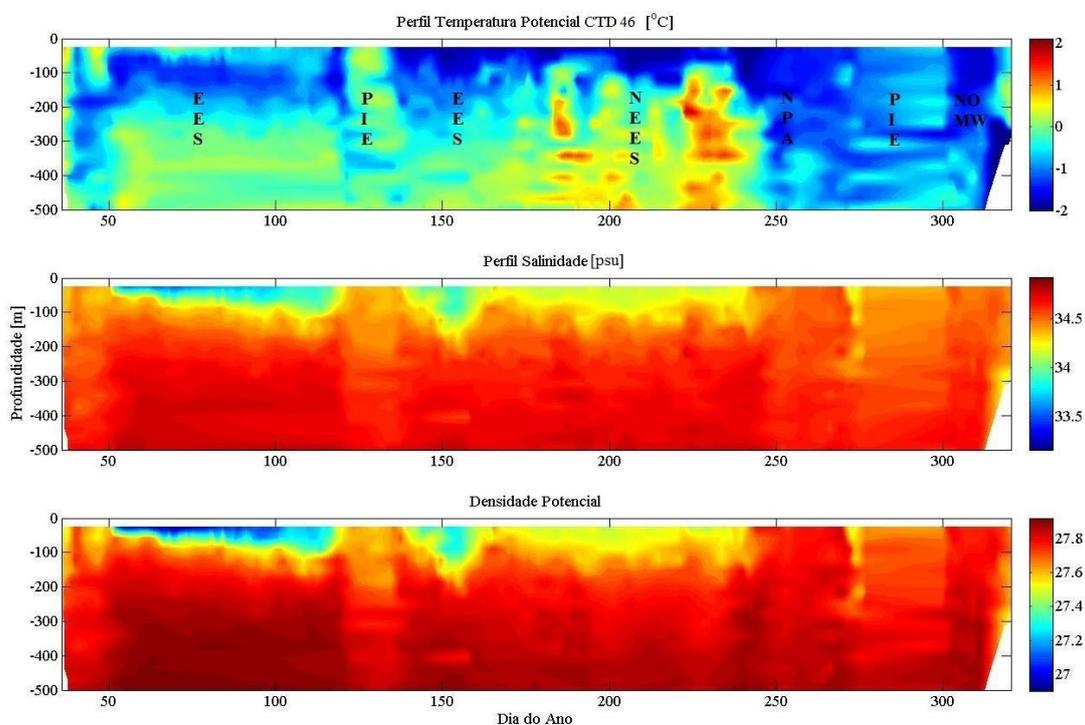


Figura 3. Perfis de temperatura potencial, salinidade e densidade potencial coletados pelo CTD 46. Os acrônimos no perfil superior indicam a localização onde foram obtidos os perfis (elevação da Escócia do sul [EES]; proximidades da ilha elefante [PIE]; norte da elevação da Escócia do sul [NEES]; norte da península Antártica [NPA]; noroeste do mar de Weddell [NO MW]).

3.2. Massas de água

A figura 4 apresenta os diagramas de estado espalhado de temperatura potencial *versus* salinidade (Θ -S) para o CTD 42 e CTD 46. O CTD 42 mostra que esse indivíduo de EMS transitou por águas com temperatura potencial variando entre -1.85 °C e 2.12 °C, salinidades entre 34.01 e 34.94 psu e densidade potencial entre 27.24 e 28 (Figura 4.a). Já o indivíduo CTD 46 transitou em águas com temperatura potencial na faixa de -1.88 °C a 1.86 °C, salinidade entre 33.15 e 34.85 psu e densidade potencial entre 26.63 e 27.98 (Figura 4.b). Estas faixas de temperatura potencial, salinidade e temperatura potencial são características de diversas massas d'água que compõem a estrutura vertical do oceano na região de estudo.

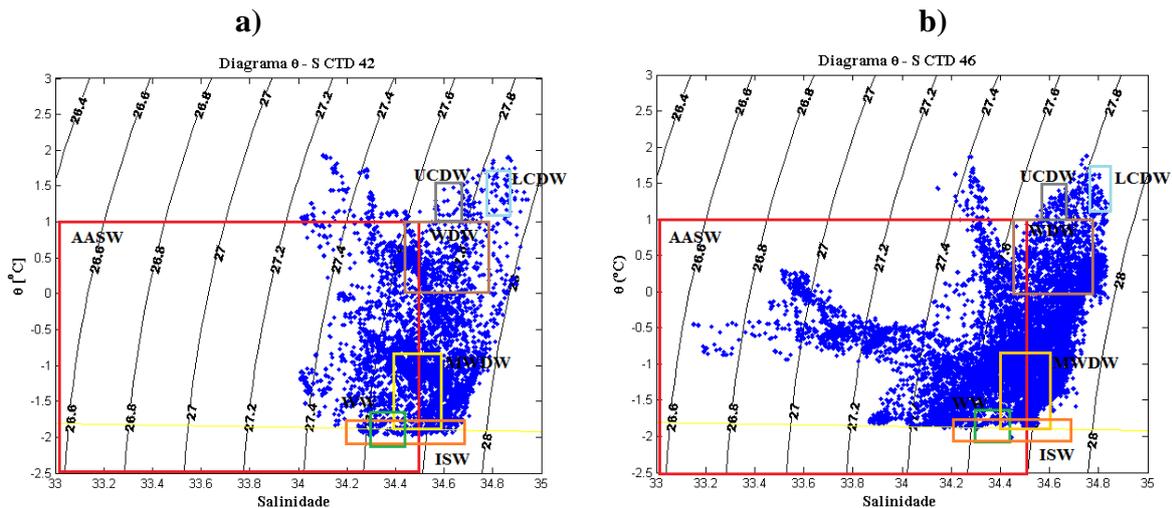


Figura 4. Diagramas Θ -S gerado a partir dos dados coletados por (a) CTD 42 entre os dias 6 de fevereiro e 29 de agosto; (b) CTD 46 entre os dias 4 de fevereiro e 15 de novembro de 2008. As caixas indicam o domínio de cada massa d'água (vermelho, AASW; cinza, UCDW; magenta, LCDW; amarelo, MWDW; marrom, WDW; verde, WW; laranja, ISW).

A partir dos valores das variáveis hidrográficas coletadas na região amostrada pelos EMS (Figura 2), podemos identificar as seguintes massas d'água presentes na região: AASW, WW, WDW, CDW, ISW e UCDW (Tabela 1). Observamos também travessias dos indivíduos através da CWE, representadas por fortes gradientes horizontais de temperatura. Já as massas d'água do Mar de Weddell possuem pequenos gradientes verticais em suas propriedades (Whitworth III et al., 1994).

Comparando os resultados obtidos aqui com aqueles de Meredith et al. (2011) coletados durante o ano de 2007 nas proximidades das IOrS, são observadas diferenças principalmente em relação aos valores mínimos de salinidade. O provável motivo para essas diferenças deve estar relacionado à grande liberação de água doce pelo degelo sazonal, causando uma estabilização da coluna d'água. Isso concorda com Muench e Gun (1990), que descrevem a limitação da mistura vertical aos primeiros 100 m da coluna. Outra diferença está relacionada aos valores máximos de temperatura potencial que são maiores no presente estudo. Isso se deve provavelmente ao fato de que as coletas realizadas nesse estudo foram situadas num domínio mais a norte que aquele do estudo de Meredith et al. (2011). Os indivíduos de EMS percorreram trajetórias através do ME e da Frente Sul da CCA, que se caracteriza por valores de temperatura potencial em superfície próximos aos 2 °C (Biuw et al., 2007; Boehme et al., 2008). Nossos resultados, porém, estão de acordo com aqueles apresentados por Patterson e Sievers (1980) que realizaram um estudo no mesmo domínio espacial desse trabalho.

Irregularidades vistas nos diagramas de estado espalhado se devem principalmente a processos de mistura, tanto causada por ação mecânica próxima a superfície, como por ação

da topografia de fundo, característica devida à presença da EES que influencia diretamente a região de estudo. A região da CWE possui características incomuns, que se devem a processos verticais de mistura de massas d'água ocorrendo através da camada de contorno lateral oceânica. Essa camada de contorno age para homogeneizar a coluna d'água, incorporando água fria e menos salina proveniente do derretimento do gelo marinho (principalmente de origem continental), que está quase sempre presente na área da CWE. Isso faz com que a CWE possua grande produtividade primária causada pelo afloramento de águas ricas em nutrientes de origem profunda (McConnel et al., 1992) e pela disponibilização de nutrientes liberados durante o derretimento de gelo marinho (Biuw et al., 2007). Acredita-se que esses fatores sejam primordiais para tornar a região da CWE uma área preferencial para o forrageio dos EMS, cujas presas são atraídas por essas condições ambientais.

4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram utilizados 1330 perfis de temperatura e salinidade em função da profundidade coletados por duas fêmeas de elefante-marinho do sul (*Mirounga leonina*) instrumentadas em fevereiro de 2008 com *Conductivity-Temperature-Depth/Satellite-Relay Data Logger* pelo Projeto MEOP-BR na ilha Elefante, ao norte da península antártica. Uma vez que os animais saíram ao mar, os dados foram coletados na região norte da Península Antártica e Mar da Escócia entre os meses de fevereiro e novembro de 2008, sendo utilizados para gerar diagramas de estado espalhado e identificar as massas d'água e alterações na estrutura termohalina do oceano austral nos locais visitados pelos animais. A região amostrada possui grande importância, pois lá ocorre grande mescla de águas causada pela interação de águas do Mar de Weddell, do Estreito de Bransfield e da Corrente Circumpolar Antártica. O presente trabalho também demonstrou a importância da utilização desta tecnologia de instrumentação de predadores de topo de cadeia trófica para a coleta de dados oceanográficos. O CTD 46 forneceu dados no maior período de tempo ininterrupto de coleta de dados *in situ* conhecido para a região de estudo. Essa tecnologia também oferece a possibilidade de descrever as massas d'água e a variabilidade espaço-temporal de variáveis oceanográficas em regiões normalmente subamostradas por métodos tradicionais de monitoramento (por exemplo, navios e, especialmente, os navios operados pelo PROANTAR que não são quebra-gelos). O conjunto de massas d'água identificadas é composto pelas AASW, WW, WDW, MWDW, CDW, UCDW, LCDW e ISW. Todas essas tem em comum o fato de se originarem nas proximidades da Península Antártica. Os resultados mostram que a estrutura vertical oceânica sofre alterações que não podem ser monitoradas facilmente através de métodos tradicionais, principalmente durante o inverno austral, e que os elefantes-marinhos do sul são importantes amostradores oceanográficos possibilitando um aumento do nosso conhecimento no oceano austral.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Marinha do Brasil (navios de investigação, o pessoal da Estação Antártica Brasileira "Comandante Ferraz" - EACF), ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) e SECIRM pelo apoio logístico. Gostaríamos também de agradecer a equipe de apoio de campo do "Projeto elefantes-marinhos do sul" (PEMS), particularmente Julio José Reynoso, Valeria Ruoppolo, Leandro Lazzari Ciotti e Tiago RB Gandra. Esta pesquisa foi possível graças ao financiamento do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) para o PROANTAR através do CNPq (Proj. 520196/2006-6 a MMCM) e uma bolsa da CAPES (Ministério da Educação) para MMCM. Este trabalho foi realizado sob licenças

SANTINI, M. F.; MUELBERT, M. M. C.; SOUZA, R. B.; WAINER, I. E. K. C.; HINDELL, M. A. Estrutura termohalina e massas de água ao norte da Península Antártica revelada a partir de dados *in situ* coletados por elefantes-marinhos do sul (*Mirounga leonina*). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 119-132, 2013. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.893>)

científicas concedidas pelo gerente do PROANTAR e representantes do Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal (MMA), em nome do SCAR. Todos os procedimentos foram realizados em conformidade com os atuais protocolos internacionais estabelecidos pelo SCAR e CCAMLR e suas diretrizes.

6. REFERÊNCIAS

- BIUW, M. BOEHME, L.; GUINET, C.; HINDELL, M.; COSTA, D.; CHARRASSIN, J-B. et al. Variations in behavior and condition of a Southern Ocean top predator in relation to *in situ* oceanographic conditions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, p. 13705-13710, 2007. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0701121104>
- BOEHME, L.; THORPE, S. E.; BIUW, M.; FEDAK, M.; MEREDITH, M. P. Monitoring Drake Passage with elephant seals: frontal structures and snapshots of transport. **Limnology and Oceanography**, v. 53, p. 2350-2360, 2008.
- BOEHME, L.; LOVELL, P.; BIUW, M.; ROQUET, F.; NICHOLSON, J.; THORPE, S. E. et al. Technical Note: Animal-borne CTD-Satellite Relay Data Loggers for real-time oceanographic data collection. **Ocean Science Discussions**, v. 6, p. 1261-1287, 2009. <http://dx.doi.org/10.5194/os-5-685-2009>
- CARTER, L.; MCCAVE, I. N.; WILLIAMS, J. M. Circulation and water masses of the southern ocean: a review. **Developments in Earth and Environmental Sciences**, v. 8, p. 85-114, 2008.
- CHARRASSIN, J. B.; HINDELL, M.; RINTOUL, S. R.; ROQUET, F.; SOKOLOV, S.; BIUW, M. et al. Southern ocean frontal structure and sea-ice formation rates revealed by elephant seals. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 105, p. 11634–11639, 2008. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0800790105>
- DUARTE, V. S. **Estrutura e variabilidade interanual das massas de água no Estreito de Bransfield (Antártica) durante os verões austrais de 2003 e 2004**. 2006. 143f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- FRANCO, B. C.; MATA, M. M.; PIOLA, A.; GARCIA, C. A. E. Northwestern Weddell Sea deep outflow into the Scotia Sea during the austral summers of 2000 and 2001 estimated by inverse methods. **Deep Sea Research Part I**, v. 54, p. 1815-1840, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2007.06.003>
- GORDON, A. L. Potential temperature, oxygen and circulation of bottom water in the Southern Ocean. **Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts**, v. 13, p. 1125-1138, 1966. [http://dx.doi.org/10.1016/0011-7471\(66\)90704-2](http://dx.doi.org/10.1016/0011-7471(66)90704-2)
- GORDON, A. L. Structure of Antarctic waters between 20°W and 170°W. New York: American Geographical Society, 1967. 10 p. (Antarctic Map Folio Series, Folio 6)
- GORDON, A. L.; GEORGI, D. T.; TAYLOR, H. W. Antarctic polar front zone in the Western Scotia Sea-summer 1975. **Journal of Physical Oceanography**, v. 7, p. 309-328, 1977. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1977\)007%3C0309:APFZIT%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1977)007%3C0309:APFZIT%3E2.0.CO;2)

- SANTINI, M. F.; MUELBERT, M. M. C.; SOUZA, R. B.; WAINER, I. E. K. C.; HINDELL, M. A. Estrutura termohalina e massas de água ao norte da Península Antártica revelada a partir de dados *in situ* coletados por elefantes-marinheiros do sul (*Mirounga leonina*). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 119-132, 2013. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.893>)
-
- GORDON, A. L.; HUBER, B. A. Thermohaline stratification below the Southern Ocean sea ice. **Journal of Geophysical Research**, v. 89,n. C1, p. 641-648, 1984. <http://dx.doi.org/10.1029/JC089iC01p00641>
- HEYWOOD, K. J.; NAVEIRA GARABATO, A. C.; STEVENS, D. P. High mixing rates in the abyssal Southern Ocean. **Nature**, v. 415, p. 1011–1014, 2002.
- HEYWOOD, K. J.; NAVEIRA GARABATO, A. C.; STEVENS, D. P.; MUENCH, R. D. On the fate of the Antarctic Slope Front and the origin of the Weddell Front. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. 1-13, 2004. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC002053>
- HOFMANN, E. E.; KLINCK, J. M. Thermohaline variability of the waters overlying the west Antarctic continental shelf. In: JACOBS, S. S.; WEISS, R. F. (Eds.). **Ocean, ice, and atmosphere: interactions at the Antarctic continental margin**, Washington, DC.: American Geophysical Union, 1998. V. 75. p. 67–81.
- KLINCK, J. M.; HOFMANN, E. E.; BEARDSLEY, R. C.; SALIHOGLU, B.; HOWARD, S. Water-mass properties and circulation on the west Antarctic peninsula continental shelf in austral fall and winter 2001. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 51, p. 1925-1946, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2004.08.001>
- LYDERSEN, C.; NOST, O. A.; LOVELL, P.; MCCONNELL, B. J.; GAMMELSROD, T.; HUNTER, C. et al Salinity and temperature structure of a freezing Arctic fjord— Monitored by white whales (*Delphinapterus leucas*). **Geophysical Research Letter**, v. 29, 2119, 2002. <http://dx.doi.org/10.1029/2002GL015462>
- MANTYLA, A. W.; REID, J. L. Abyssal characteristics of the world ocean waters. **Deep Sea Research**, v. 30, p. 805-833, 1983. [http://dx.doi.org/10.1016/0198-0149\(83\)90002-X](http://dx.doi.org/10.1016/0198-0149(83)90002-X)
- MCCONNELL, B. J.; CHAMBERS, C.; FEDAK, M. A. Foraging ecology of southern elephant seals in relation to the bathymetry and productivity of the Southern Ocean. **Antarctic Science**. v. 4, p. 393-398, 1992.
- MEREDITH, M. P.; NICHOLLS, K. W.; RENFREW, I. A.; BOEHME, L.; BIUW, M.; FEDAK, M. Seasonal evolution of the upper-ocean adjacent to the South Orkney Islands, Southern Ocean: Results from a “lazy biological mooring”. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 58, p. 1569-1579, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.07.008>
- MUENCH, R.; GUN, J. T. The Weddell-Scotia Confluence in Midwinter. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 18177-18190, 1990.
- MUENCH, R. D.; HUBER, B. A.; GUNN, J. T.; HUSBY, D. M. The Weddell-Scotia marginal ice zone: physical oceanographic conditions, geographical and seasonal variability. **Journal of Marine Systems**, v. 3, p. 169-182, 1992. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-7963\(92\)90037-9](http://dx.doi.org/10.1016/0924-7963(92)90037-9)
- ORSI, A. H.; WHITWORTH III, T.; NOWLIN Jr.; W. D. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 42, p. 641-673, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00021-W](http://dx.doi.org/10.1016/0967-0637(95)00021-W)

SANTINI, M. F.; MUELBERT, M. M. C.; SOUZA, R. B.; WAINER, I. E. K. C.; HINDELL, M. A. Estrutura termohalina e massas de água ao norte da Península Antártica revelada a partir de dados *in situ* coletados por elefantes-marinhos do sul (*Mirounga leonina*). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 119-132, 2013. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.893>)

PATTERSON, S. L.; SIEVERS, H. A. The Weddell-Scotia confluence. **Journal of Physical Oceanography**, v. 10, p. 1584-1610, 1980. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010%3C1584:TWSC%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010%3C1584:TWSC%3E2.0.CO;2)

SANTINI, M. F.; SOUZA, R. B.; MUELBERT, M. M. C. Análise preliminar de dados oceanográficos medidos no Oceano Austral a partir de plataformas de coleta de dados instaladas em Elefantes-marinhos do sul. In: SEMINÁRIO DE SOBRE PESQUISA ANTÁRTICA, 16., 2008, São Paulo. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2008.

THORPE, S. E.; HEYWOOD, K. J.; BRANDON, M. A.; STEVENS, D. P. Variability of the southern Antarctic Circumpolar Current front north of South Georgia. **Journal of Marine Systems**, v. 37, p. 87-105, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963\(02\)00197-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-7963(02)00197-5)

WHITWORTH III, T.; NOWLIN JR, W.; ORSI, A.; LOCARNINI, R.; SMITH, S. Weddell Sea shelf water in the Bransfield Strait and Weddell-Scotia Confluence. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 41, p. 629-641, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/0967-0637\(94\)90046-9](http://dx.doi.org/10.1016/0967-0637(94)90046-9)

UNESCO. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. [S.l.]: 1983. p. 1-55. (UNESCO technical papers in marine science, 44)