



**Universidade Federal do Rio Grande – FURG**

**Instituto de Oceanografia**

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica

**ESTUDO DA PERFORMANCE DAS SONDAS TIPO XBT  
NO OCEANO AUSTRAL**

**NATALIA RIBEIRO SANTOS**

**Orientador: *Prof.Dr.* MAURICIO MAGALHÃES MATA**  
Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

**Co-orientador: *Prof.Dr.* JOSÉ LUIZ LIMA DE AZEVEDO**  
Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Rio Grande, RS, Brasil

Maio 2016

# **ESTUDO DA PERFORMANCE DAS SONDAS TIPO XBT NO OCEANO AUSTRAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre

por

**NATALIA RIBEIRO SANTOS**

Rio Grande, RS, Brasil

Maio2016

© A cópia parcial e a citação de trechos desta tese são permitidas sobre a condição de que qualquer pessoa que a consulte reconheça os direitos autorais do autor. Nenhuma informação derivada direta ou indiretamente desta obra deve ser publicada sem o consentimento prévio e por escrito do autor.






UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
 IO – INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
 PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA  
 FÍSICA, QUÍMICA E GEOLÓGICA.  
 E-mail: [ccpofgg@furg.br](mailto:ccpofgg@furg.br) – home-page: [www.oceanfisquigeo.furg.br](http://www.oceanfisquigeo.furg.br)

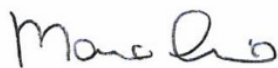


## ATA ESPECIAL DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – 07/2016

Às nove horas do dia 02 de maio do ano de dois mil e dezesseis, no Aud. João Rocha - IO-FURG/Carreiros, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de **MESTRADO** intitulada "**Estudo da Performance das Sondas Tipo XBT no Oceano Austral**", da **Acad. Natalia Ribeiro Santos**. A Comissão Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Mauricio M. Mata - Orientador/ Presidente (IO-FURG), Prof. Dr. José Luiz L. de Azevedo (IO-FURG) e Prof. Dr. Mauro Cirano (UFRJ). Dando início à reunião, a Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisa Helena L. Fernandes, agradeceu a presença de todos, e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após, esclareceu que a Candidata teria de 45 a 60 min para explanação do tema, e cada membro da Comissão Examinadora, um tempo máximo de 30 min para perguntas. A seguir, passou à palavra a Candidata, que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após ampla explanação, a Comissão Examinadora reuniu-se em reservado para discussão do conceito a ser atribuído à Candidata. Foi estabelecido que as sugestões de todos os membros da Comissão Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pelo Orientador/Candidato para incorporação na versão final da Dissertação. Finalmente, a Comissão Examinadora considerou a candidata **APROVADA**, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ATA, que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pela Candidata e pela Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.

  
 Prof. Dr. José Luiz L. de Azevedo

  
 Prof. Dr. Mauricio M. Mata  
 Presidente

  
 Prof. Dr. Mauro Cirano

  
 Acad. Natalia Ribeiro Santos

  
 Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisa Helena L. Fernandes  
 Coordenadora do PPGOFQG

À minha vó, amiga e alma gêmea.

“Sabia que seria inútil me dedicar à ciência se antes não conquistasse outros espaços para todas as mulheres. Filha de uma autoridade na ciência, eu sabia que pelo menos a minha voz seria ouvida.

[...]

Recusar à mulher a igualdade de direitos em virtude do sexo é denegar justiça a metade da população.”

Bertha Lutz

## Agradecimentos

Sobre a produção do homem dentro do mercado de trabalho, Marx apontou em “O Trabalho Alienado” que: “[...] quanto mais o trabalhador se desgasta no trabalho tanto mais poderoso se torna o mundo de objetos por ele criado em face dele mesmo, tanto mais pobre se torna a sua vida interior, e tanto menos ele se pertence a si próprio.”. Àqueles que perguntam, digo que escolhi o caminho acadêmico para não me sentir alienada do meu trabalho. Em outras palavras, eu queria que meu trabalho de fato me pertencesse, fosse meu próprio reflexo e não um produto que beneficiasse poucas pessoas e a quem outros atribuíssem um determinado valor. Entretanto, quando o trabalho é inteiramente nosso, também são as responsabilidades e, finalmente, ficamos frente a frente com quem somos, questionando nossa capacidade.

Percebi então que, para uma dissertação evoluir de um projeto para um artigo, alguém precisa transformar também um aluno em um pesquisador. Dessa forma, a experiência e conselhos daqueles que não só trilharam o mesmo caminho, mas que emprestaram sua sabedoria, paciência e tempo desenvolvendo pessoas, é imprescindível. Por constantemente lembrar-me da minha capacidade e impedir que eu me depreciasse ao longo desses dois anos (cinco anos no total?), pelas infinitas oportunidades, pelos cheques de realidade, por ser um exemplo a ser seguido como profissional e por fazer seu trabalho sobre pessoas e não sobre produtos, ao meu orientador, Prof. Dr. Mauricio Mata, meu agradecimento.

É impossível falar sobre formação de pessoas e não mencionar também o Prof. Dr. Zé Luiz de Azevedo, co-orientador desse trabalho – e pai dos alunos nas horas vagas e não tão vagas assim. Agradeço-o por todos esses anos dedicados ao ensino e por ser um verdadeiro professor, dentro e fora da sala de aula. As pessoas vivem através do que criam e produzem; você viverá para sempre através dos seus alunos.

Nesses dois anos, amadureci também pessoalmente, enxergando e entendendo que é necessário lutar para que os desafios que ser mulher nos impõe no dia-a-dia não se tornem também veículos de alienação. Aprendi que

devemos contar umas com as outras nessa caminhada e, por isso, sou grata ao meu pequeno (e feminino) núcleo familiar – mãe, vó e irmã –, pela sua ajuda e compreensão em todas as etapas da minha vida. Também agradeço a minha *roommate* e amiga Elisa por fazer da convivência uma arte e acomodar nossas diferenças em uma amizade verdadeira.

Talvez o medo de alienar-me ao que me cerca, tenha me tornado uma pessoa dada aos excessos. Aquele que é ao mesmo tempo meu namorado, meu melhor amigo e meu melhor crítico, salvou-me de mim mesma tantas vezes, fazendo parecer que consegui sozinha. Lucas, muito obrigada pelos bons momentos que passamos juntos, mas principalmente por não me deixar sozinha naqueles que não eram tão bons assim.

Às minhas colegas e amigas, Maria Isabel, Lidiane, Ella, Lorena, Marília, e Leandra, obrigada por aceitarem quem eu fui e quem eu sou, resolvendo problemas, compartilhando bons momentos e ajudando de formas diferentes na conclusão dessa etapa.

Hoje, percebo que apesar de viver através do meu trabalho como me propus a fazer no início dessa dissertação, esse trabalho não é somente meu. Por menor que seja a contribuição, o trabalho científico não pertence ao seu autor, mas a todos que fizeram parte da sua construção e à sociedade como um todo. E isso me traz a certeza de que estou no caminho certo.

A todos, muito obrigada.



# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	V
<b>Lista de Figuras</b> .....	VIII
<b>Lista de Tabelas</b> .....	VIII
<b>Lista de Acrônimos</b> .....	IX
<b>Resumo</b> .....	XI
<b>Abstract</b> .....	XII
<b>Capítulo I: Introdução</b> .....	1
Motivação.....	10
<b>Capítulo II: Objetivos</b> .....	12
2.1 Objetivo Geral.....	12
2.2 Objetivos Específicos.....	13
<b>Capítulo III: Dados e Métodos</b> .....	14
3.1 Pares XBT-CTD e Controle de Qualidade.....	14
3.2 Cálculo dos novos coeficientes da FRE.....	17
3.3 Erro Quadrático Médio ( <i>Root Mean Square</i> – RMS) .....	22
3.4 Conteúdo de Calor do Oceano (Ocean Heat Content – OHC).....	23
<b>Capítulo IV</b> .....	24
<b>Capítulo V: Considerações Finais</b> .....	53
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	56

## Lista de Figuras

**Figura 1.** Porcentagem dos diferentes instrumentos que integram o banco de dados de temperatura do oceano superficial de 1966 a 2013 (baseado no WOD13). Os dados incluem XBTs, flutuadores ARGO (PFL), Batitermógrafos Autônomos de Pinípedes (APB), Batitermógrafos Mecânicos (MBT), Estações oceanográficas (OSD), CTD/XCTD de alta resolução, derivadores (DRB), Gravadores Oceanográficos Ondulantes (UOR), Gliders (GLD) e Fundeios (MRB). Retirado de Cheng *et al.* [2015]. **3**

**Figura 2.** Principais componentes do XBT. Retirado de: <http://www-ium.univ-brest.fr/fr/science-et-societe/sciences-pour-tous/histoire-oceano/thermo5> e traduzido por Torquato, [2016].. **4**

**Figura 3.** Mapa mostrando a localização (pontos pretos) de todos os pares colocados de XBT-CTD considerados nesse estudo, sendo 43 na Passagem de Drake (DRA), 39 pares ao sul da África (AFR) e 55 pares ao sul da Austrália... **15**

**Figure 4.** Esquema exemplificando o princípio do método de Cheng *et al.* [2014], recomendado pela comunidade científica em 2015. Retirado de Cheng *et al.* [2011]. **22**

## Lista de Tabelas

**Tabela 1.** Sumário dos métodos de correção para sondas tipo XBT existentes que analisaram banco de dados globais. O visto indica se um fator foi considerado em um dado esquema de correção. O visto dentro do quadrado indica que o método está parcialmente ou implicitamente considerando um fator em específico. **7**

## Lista de Acrônimos e Abreviações

### A

**APB** – Batitermógrafos Autônomos de Pinípedes (*Autonomous Pinniped Bathythermographs*)

### C

**CAPES** – Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

**CNPq** – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

**CTD** – Sistema Condutividade-Temperatura-Profundidade (*Conductivity-Temperature-Depth*)

### D

**DB** – Modelo de XBT (*Deep Blue*)

**DRB** – Bóias de Deriva (*Drifting Buoys*)

### F

**FRE** – Equação de queda do XBT (*Fall Rate Equation*)

**FURG** – Universidade Federal do Rio Grande

### G

**GLD** – Planador subaquático (*Gliders*)

**GOAL** – Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes

### M

**MBT** – Batitermógrafos Mecânicos (*Mechanical Bathythermographs*)

**MCTI** – Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação

**MMA** – Ministério do Meio Ambiente

**MRB** – Fundeios Oceanográficos (*Moored Buoys*)

### N

**NOAA** – Administração Nacional Oceânica e Atmosférica dos EUA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*)

## O

**OSD** – Dados de Estações Oceanográficas (*Ocean Station Data*)

**OHC** – Conteúdo de Calor Oceânico (*Ocean Heat Content*)

## P

**PROANTAR** – Programa Antártico Brasileiro

**PFL** – Perfiladores Oceanográficos Autônomos ou bóias ARGO (*Profiling Floats*)

## T

**TSK** - Tsurumi Seiki Co

## U

**UOR** – Gravadores Oceanográficos Ondulantes (*Undulating Oceanographic Recorder*).

## X

**XCTD** – Sistema Condutividade-Temperatura-Profundidade descartável (expendable *Conductivity-Temperature-Depth*)

**XBT**– Batitermógrafo Descartável(*eXpendable BathyThermograph*)

## W

**WOD**–*World Ocean Database*

## Resumo

Vários estudos têm observado um aquecimento mais proeminente do oceano Austral quando comparado a outras regiões oceânicas do planeta em resposta às mudanças climáticas globais. No entanto, a grande maioria dos dados de temperatura disponíveis para essa região é formada por perfis de sondas tipo XBT (*eXpendable BathyTermograpHERs*). Estas sondas não estão equipadas com um sensor de pressão e, portanto, não podem medir a profundidade de forma direta. A profundidade é calculada por uma equação de taxa de queda (FRE) oferecida pelo fabricante, que não parece representar adequadamente as condições extremamente frias e de alta viscosidade da região. O XBT cai mais lentamente do que o estimado pela FRE e, assim, leva a uma superestimação no conteúdo de calor (OHC). Neste estudo, um conjunto de 147 pares colocados de XBT (tipo DB / T7) e CTD, obtidos a partir do *World Ocean Database* (2013) e separados por uma distância máxima de 12,5 mn e intervalo inferior a 10 horas são considerados. Os métodos de correção de [Hanawa et al. \[1995\]](#) e [Cheng et al. \[2014\]](#) foram aplicados aos pares, com o último produzindo melhores resultados. A FRE da Sippican demonstrou ter um melhor desempenho em latitudes altas do que no resto do oceano, superestimando a profundidade em apenas 2%. Para os pares da Passagem Drake (43), do Sul da África (39) e do Sul da Tasmânia (65), encontramos que os coeficientes ideais mudam -0,88%, -1,4% e -2,2% em relação aos valores originais, respectivamente. A FRE ideal para o oceano Austral foi determinada utilizando todos os pares, sendo definida como . No que diz respeito às diferenças no OHC, apesar de todas as correções, os resultados mostram uma superestimação de calor para a camada superior do oceano, em uma média de aproximadamente  $2,9617 \times J \text{ } ^\circ C$  (ou 10%). No geral, os resultados apoiam ainda mais a hipótese de uma dependência regional da FRE da temperatura da água, e sugerem a necessidade de desenvolver um sistema de correção da profundidade específico para as regiões polares.

**Palavras-Chave:** 1. XBT 2. Fall-rate. 3. Oceano Austral.

## ABSTRACT

Several studies have observed a more prominent warming of the Southern Ocean when compared to other ocean regions of the world, fact that is related to global climate change. However, the vast majority of available temperature data for that region is composed by expendable Bathythermographs profiles (XBTs). These probes are not equipped with a pressure sensor and thus do not measure depth directly. Depth is inferred by a fall-rate equation (FRE) offered by the manufacturer that does not seem to adequately represent the extremely cold and high viscosity conditions of the region. Probes fall slower than expected and thus lead to an overestimation in heat content (OHC) for those areas. In this study, a set of 147 collocated XBT (DB/T7 type) and CTD stations obtained from World Ocean Database (2013) and separated by a maximum distance of 12.5 nm and less than 10 hours is used. [Hanawa \*et al.\* \[1995\]](#) and [Cheng \*et al.\* \[2014\]](#) correction methods were applied to the dataset, with the latter producing better results. Sippican's Inc. FRE, however, has been shown to perform better in high latitudes than in the rest of the ocean, overestimating depth by 2%. For the pairs in Drake Passage (43), South of Africa (39) and South of Tasmania (65), we found the ideal coefficients to change by -0.88%, -1.4% and -2.2% from the original values, respectively. The ideal fall-rate equation for the Southern Ocean was determined using all pairs, being defined as  $z = 1000 - 1000 \cdot \exp(-k \cdot t)$ . Regarding to OHC differences, our results show, despite all corrections, an overestimation of heat for the ocean's upper layer in an average of approximately  $2.9617 \text{ xJ } ^\circ\text{C}$  (or 10%). Overall, the results further support the hypothesis of a regional dependence of the XBT fall-rate on water temperature, and suggest the need of developing a bias correction scheme specific for the polar regions.

**Keywords:** 1. XBT 2. Fall-rate. 3. Southern Ocean.

## Capítulo I: Introdução

**D**entre as propriedades da água do mar amostradas e analisadas, a temperatura representa a maior parte dos dados, uma vez que os equipamentos necessários para essas medições são relativamente simples e de baixo custo. Nesse sentido, muitos dos dados de temperatura disponíveis no oceano global e, em particular, no oceano Austral foram adquiridos através de batitermógrafos descartáveis, ou sondas tipo XBT (*eXpendable*

*BathyThermographs*), originalmente desenvolvidas pela marinha dos Estados Unidos durante os anos 60, mas amplamente utilizadas na amostragem



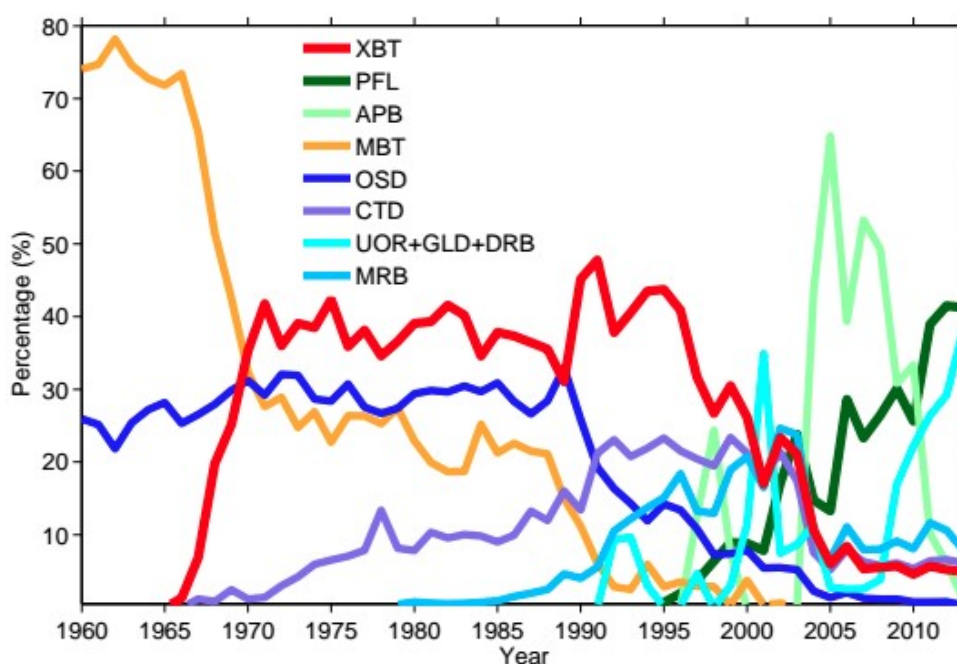
científica do oceano superficial (primeiras centenas de metros) a partir de 1970. Devido a popularização do seu uso pela comunidade científica, os dados de XBT apresentam grande relevância para os estudos dos oceanos, previsões meteorológicas e projeções de condições climáticas futuras [e.g. [Wijffels et al. 2008](#)].

Estudos indicam que 38% dos dados de temperatura do oceano superficial armazenados no *World Ocean Database 2013* (WOD13) foram coletados por sondas tipo XBT lançadas entre os anos de 1970 e 2001 (Fig. 1) [[Boyer et al. 2013](#)]. Embora os flutuadores ARGO tenham dominado a amostragem de perfis de temperatura e salinidade no oceano global durante as últimas duas décadas, estudos científicos ainda dependem de transectos de XBT quando investigando a variabilidade de correntes superficiais e subsuperficiais, para modelagens oceânicas e climáticas, para assimilação de dados e também para o estudo de mudanças climáticas [e.g. [Giese et al. 2011](#)]. Além disso, amostragens espaço-temporais regulares ainda não podem ser obtidas utilizando qualquer outro equipamento ou sistema hoje disponível [[Boyer et al. 2013](#)]. Como são muito abundantes nos bancos de dados globais, a correção da FRE deste equipamento também é bastante importante no que diz respeito às estimativas do Conteúdo de Calor do Oceano (OHC<sup>1</sup>), que é um indicador da quantidade de energia térmica armazenada em uma determinada camada ou profundidade do oceano. Diversos estudos investigaram os erros nas estimativas históricas de OHC associados às sondas tipo XBT [[Lyman et al. 2010](#), [Boyer et al. 2015](#)], indicando que as tendências podem ter sido subestimadas em até 50% [[Domingues et al. 2008](#)].

<sup>1</sup>Acrônimo clássico na língua inglesa que significa *Ocean Heat Content*.

<sup>1</sup>Acrônimo clássico na língua inglesa que significa *Ocean Heat Content*.

As sondas tipo XBT consistem em um termistor acoplado à ponta de um bulbo hidrodinâmico com duas bobinas de fio de cobre que se desenrolam em direções opostas a partir de seu lançamento de um navio (Fig. 2). Isso garante medidas pontuais e um lançamento em “queda-livre”, pois permite que a sonda não seja arrastada pelo navio em movimento. A profundidade não pode ser diretamente medida pelo XBT, porque não há um sensor de pressão conectado ao sistema, sendo esta estimada indiretamente por uma equação de queda ( $FRE^2$ ) desenvolvida de acordo com observações dos movimentos da sonda pelo fabricante (*Lockheed Martin Sippican Inc.*, a partir de agora referido como Sippican). Essa equação é baseada na velocidade de queda do XBT, sendo definida como:



**Figura1.** Porcentagem dos diferentes instrumentos que integram o banco de dados de temperatura do oceano superficial de 1966 a 2013 (baseado no WOD13). Os dados incluem XBTs, flutuadores ARGO (PFL), Batitermógrafos Autônomos de Pinípedes (APB), Batitermógrafos Mecânicos (MBT), Estações oceanográficas (OSD), CTD/XCTD de alta resolução, derivadores (DRB), Gravadores Oceanográficos Ondulantes (UOR), Gliders (GLD) e Fundeios (MRB). Adaptado de [Cheng et al. \[2015\]](#).

<sup>2</sup>Terminologia clássica na língua inglesa que significa *Fall Rate Equation*.

<sup>2</sup>Terminologia clássica na língua inglesa que significa *Fall Rate Equation*.

onde os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$  da equação de queda são determinados pelo fabricante e  $t$  é o tempo que a sonda leva para terminar o perfil, começando assim que encontra a água.



**Figura2.** Principais componentes do XBT. Retirado de: <http://www-ium.univ-brest.fr/fr/science-et-societe/sciences-pour-tous/histoire-oceano/thermo5> e traduzido por Torquato[2016]).

Uma vez que os coeficientes da FRE estão relacionados principalmente às dimensões, peso e material do XBT, eles podem mudar dependendo do modelo da sonda utilizado (T4, T5, T6, T7, T10 e *Deep Blue*, Lockheed Martin Corporation [2005]), bem como seu alcance. Esse estudo é focado nos modelos mais contemporâneos, T7 e *Deep Blue* (DB), que têm um alcance documentado de 760m de profundidade [Cheng *et al.* 2014] e cuja equação de queda é designada como:

Em outras palavras, um perfil bruto de XBT consiste em medidas de resistência elétrica em função do tempo que a sonda leva para terminar o perfil [Cheng *et al.* 2011]. Essas medidas de resistência são então convertidas em valores de temperatura ao aplicar-se a equação de Steinhart-Hart [Georgi *et al.* 1980]e, finalmente, a equação de queda estabelece uma relação entre profundidade e tempo.

Como resultado do método empregado na aquisição de dado descrito acima, as propriedades da água do mar (como viscosidade e densidade) podem estar afetando a velocidade de queda das sondas tipo XBT [Seaver & Kuleshov 1982], potencialmente causando erros significativos nas estimativas de profundidade.

Em 1995, o primeiro esquema de correção global aceito pela comunidade científica foi posto em uso [Hanawa *et al.* 1995, a partir de agora H95]. O esquema de correção proposto por H95 era embasado na comparação de 285 perfis de XBT com medidas amostradas por um CTD (*conductivity-temperature-depth*) no mesmo local e tempo. De acordo com Hanawa & Yasuda [1992] quando medidas de CTD e XBT são conduzidas repetidamente ao longo de uma mesma linha observacional, uma pseudo-onda das isotermas ("*XBT wave*") aparece no perfil vertical da temperatura. Isso está relacionado ao erro de profundidade nos dados de XBT, já que o CTD apresenta um termistor com maior precisão e acurácia (0,003°C a 0,02°C contra a estimativa global de 0,2°C para XBT) e um sensor de pressão [e.g. Flierl & Robinson 1977; Seaver & Kuleshov 1982]. Os coeficientes de queda foram, então, recalculados e uma "nova" equação de queda para os modelos T7 e DB (Eq. 3) foi adotada pela Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) e fabricantes.

(3)

Esse esquema de correção, apesar de amplamente utilizado, falha em detectar o erro de temperatura do termistor, uma vez que utiliza os gradientes de temperatura ao invés da temperatura propriamente dita durante a análise. Pela mesma razão, esse método também não funciona bem quando os gradientes são fracos [Cheng *et al.* 2011]. Além disso, esse método não considera a dependência dos modelos e erros ao tempo [Cheng *et al.* 2014, Cheng *et al.* 2015], ou seja, ano de fabricação das sondas, negligenciando também perfis de altas latitudes no seu desenvolvimento [Thadathil *et al.* 2002].

Na última década, muitos estudos tentaram mensurar os erros do XBT e removê-los dos bancos de dados para que fosse possível utilizar os mesmos nas ciências climáticas [Wijffels *et al.* 2008, Ishii & Kimoto 2009, Levitus *et al.* 2009, Gouretski & Reseghetti 2010, Good 2011, Gouretski 2012, Hamon *et al.* 2012, Cheng *et al.* 2011, Cheng *et al.* 2014]. Um resumo detalhado dos métodos citados e das correções que contemplam foi organizado por Cheng *et al.* [2014] e é exibido na tabela 1. Entretanto, a maior parte desses estudos indicaram que a existência de erros sistemáticos associados às medidas de XBT provêm de várias fontes, sem mencionar as significativas variações entre os tipos de XBT, ano de fabricação e sistema de aquisição de dados utilizados [Cheng *et al.* 2014].

Erros de profundidade e temperatura foram analisados sob diferentes componentes pela comunidade científica, sendo que em ambos a relação com o ano de fabricação (“Variável no tempo”) foi investigada. Outros autores também investigaram a relação dos erros do termistor à temperatura do ambiente, bem como o erro intrínseco de cada termistor. Os que se dedicaram a contribuir com

**Tabela 1.** Sumário dos métodos de correção para sondas tipo XBT existentes que analisaram banco de dados globais. O visto indica se um fator foi considerado em um dado esquema de correção. O visto dentro do quadrado indica que o método está parcialmente ou implicitamente considerando um fator em específico.

Fatores	Cheng <i>et al.</i> (2014)	Gouretsk& Reseghetti (2010)	Levitus <i>et al.</i> (2009)		Gouretski (2012)	Hamon <i>et al.</i> (2012)	Good (2011)	Cowley <i>et al.</i> (2013)	Ishii & Kimio (2009)	Wijfells <i>et al.</i> (2008)
Erro Temperatura	Correção do termistor	✓	✓	✓	✓	✓		✓		
	Variável no tempo	✓	✓		✓	✓		✓		
	Dependência de Temperatura	✓	✓			✓ Águas frias e quentes		✓		
Erro Profundidade	Correção do erro de profundidade	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Variável no tempo	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Erro de superfície	✓	✓		✓	✓		✓		
	Dependência de Temperatura	✓	✓							
Modelo de XBT	Sippican	T7/DB; T4/T6; T5; T10	T4/T6; T7/DB		T4/T6; T7/DB; T10	Profundo; Raso	T4; T7; T10	T4/T6; T7/DB	T7; T4; T6; T5; T10; FD;	Profundo; Raso



	TSK	T4/T6; T5; T7						TSK	T4; T6; T7	
	Desconhecido	Profundo e Raso Desconhecido			Profundo e Raso Desconhecido		Desconhecido			

o erro de profundidade, além da correção do erro em si, podem ser investigadas as componentes relativas à altura do lançamento que refletem no erro *start-up* transitório (ou “Erro de superfície”) e as variações do erro de profundidade em relação à temperatura e, portanto, à viscosidade das águas. Nesse sentido a tabela 1 sumariza quais fatores foram abordados e por quais autores ao longo do período recente.

Esses diferentes erros das sondas podem ser agrupados em (a) erros de profundidade devido a coeficientes falhos da FRE, (b) erro do termistor e (c) erro transitório de *start-up* combinado a *spikes* e ocorrências aleatórias [Cheng et al., 2011]. A fonte do erro transitório é considerada como sendo elétrica, quando o erro é causado por uma demora do termistor a se ajustar à temperatura das águas adjacentes [Cheng et al. 2011], e externa, uma vez que está diretamente relacionado à altura do lançamento [Bringas & Goni 2015] e também pode depender das condições da sonda ao entrar em contato com a água [Abrahamet al. 2013]. Considerando os erros aleatórios, *spikes* são principalmente causados por problemas elétricos, como o sistema de aquisição de dados utilizado [Reseghetti et al. 2007], aterramento inadequado ou problemas com o fio de cobre; erros dessa natureza, no entanto, podem também estar relacionados a condições atmosféricas e velocidade do navio. Um esforço científico está sendo atualmente empregado para melhorar nosso entendimento sobre as fontes do erro transitório [Cheng et al. 2015].

Os erros da equação de queda, por outro lado, são de origem mecânica, sendo esses: peso, dimensões, atrito do bulbo hidrodinâmico e ano de fabricação [Green 1984; Seaver and Kuleshov 1982]. Fatores externos também podem

intervir, sendo os mais importantes as condições da água do mar e as características da termoclina [Thadathil *et al.* 2002]. Os erros sistemáticos de profundidade são em função da temperatura da água, já que a viscosidade da mesma depende da temperatura, afetando a movimentação da sonda [Kizu *et al.* 2005, Cheng *et al.* 2014].

Seguindo por essa linha, muitos estudos investigaram como características regionais podem influenciar a performance de uma FRE. A maioria desses estudos, no entanto, cobrem áreas tropicais ou subtropicais, como a costa da Austrália [Ridgway *et al.* 2002], o Norte do Pacífico [Kizu *et al.* 2005] e o Mar Mediterrâneo [Reseghetti *et al.* 2007].

Ainda que os erros do XBT já tenham sido investigados e estimados regionalmente em várias áreas subtropicais e tropicais, constatamos que há falta de esforços específicos nas altas latitudes. Alguns estudos foram feitos [Pennington & Weller 1981, Wisotzki & Fahrback 1991, Thadathil *et al.* 2002, Hutchinson *et al.* 2013], mas todos recomendaram que mais análises fossem feitas nessas regiões a fim de considerar os erros sistemáticos associados ao XBT propriamente.

Nesse sentido, Thadathil *et al.* [2002] observaram, comparando perfis pares de XBT e CTD no oceano Austral ao sul da Tasmânia, que as sondas afundam mais lentamente nas regiões polares e subpolares. Isso se deve às temperaturas muito mais frias a que o equipamento estava exposto do que as temperaturas durante o estudo de Hanawa *et al.* [1995], que usaram somente perfis de águas tropicais para calcular os coeficientes da FRE.

Além disso, [Hutchinson et al. \[2013\]](#), quando analisando pares de XBT/CTD ao sul da África, propuseram a hipótese de que, devido a maior viscosidade das águas mais frias do oceano Austral, a sonda sofreria maior fricção e, dessa forma, teria a sua velocidade de queda reduzida. Logo, uma queda mais lenta do que a esperada pela equação de queda fornecida pelo fabricante resulta em leituras de temperatura mais rasas do que a profundidade real associada, levando a um perfil consideravelmente mais quente do que o do CTD quando comparadas as profundidades.

### **Motivação**

Observações recentes sugerem que o oceano Austral esteja aquecendo mais rapidamente do que as demais regiões do oceano global [[Gille 2008](#)]. Entretanto, os dados provenientes de XBTs são relativamente dominantes na região (45% de todos os perfis de temperatura entre 1980 e 2000), não deixando claro se esse sinal de aquecimento estaria sendo parcialmente causado pela superestimação da profundidade nos dados de XBT disponíveis ou, de fato, seria somente resposta às mudanças climáticas globais [[Hutchinson et al. 2013](#)]. Apesar dos dados de XBT sem correção serem adequados para muitas aplicações científicas, apenas dados corrigidos podem ser usados para ciências do clima [[Cheng et al. 2015](#)]. Desse modo, é de extrema importância que os erros associados às sondas tipo XBT sejam corretamente estimados no oceano Austral e que os dados disponíveis para a região sejam melhor corrigidos de acordo com as condições extremas desse ambiente. Assim, será possível conhecer a magnitude das variabilidades nessa região.

Finalmente, apesar de alguns estudos terem observado uma diminuição dos coeficientes da FRE em regiões mais frias, devido a um aumento da viscosidade da água [Gouretski & Reseghetti 2010], esse efeito ainda não foi propriamente quantificado. Por essa razão, a maioria dos esquemas de correção já propostos não incluíram esse cenário em suas análises, nem mesmo o método atualmente recomendado pela comunidade científica. Dessa forma, a quantificação do erro de profundidade em regiões de altas latitudes é importante para garantir melhores correções para o oceano Austral [Cheng *et al.* 2014] e, por conseguinte, produzir estimativas confiáveis do conteúdo global de calor (OHC). Esse estudo, então, busca identificar e quantificar os erros de profundidade dos XBTs no Oceano Austral, utilizando para tal as áreas de estrangulamento da Corrente Circumpolar Antártica (ACC), propondo uma FRE regional que ofereça uma correção mais consistente e compatível com as características únicas e extremas da região.

## Capítulo II: Objetivos

**D**ado o contexto geral, nessa seção fundamentamos os objetivos desse estudo, esclarecendo em que sentido será a contribuição científica para esta área de conhecimento.

### 2.1 Objetivo Geral

Identificar e quantificar os erros de profundidade das sondas tipo XBT no oceano Austral e propor uma equação de velocidade de queda (FRE) que represente melhor as características extremas dessa região.

## 2.2 Objetivos Específicos

- Investigar os bancos de dados, da forma mais automatizada possível, no sentido de identificar possíveis pares de CTD e XBT no Oceano Austral.
- Estimar os impactos de uma correção das equações de *fall rate* nas estimativas de conteúdo de calor (OHC) do oceano Austral superior.

## Capítulo III: Material e Métodos

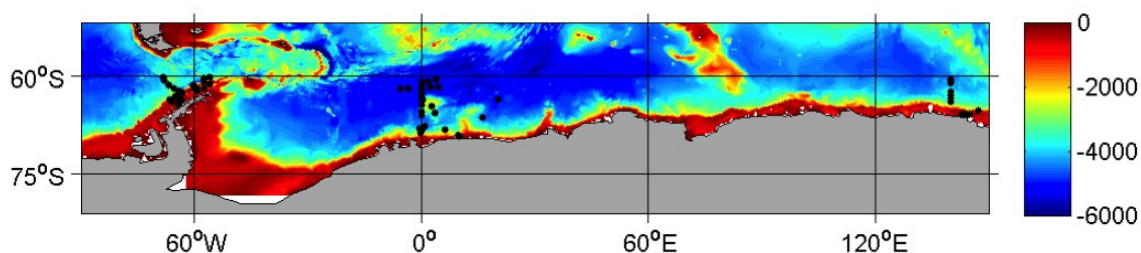
**N**essa seção os dados utilizados nesse estudo serão caracterizados quanto a tipo, origem, localidade e tamanho amostral. Também serão apresentados os métodos desenvolvidos durante as análises.

### 3.1 Pares XBT-CTD e controle de qualidade

Para investigar e quantificar os erros dos XBTs no oceano Austral, dados de XBT e CTD ao sul de 60°S foram extraídos do *World Ocean Database 2013 (WOD13)* e sobrepostos a fim de determinar pares dentro do mesmo espaço-tempo.



Somente perfis com um raio de distância máximo de 12,5mn (ou 0.2° de latitude/longitude) e cuja amostragem não apresentasse uma diferença temporal superior a 10 horas foram admitidos como pares colocados [Hutchinson *et al.* 2013]. Inicialmente, os pares foram agrupados nas três regiões de estrangulamento da ACC: Passagem de Drake, sul da África e sul da Tasmânia/Nova Zelândia, somando 147 pares (Fig. 3). Somente perfis de XBT *Deep Blue* e T7 da Sippican foram utilizados nessa análise e as leituras foram consideradas somente até 700m, apesar do limite máximo estabelecido pelo fabricante para esse modelo de XBT ser de 760m e estudos indicarem que dados amostrados até 800m não apresentam qualquer evidência de baixa acurácia [Reseghetti *et al.* 2007].



**Figura3.** Mapa mostrando a localização (pontos pretos) de todos os pares colocados de XBT-CTD considerados nesse estudo, sendo 43 na Passagem de Drake (DRA), 39 pares ao sul da África (AFR) e 55 pares ao sul da Austrália.

Todos os perfis foram submetidos a procedimentos para garantir o controle de qualidade. Similarmente a outros métodos de correção [H95, Cheng *et al.* 2011, Cheng *et al.* 2014], foram aplicados dois tipos de filtros em ambos dados de XBT e CTD: primeiramente (1) um filtro de mediana não-linear a fim de eliminar *spikes* e outros ruídos de alta frequência e, em seguida, (2) um filtro de *Hanning* passa-baixa para suavizar sinais e erros menores. Os perfis foram também manualmente analisados para garantir que todos os dados amostrados depois

de algum *spike* fossem também removidos, caso o perfil ainda não tivesse sido marcado como “ruim” pelos filtros anteriores. Apesar de frequentemente os dados parecerem estar adequados para uso, eles possuem alta probabilidade de conterem erros significativos [Anderson 1980, Hutchinson *et al.* 2013]. Esse processo é necessário para que se removam falsos sinais de aquecimento que podem estar sendo causados por uma variedade de fontes (cabo rompido e falhas de processamento, como não indicar no dado bruto onde o XBT encostou no chão) e também para garantir a qualidade da análise do erro de profundidade, já que esses problemas podem afetar a performance do método [Cowley *et al.* 2013].

Acredita-se que com essa inspeção manual também tenha-se eliminado os perfis que estavam sobre feições de mesoescala ou vórtices, comuns principalmente na região da África, mas oriundos da ACC. No que diz respeito a frentes oceânicas, todos os perfis foram coletados ao sul de 60°S, ou seja, sul da Frente Polar para os três estrangulamentos da ACC considerados [Orsi *et al.* 1995]. A Frente Polar foi definida por Sun & Watts [2002] como a Convergência Antártica, pois representa o encontro entre as águas subantárticas mais quentes que vem do norte com as águas antárticas mais frias do sul. Dessa forma, se garante que os pares estariam dentro de uma região com características antárticas semelhantes e com gradientes verticais de temperatura suaves, permitindo que se estime os erros de profundidade realistas [Hutchinson *et al.* 2013]. Os perfis que passaram pelo processo de controle de qualidade podem, então, ser incorporados na análise.

### 3.2 Cálculo dos novos coeficientes da FRE.

A fim de identificar e quantificar os erros sistemáticos do XBT no oceano Austral, este estudo propõe que se teste o desempenho de uma nova equação de queda com coeficientes regionais contra a FRE fornecida pelo fabricante. Para isso, os novos coeficientes de taxa de queda foram calculados a partir dos perfis de XBT-CTD pareados, utilizando o método atualmente recomendado pela comunidade científica [Cheng *et al.* 2015], inicialmente proposto por Cheng *et al.* [2011] e estabelecido por Cheng *et al.* [2014].

Uma das mudanças mais importantes deste método em comparação com a FRE da Sippican é a introdução de um termo *offset*, também chamado de erro *start-up* transitório. Este termo é responsável por todos os desvios imprevisíveis a que a sonda é submetida quando ela atinge a água, estando relacionado com: (i) a altura de lançamento do XBT; (ii) angulação com que este entra na água; (iii) ou mesmo um atraso do termistor para responder ou adaptar-se ao seu ambiente. O método também incorpora erros aleatórios, tais como *spikes* causados pelo mau tempo que ainda não tenham sido eliminados pelo processamento de dados.

A inclusão do *offset* também é vantajosa quando se compara o método atual de Cheng *et al.* [2014] ao método clássico de H95. Apesar de também utilizar a comparação de perfis de XBT e CTD colocados e/ou simultâneos assim como em H95, o último não prevê a correção para esses erros do início do perfil, o que pode aumentar os erros dos perfis de temperatura e terminar em perfis de gradiente de temperatura de baixa qualidade. Além disso, outra diferença fundamental é a utilização da própria temperatura e não dos gradientes desta propriedade para a correção. Quando H95 compara os gradientes de

temperatura de perfis XBT e CTD, os erros intrínsecos ao termistor acabam desaparecendo [Cheng *et al.* 2011]. Outro problema advindo da utilização dos gradientes, que foi atenuado pelo novo método já que compara perfis de temperatura ao longo de janelas de tempo, é a dificuldade em detectar erros de profundidade em regiões onde o gradiente vertical da temperatura seja fraco ou constante [Hanawa *et al.* 1995]. Para perfis em altas latitudes, regiões conhecidas por suas baixas temperaturas, pouca incidência solar e grande mistura, essa consideração é de extrema importância, uma vez que os gradientes de temperatura podem ser pequenos ou até mesmo constantes na vertical em seções muitas vezes maiores do que as janelas de tempo/procura estabelecidas pelo método.

Essencialmente, a FRE produz um mapeamento do tempo que o XBT leva para completar o perfil em relação a profundidade e os erros nesse mapeamento levam a discrepâncias entre os perfis de temperatura de XBT e CTD. Dessa forma, o novo método de Cheng *et al.* [2014] busca estimar o melhor mapeamento possível entre “tempo x profundidade” para os perfis de XBT a fim de minimizar as diferenças entre os dois equipamentos. A FRE para esse mapeamento é determinada como:

Essa estrutura já havia sido proposta por outros estudos [Heinmiller *et al.* 1983; Singer 1990], mas neles o *offset* foi considerado como um termo que melhorava a interpolação somente, não sendo calculado ao mesmo tempo que os outros coeficientes e [Cheng *et al.* 2011]. Isso, no entanto, pode mascarar pequenas variações nos valores dos coeficientes e durante a movimentação inicial da

sonda e, conseqüentemente, torna-los inadequados para descrever o movimento completo com a aproximação requerida. Assim conclui-se que, a combinação ótima dos três termos [Cheng et al. 2014] seria a mais adequada para minimizar os desvios verticais das diferenças de temperatura entre XBT e CTD. Ou seja, os coeficientes da taxa de queda individuais para perfis de XBT seriam calculados através da minimização dos desvios-padrão das diferenças de temperatura entre um par XBT-CTD em análise segundo a função 3D , retirada de Cheng et al. [2011]:

sendo a temperatura do XBT na profundidade equivalente ao tempo  $t$  e a temperatura do CTD na profundidade  $z$  (em metros). O tempo inicial representa o momento em que a sonda chega à água e começa a leitura do termistor ( $t_0$ ).

A partir disso, um problema de otimização se apresenta, já que os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  e  $offset$  são variáveis por perfil e cada perfil também apresenta tempos totais de queda ( $t_{total}$ ) diferentes entre si [Cheng et al. 2011]. Apesar de vários algoritmos de aproximação poderem ser utilizados, o método adota o procedimento de simplesmente buscar dentro de uma janela específica a melhor combinação de coeficientes para o perfil em análise. Isso permite que se observem detalhes do comportamento da função, mas aumenta o tempo de processamento, não sendo ideal para um grande número de perfis.

Janelas de tempo foram, então determinadas, sendo inseridas na função (Eq. 5) como (comprimento da janela) e (quantidade de janelas em cada perfil). As dimensões das janelas de tempo definidas para esse estudo foram:

- de ;
- de ;
- de ;

Esses intervalos foram escolhidos baseados nas características gerais da camada superior do oceano Austral. Como a região é bastante homogênea, as janelas menores são as que representam o oceano mais raso, para representar possíveis diferenças em uma camada de mistura que, às vezes, pode existir. Já a melhor combinação para os coeficientes , *offset*, para cada par de XBT-CTD comparado, foi estabelecida dentro dos limites a seguir:

- 
- 
- 

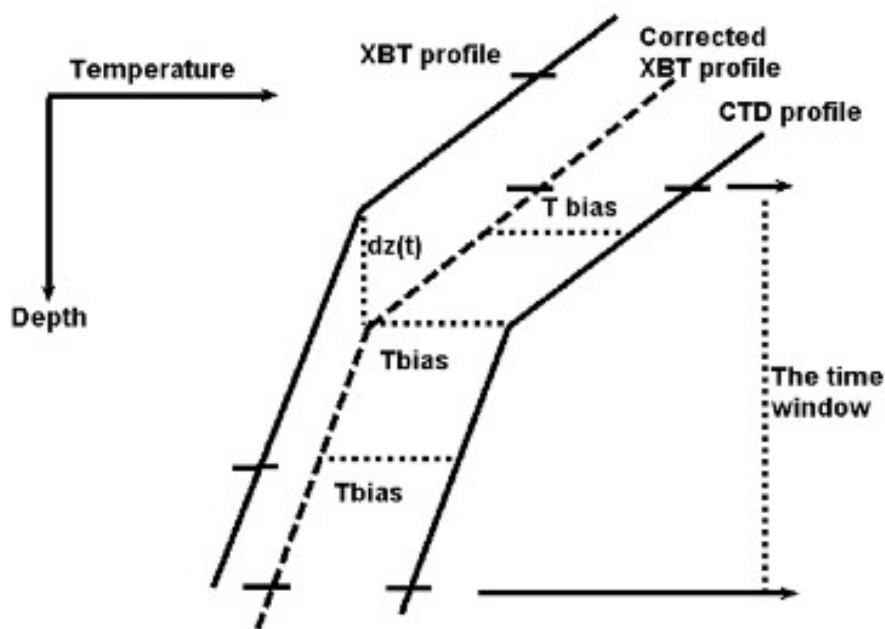
Os limites de combinação foram assim definidos levando em consideração trabalhos pregressos e, também, tempo computacional. A melhor combinação dos coeficientes para cada par de XBT-CTD é obtida segundo o valor mínimo da função . Os coeficientes finais , e *offset* para um conjunto de dados XBT são calculados pela média ponderada dos coeficientes individuais obtidos para cada um dos pares parte desse conjunto de dados. Os pesos da média ponderada

são as profundidades de cada perfil XBT, dando mais importância àqueles mais profundos. Para esse estudo, entretanto, o *offset* foi aplicado individualmente por perfil para a correção e não a média ponderada do mesmo. Isso porque não estavam disponíveis no banco de dados os valores de altura de lançamento dos XBTs, o que é imprescindível para uma análise mais acertada desse termo [Bringas & Goni 2015].

A figura 4 esquematiza em uma janela de tempo os princípios utilizados na correção da profundidade do XBT aplicados por esse método. Para cada uma das janelas de tempo definidas, o desvio das diferenças de temperatura é zero quando o perfil vertical da temperatura do XBT é paralelo ao perfil do CTD correspondente. Dessa forma, o erro sistemático relativo ao termistor é ignorado na correção da profundidade, permitindo que ele seja analisado de forma independente posteriormente, como resíduo desse procedimento [Cheng *et al.* 2011].

Logo, os resíduos da correção da profundidade correspondem ao erro do termistor [Cheng *et al.* 2014] e são dependentes do tempo (ano de fabricação) e temperatura, uma vez que aumentam significativamente em águas mais quentes [Reverdin *et al.* 2009]. Além disso, estudos indicam também que diferentes sistemas de aquisição de dados podem ter um efeito importante sobre esse erro. Cowley *et al.* [2013] apontaram que os gravadores analógicos produzem um incremento de temperatura positivo no perfil de XBT em torno de 0,13°C, enquanto Heinmiller *et al.* [1983] e Emery *et al.* [1986] encontraram um erro de 0,15°C. Ainda que produzindo erros menores, sistemas de gravação digital são igualmente relacionados a erros positivos com valores que vão desde 0,01°C a 0,07°C [Cowley *et al.* 2013]. Uma vez que os metadados não estavam disponíveis para boa parte dos perfis de XBT utilizados nesse estudo, as correções para

o erro do termistor utilizadas são os valores fixos por ano de fabricação estabelecidos por [Cheng et al. \[2014\]](#). Conforme recomendado por [Cowley et al. \[2013\]](#), se a data de fabricação for desconhecida, o erro do termistor deve ser corrigido de acordo ano de lançamento como uma aproximação.



**Figure 4.** Esquema exemplificando o princípio do método recomendado pela comunidade científica em 2015. Retirado de [Cheng et al. \[2011\]](#).

### 3.3 Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square*– RMS)

Apesar das várias fontes de erro relacionadas ao XBT até então apresentadas e discutidas por diversos autores, esse presente estudo concentra o esforço científico somente nos erros de profundidade referentes aos problemas oriundos do uso de uma FRE para estimar essa variável. Dessa forma, para identificar os erros de profundidade foram calculados os perfis médios de temperatura para o CTD e para as diferentes FRE consideradas nesse estudo, sendo elas: (a) Sippican (), (b) H95 () e (c) FRE calculadas com o método de [Cheng et al. \[2014\]](#) para o conjunto de dados aqui considerado. Esses



erros foram quantificados de forma integrada (todos os 147 pares) e por região (Drake, África e Austrália) através do RMS (*Root Mean Square*, Eq. 6).

Na equação 6, indica o número da amostra (e.g. profundidade quando calculado na vertical) e a temperatura para cada par em seu determinado nível/profundidade ().

### 3.4 Conteúdo de Calor do Oceano (Ocean Heat Content – OHC)

O conteúdo de calor é um indicador da quantidade de calor armazenado em uma determinada camada ou profundidade dos oceanos [Cheng *et al.* 2015]. Já que o oceano Austral é um importante absorvedor de energia e uma grande parte dos dados da região é composta por XBTs, é importante que se estime o quanto as diferenças entre as FRE consideradas nesse estudo e o CTD impactam essa variável.

Nesse estudo, o OHC é estimado de 0 a 700 metros de profundidade e por área ( $J$ ) amostrada, ou seja, área dos pares considerados. A análise foi feita pela equação 7, sendo  $\rho$  densidade em  $kg\ m^{-3}$ , o calor específico em  $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ , a temperatura em  $^\circ C$  e a profundidade em  $m$  [Ishii & Kimoto 2009].

## Capítulo IV

**E**ssa dissertação foi elaborada na forma de artigo, permitindo sua pronta submissão a uma revista especializada. Dessa forma, resultados e respectivas discussões serão abordados nas próximas seções.

## **An Assessment of the XBT Fall-rate errors in the Southern Ocean**

### **1. Introduction**

Among the water properties sampled and analyzed in the oceans, temperature represents the greater part of the available data. That is basically due to the equipment required for such measurement being relatively simple and inexpensive. In this sense, much of the existing temperature data in the Southern Ocean was acquired through eXpendable BathyThermographs (XBT), originally developed for military use during the 1960s but widely deployed for upper-ocean scientific sampling, especially after the 1970s [Gouretski & Reseghetti 2010; Cheng *et al.* 2011]. Due to its popular use by the scientific community, XBT data holds great relevance for marine studies, weather forecasting and projections of future conditions [Wijffels *et al.* 2008]. In fact, studies indicate that 38% of all upper ocean temperature in World Ocean Database 2013 (WOD13) were provided by XBTs deployed from 1970 to 2001 [Boyer *et al.* 2013]. Although ARGO floats have been dominating temperature and salinity profiles in the global ocean for the last decades, scientific studies still rely on XBT transects when studying variability of surface and subsurface currents, ocean and climate modeling, data assimilation [Giese *et al.* 2011] and climate change. Moreover, regular spatial and temporal sampling cannot currently be obtained using any other observational equipment or system [Boyer *et al.* 2013].

The XBT consists of a thermistor attached to the tip of a bulb with two hydrodynamic copper wire coils that unroll in opposite directions from a ship. This ensures punctual measurement and "free-fall" launch for the probe that experiences no drag from the moving vessel. The depth in XBTs is not directly measured because there is no pressure sensor connected to the system, being inferred by a "fall-rate" equation (FRE) developed by the probe manufacturer (Lockheed Martin Sippican, hereafter Sippican), according to probe motion observations. This equation is based on the XBT elapsed-time, such as:

where, FRE coefficients  $a$  and  $b$  are determined by the manufacturer and  $t$  is the elapsed time starting when the probe first hits the water. They purely represent the vertical velocity ( $v$ ), as a function of the hydrodynamic characteristics of the probe in the water, and the acceleration of the probe ( $a$ ), which is a function of the change of mass of the probe as it unreels the wire and of the change in density and viscosity of the water [Green, 1984]. Since the FRE coefficients are related mostly to the XBT dimension, weight and material, they change depending on the XBT model (T4, T5, T6, T7, T10 and Deep Blue) and so does their reach (Tab. 1). This study focuses in the latest models T7 and Deep Blue (DB) that can reach up to 760m depth and whose Sippican FRE is designated as [Cheng *et al.* 2014].

In other words, a raw XBT profile consists of electrical resistance measurements as a function of elapsed time [Cheng *et al.* 2011]. These resistance values are converted into temperature values applying Steinhart-Hart equation [Georgi *et al.* 1980] and, ultimately, the FRE establishes a relation between elapsed time and depth. Thus, water properties such as viscosity and density and their variability

may affect the descending speed of the XBTs [Seaver & Kuleshov 1982], causing significant errors in depth estimation.

**Table 1.** Characteristics of different probe types (adapted from Cheng *et al.* [2014]).

	Acquisition Time (s)	Ship Speed (knots)*	Max depth (m)	Sippican FRE	
				A (%)	B (%)
<b>T4</b>	70.5	30	460	6.472	216
<b>T5</b>	290.5	6	1830	6.828	182
<b>T6</b>	70.5	15	460	6.472	216
<b>T7</b>	118.3	15	760	6.472	216
<b>DB</b>	118.3	20	760	6.472	216
<b>T1</b>	32.1	10	200	6.301	216
<b>0</b>					

\*1 = 0.51

In 1995, the first global correction scheme accepted by the scientific community entered in use [Hanawa *et al.* 1995, hereafter H95]. H95 correction scheme relied on the comparison of 285 XBT profiles with measures taken by a conductivity-temperature-depth (CTD) at the same place and time. According to Hanawa & Yasuda [1992] when CTD and XBT measurements are conducted repeatedly over an observational line, a pseudo-waving of the isotherms ("XBT wave") appears on the vertical temperature profile (cross section). This is related to the depth error in XBT data, since CTDs have a more accurate thermistor (0.003°C to 0.02°C against 0.2°C global estimate for XBT) and a pressure sensor [e.g. Flierl & Robinson 1977, Seaver & Kuleshov 1982]. FRE coefficients were then recalculated and the new FRE (T7/DB) was adopted by the Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) and manufacturers. This correction scheme, however widely used, fails to detect the pure thermal bias ( $dT$ ) since it uses

temperature gradients instead of temperature measurement itself while performing. For the same reason, it does not perform well when these gradients are weak [Cheng *et al.* 2011]. In addition, this method is not time-dependent [Cheng *et al.* 2014, Cheng *et al.* 2015] and neither includes high latitude profiles in its new fall rate analysis [Thadathil *et al.* 2002].

In the last decade, many studies have tried to size the XBT bias and remove them from XBT datasets in order to use data for climate studies [Wijffels *et al.* 2008, Ishii & Kimoto 2009, Levitus *et al.* 2009, Gouretski & Reseghetti 2010, Good 2011, Gouretski 2012, Hamon *et al.* 2012, Cheng *et al.* 2011, Cheng *et al.* 2014]. A summary of all cited methods was compiled by Cheng *et al.* [2014], broadly indicating the existence of systematic errors in XBT measures that have various sources, not to mention a significant variation within probe type, time and acquisition system used. These different XBT biases can be generally grouped in (a) depth errors due to a faulty FRE, (b) dT and (c) start-up transient combined with spikes and random unexpected occurrences [Cheng *et al.* 2011]. The source of the start-up transient error is said to be both electrical, when the error is caused by a late adjustment of the thermistor to the surrounding water temperature [Cheng *et al.* 2011], and external since it is directly related to the launch height [Bringas & Goni 2015] and might be also dependent on the probe conditions when hitting the water [Abrahamet *et al.* 2013]. Regarding random errors, spikes are mostly caused by electrical sources such as the recording system used, faulty ground connection and wire [Reseghetti *et al.* 2007]; however, random errors can also be traced back to atmospheric conditions and sometimes ship speed. Research efforts are currently underway to improve our understanding of the depth *offset* term sources [Cheng *et al.* 2015].

Fall rate errors on the other hand, can have mechanical sources, such as probe weight and dimensions, shape, nose roughness and year of fabrication [Green 1984, Seaver & Kuleshov 1982], but also external factors may also intervene, such as water conditions and its thermohaline characteristics [Thadathil *et al.* 2002]. Systematic depth errors are a function of water temperature since water viscosity is highly dependent on temperature, affecting probe motion [Kizu *et al.* 2005, Cheng *et al.* 2014]. Following this line, several studies have investigated how regional hydrographic characteristics might influence FRE's performance. Most of the studies, however, cover tropical or subtropical areas such as the Australian coast [Ridgway *et al.* 2002], North Pacific [Kizu *et al.* 2005] and the Mediterranean Sea [Reseghetti *et al.* 2007].

Although XBT bias has already been assessed and estimated regionally in several subtropical and tropical locations, there seems to be still a lack of investigation effort in high-latitudes. Whilesome studies were performed [Pennington & Weller 1981, Wisotzki & Fahrbach 1991, Thadathil *et al.* 2002, Hutchinson *et al.* 2013], they all recommend further analysis in these regions as to account for the XBT bias properly.

In that sense, Thadathil *et al.* [2002] observed when comparing profiles pairs of XBT and CTD in the Southern Ocean south of Tasmania that XBT probes fall slower in the polar and subpolar regions. That is due to the much colder temperatures that the probes are exposed when compared to the study of Hanawa *et al.* [1995], who used tropical waters data to recalculate the coefficients. Furthermore, Hutchinson *et al.* [2013] when analyzing XBT/CTD pairs south of Africa also proposed the hypothesis that, due to the higher

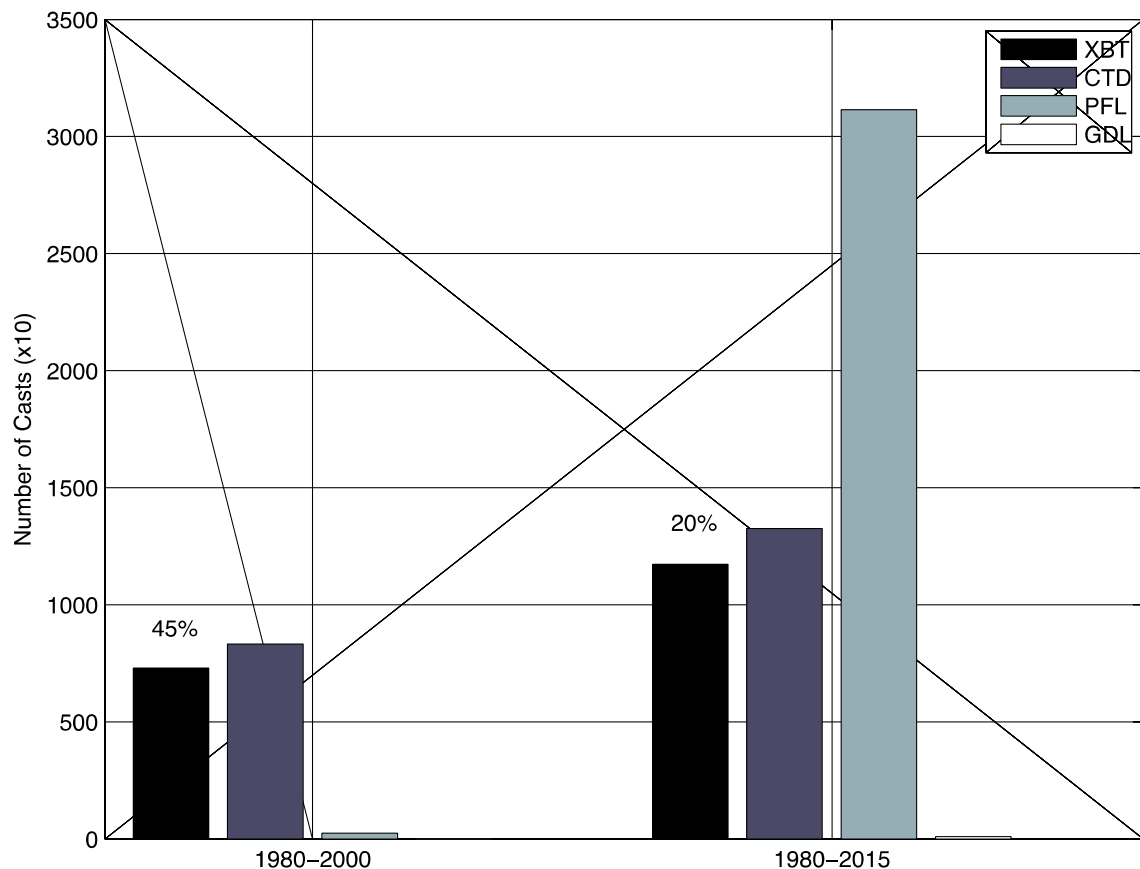
viscosity of the relatively cooler water of the Southern Ocean, the probe suffers more friction and reduce therefore its falling speed. Thus, when XBTs perform a slower descend than anticipated by the FRE provided by the manufacturer it does result in shallower temperature readings than the depth associated. This leads to considerably warmer conditions than those shown by a CTD at the same level.

Recent observations have suggested that the Southern Ocean is warming faster than other regions of the world ocean [[Gille 2008](#)]. However, data from XBTs are relatively dominant in this region (45% of all temperature profiles between 1980 and 2000 as displayed in figure 1, leaving it unclear whether this warming signal would be partially caused by overestimation of depth in available XBT data or in fact a response to global climate change [[Hutchinson et al. 2013](#)]. Although XBT data without bias corrections are still suitable for many scientific applications, only corrected data can be used for climate research [[Cheng et al. 2015](#)]. Therefore, it is of utmost importance that the errors associated with XBTs are correctly estimated in the Southern Ocean and that the available data is corrected for the extreme conditions of this environment, so that we can understand the magnitude of the variability in the region.

Finally, although some studies have observed a decrease in the FRE coefficients in cooler waters due to an increase in its viscosity [[Gouretski & Reseghetti 2010](#)], this effect has not been yet properly quantified. For this reason, most of the correction schemes proposed have not included this scenario on their accounts, not even the current recommended method developed by [Cheng et al. \[2014\]](#). Thus, the quantification of the depth bias in high-latitude regions is important for accurate corrections in the Southern Ocean [[Cheng et al. 2014](#)] and, ultimately,



reliable Global Ocean Heat Content (GOHC) estimates. In this sense, this study aims to identify and quantify the errors of depth of XBTs in choking areas of the Antarctic Circumpolar Current (ACC) in the Southern Ocean, proposing a regional FRE equation that offers a more consistent correction to the unique and extreme features of the region.

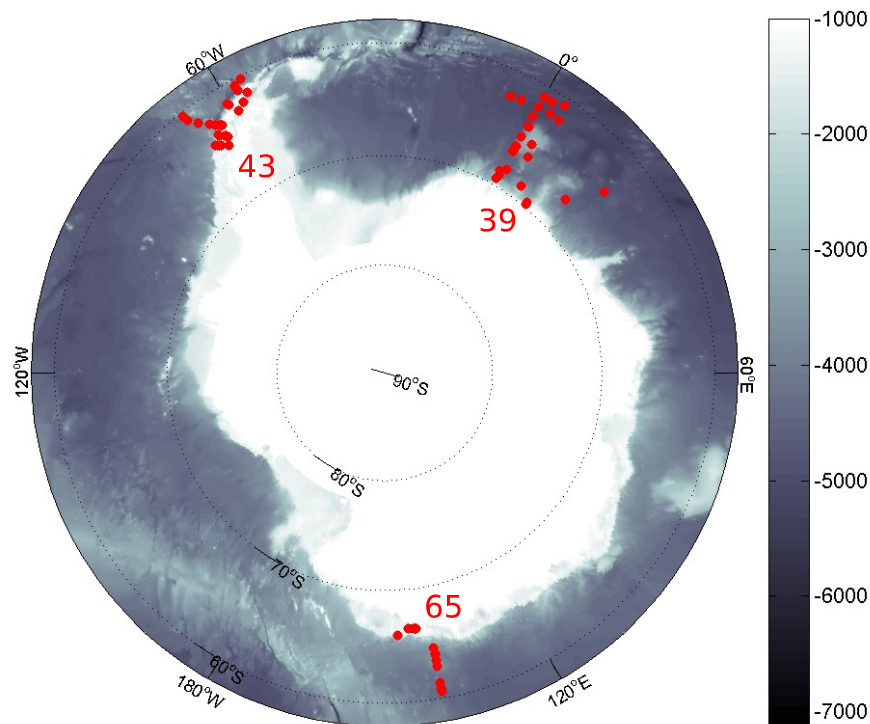


**Figure 1.** Histogram showing temperature cast numbers per profiling equipment in the WOD13 below 60°S, being XBT (black), CTD (purple), ARGO (PFL –gray) and gliders (GDL – white). XBTs correspond to 45% of all casts between 1980 and 2000 and for 20% between 1980 and 2015. In the latter, Pinniped Bathythermographs were excluded from the analysis for scale reasons. They correspond to 202735 temperature casts and, if included in the display, XBTs would represent around 4% of the total profiles.

## 2. Data and Methods

### 2.1 Finding XBT-CTD pairs

To investigate and quantify XBT bias in the Southern Ocean, XBT and CTD data below  $60^{\circ}\text{S}$  were extracted from WOD13 and crossed in order to find time-spaced pairs. Only profiles with a maximum distance radius of 12.5mn (or  $0.2^{\circ}$  of latitude/longitude) and temporal difference under 10h were admitted as collocated pairs [Hutchinson *et al.* 2013]. Initially, the data pairs were grouped within the three choking points of the ACC: Drake Passage (43), south of Africa (39) and South Tasmania / Australia (65) (Fig. 2), summing up to a total of 147 pairs.



**Figure 2.** Map showing the location (red) of all collocated XBT-CTD considered in this study, being 43 pairs in Drake Passage (DRA), 39 pairs south of Africa (AFR) and 65 south of Australia (AUS).

Both CTD and XBT profiles were subject to quality control. Similarly to previous correction methods, two types of filters were applied to both XBT and CTD data:

first a (1) non-linear Median filter to eliminate spikes and, in sequence, (2) a low-pass linear Hanning filter to smooth smaller erroneous signals.

The data were also manually checked to ensure that all values deeper than any spike that was not flagged as bad was also removed. Although they often seem to be good to use, those data is very likely to contain significant bias [Anderson 1980, Hutchinson *et al.* 2013]. This procedure is necessary to remove false warming signals caused by a variety of sources (wire break, “hit bottom” signals, wire stretch, etc) and to guarantee the quality of the depth bias analysis, since these issues might affect the method’s performance [Cowley *et al.* 2013].

Originally, this study started with 633 XBT-CTD pairs, being 245 from DRA, 156 from AFR and 232 from AUS. Thus, this process can be very fastidious, eliminating from the analysis approximately 76% of all pairs found within the database.

## 2.2 Calculating new FRE coefficients

In order to identify and quantify XBT bias in the Southern Ocean, this study proposes to test the performance of a regional equation against the FRE provided by the manufacturer. For that matter, new FRE coefficients were calculated from the side-by-side pairs using the scientific community recommended method initially proposed by Cheng *et al.* [2011] and established by Cheng *et al.* [2014] (Fig. 3).

One of the most important changes of this method in comparison with Sippican FRE is the introduction of an *offset* term also called start-up transient. This term accounts for all unpredictable deviations that the probe is subject when it first hits

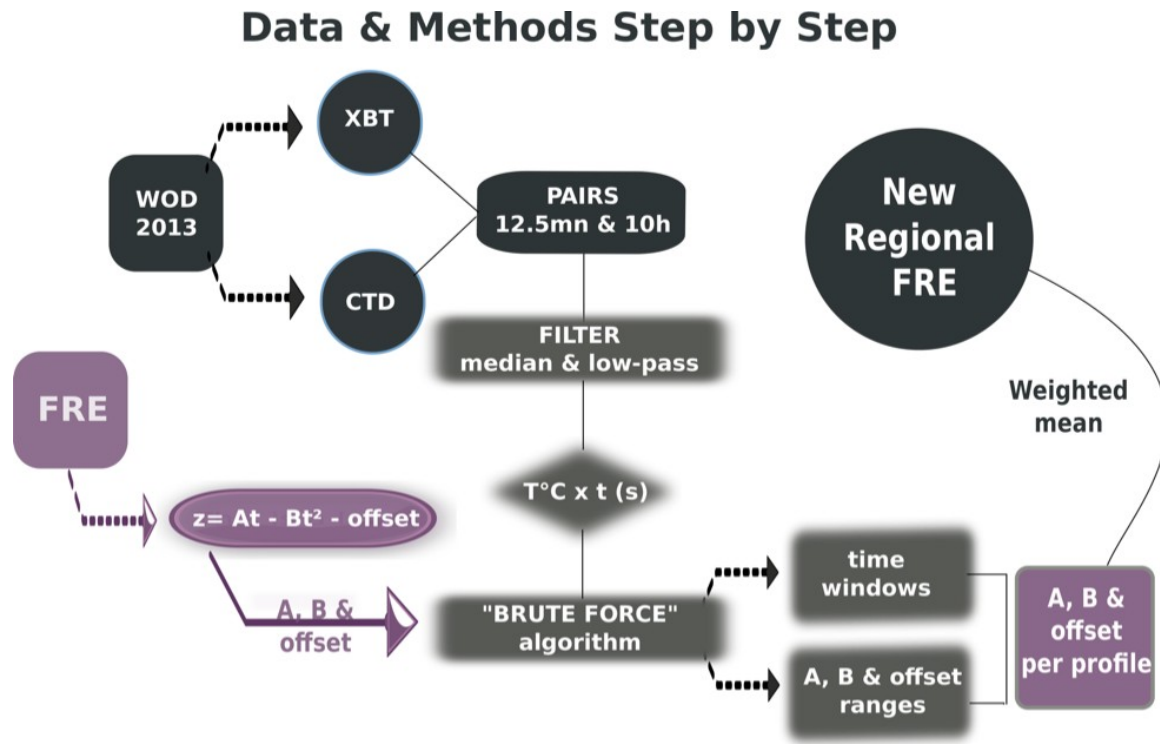
the water; being related to launch height, angulation or even a delay of the thermistor to respond or adapt to its surroundings. It also incorporates random errors, such as spikes caused by rough weather that were not previously eliminated by data processing. Profiles that passed through the quality control process can then be incorporated into the analysis.

Individual FRE coefficients for XBT profiles are calculated by minimizing the standard deviations of the temperature differences between the given XBT-CTD pair. Analyzing the temperature itself [Cheng *et al.* 2011] instead of temperature gradients [Hanawa *et al.* 1995] allows an independent account of the dT and depth bias.

The final coefficients A, B and *offset* coefficients for the XBT dataset were calculated by the weighted median of the individual coefficients obtained for each of the pairs. The weights were the depths of each XBT profile, giving more importance to deeper recording.

The residuals after correcting the XBT profile are regarded as the dT [Cheng *et al.* 2014] and are said to be time and temperature dependent [Reverdin *et al.* 2009]. Moreover, previous studies also indicate that different recording systems might have a major effect on temperature bias. Cowley *et al.* [2013] have found that analog recorders do produce a positive temperature bias that can be near 0.13°C, while Heinmiller *et al.* [1983] and Emery *et al.* [1986] found a 0.15°C bias. Despite producing smaller biases, digital recording systems are similarly related to positive bias with values spanning from 0.01°C to 0.07°C [Cowley *et al.* 2013]. Since we did not have metadata for most of the XBT profiles in this study, we are using the dT values per year of fabrication established by Cheng *et al.* [2014]. As

recommended by Cowley *et al.* [2013], if the date of fabrication is unknown, dT values should be added according to year of launch instead as an approximation.



**Figure 3.**Flowchart displaying Cheng's depth bias correction steps.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1FRE performance analysis

As mentioned in Section 2, the collocated XBT-CTD pairs were firstly grouped within the main choking points of the ACC in order to facilitate comparison with existing studies. Although it is possible to account for different types of biases regarding XBT data, this study focuses on giving a contribution for the depth bias in the Southern Ocean. The new FRE coefficients that are going to be tested

were calculated using [Cheng et al. \[2011\]](#) method as described in section 2 for each of the chocking regions and also for the whole dataset as shown in table 2.

**Table 2.** New FRE coefficients calculated for the three chocking regions Drake (DRA), Africa (AFR) and Australia (AUS) and also for the whole Southern Ocean dataset (SO). Sippican and classic H95 FRE coefficients are also displayed to facilitate the comparison.

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>offset</b>
	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>DRA</b>	6.449	0.0029	-1.4047
<b>AFR</b>	6.481	0.0033	1.2513
<b>AUS</b>	6.208	0.0024	1.2985
<b>SO</b>	6.351	0.0024	0.4952
<b>SIP</b>	6.472	0.0021	-
<b>H95</b>	6.701	0.0028	-

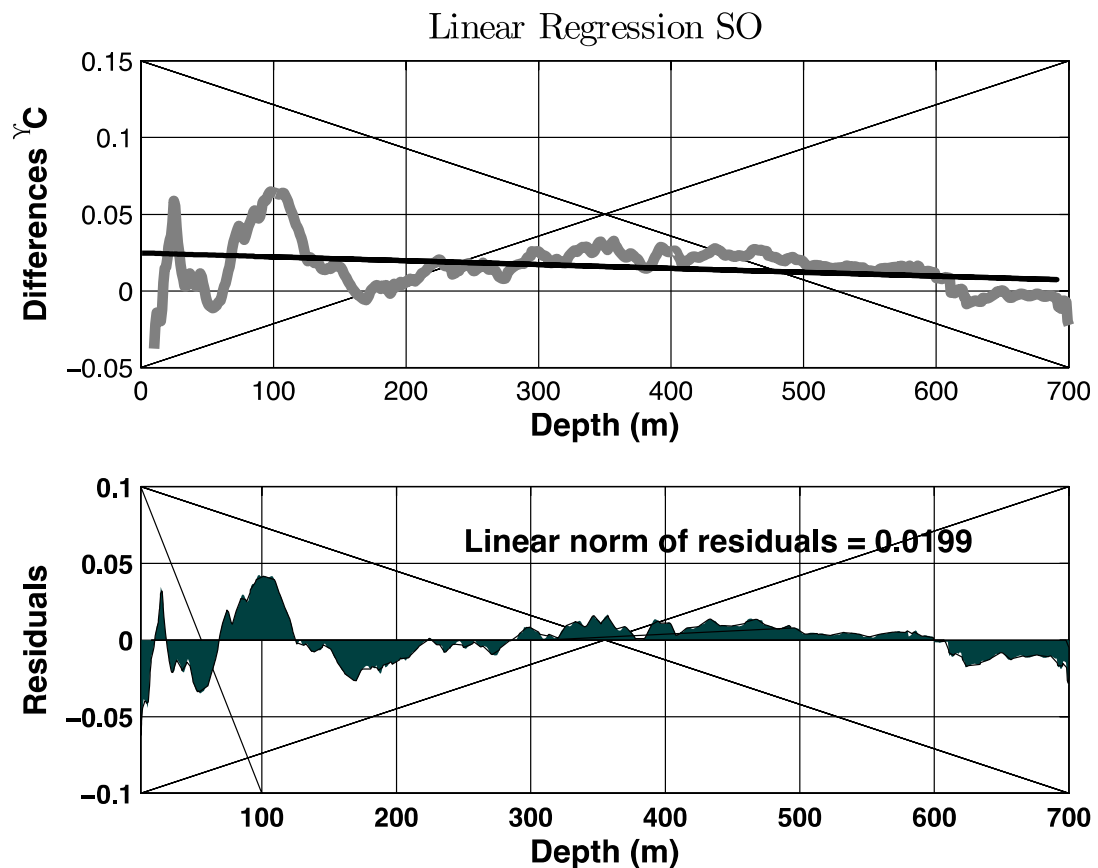
Coefficients  $A$  and  $B$  are the result of the weighted mean of the coefficients found for each profile. The *offset* term, although shown as an average, was applied individually to each of the profiles. That is mostly because [Cheng et al. \[2011\]](#) noticed a probe-to-probe difference of the transient term even when the probes were launched at the same time and under the same conditions. In addition, besides all source errors for the *offset* term described in Section 1, its strong relation with launch height ought to be well investigated in order to make an assumption such as the regional average of that term. However, launch height was unavailable in the metadata for most of the XBT profiles and this study did not have enough pairs to make a statistically significant analysis regarding the *offset* averaged term. Nevertheless, research is still underway to further understand the *offset* behavior [[Cheng et al. 2015](#)].

It is noticeable that the new coefficients are closer to the Sippican FRE coeffi-

cients than to H95's classic global correction. The Drake and Africa coefficients differ from Sippican's by less than 1%. On the other hand, AUS choking point, which happens to have more pairs differs by -4.08% from the original value and from the whole dataset by -1.87%. [Thadathil et al. \[2002\]](#) when analyzing 16 XBT-CTD pairs south of Tasmania also observed that the old manufacturer's FRE equation seems to work well in cold Antarctic waters, possibly because of viscosity changes – which are a function of the FRE coefficient. They suggested that the FRE coefficients should depend on latitude (they admitted that the probe motion depended on water temperature). Regarding coefficients, they would reach the boundaries of its determined search window in Cheng's FRE method for some of the profiles. That happens because, when a temperature profile is homogeneous (common in the deeper or extreme cold waters), using different values of might not be of great significance. In other words, those cases provide no sufficient information to get an accurate estimate of .

After applying the new FRE to the dataset,  $dT$  correction was also added. The corrections of  $dT$  are not part of the depth estimates, being largely dependent on temperature [[Cheng et al. 2015](#)]. Essentially, the warmer the temperature flowing by the XBT thermistor the bigger the  $dT$  [[Reseghetti et al. \[2007\]](#)]. Since the temperature gradients in the Southern Ocean are really small and the temperature values are generally quite low, high  $dT$  values related to temperature were not expected. Therefore, data was corrected by adding the time-dependent  $dT$  values proposed by [Cheng et al. \[2014\]](#). Launch year instead of fabrication year was used because it was not possible to access this specific info in the metadata provided by World Ocean Database for the large majority of the XBT-CTD pairs.

Prior to using the recommended  $dT$  values though, a robust fit was applied to the data (Fig. 4) in order to test if the  $dT$  for this dataset has a linear behavior as reported in previous studies [Cheng *et al.* 2011, Cowley *et al.* 2013].



**Figure 4.** Robust fit of  $dT$  errors (upper panel) with the corresponding norm plot of residuals (lower panel). Solid black line in the upper panel indicates the linear regression trend line.

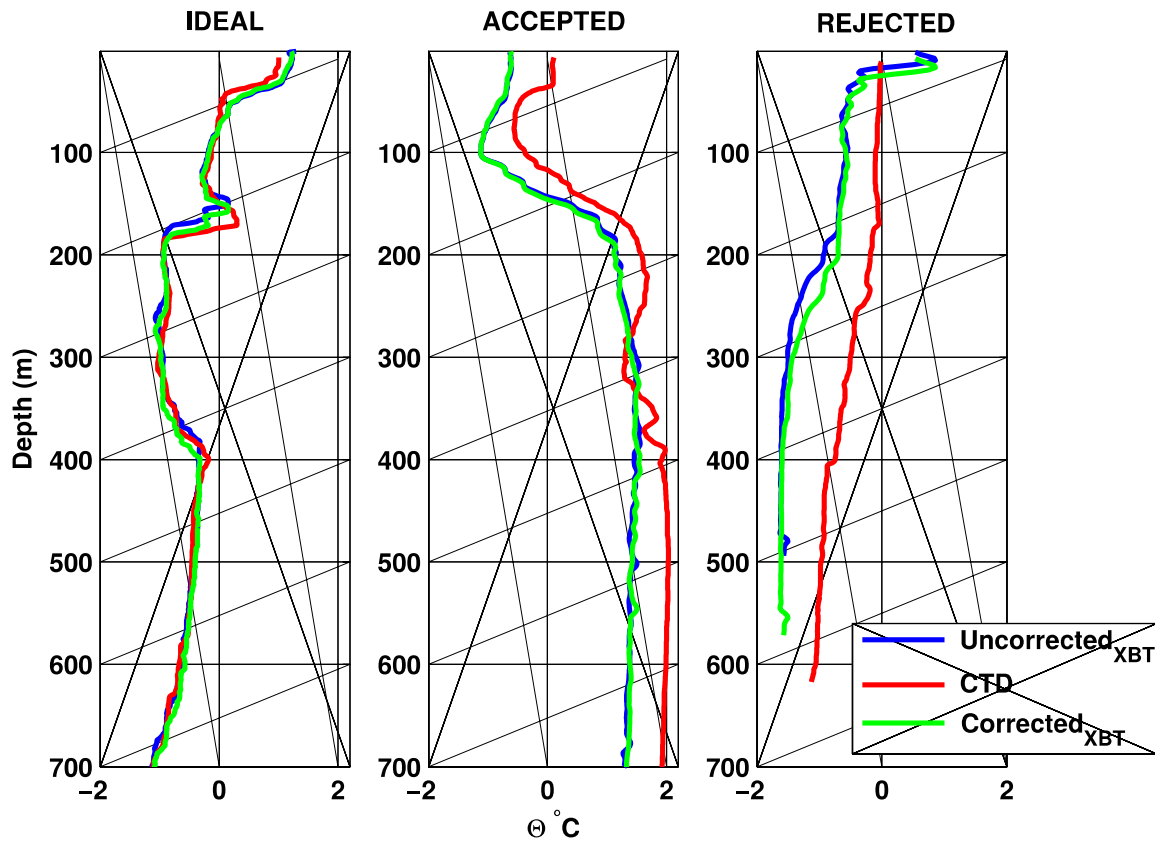
The differences seem to be larger in the surface than in deeper waters, which corroborates results of previous authors and suggests that  $dT$  can be corrected by a linear function. Likewise, the linear regression equation found for this dataset defined as is also consistent with the findings reported by Cheng *et al.* [2011]. This behaviour is not a response to pressure increase, being more related to the time the sensor takes to adjust to surrounding waters when the probe falls. In addition to the expected linear trend, the amplitude of the oscillation of the



residuals is also correspondent to [Cheng et al. \[2011\]](#) and [Reseghetti et al. \[2007\]](#) findings for a dataset in the Mediterranean Sea.

After following these procedures, we expected to find a majority of pairs where XBT profiles were warmer than CTD profiles for the same reported depth. Figure 5 shows examples from Drake Passage of the type of pairs considered in this study and the ones that were discarded.

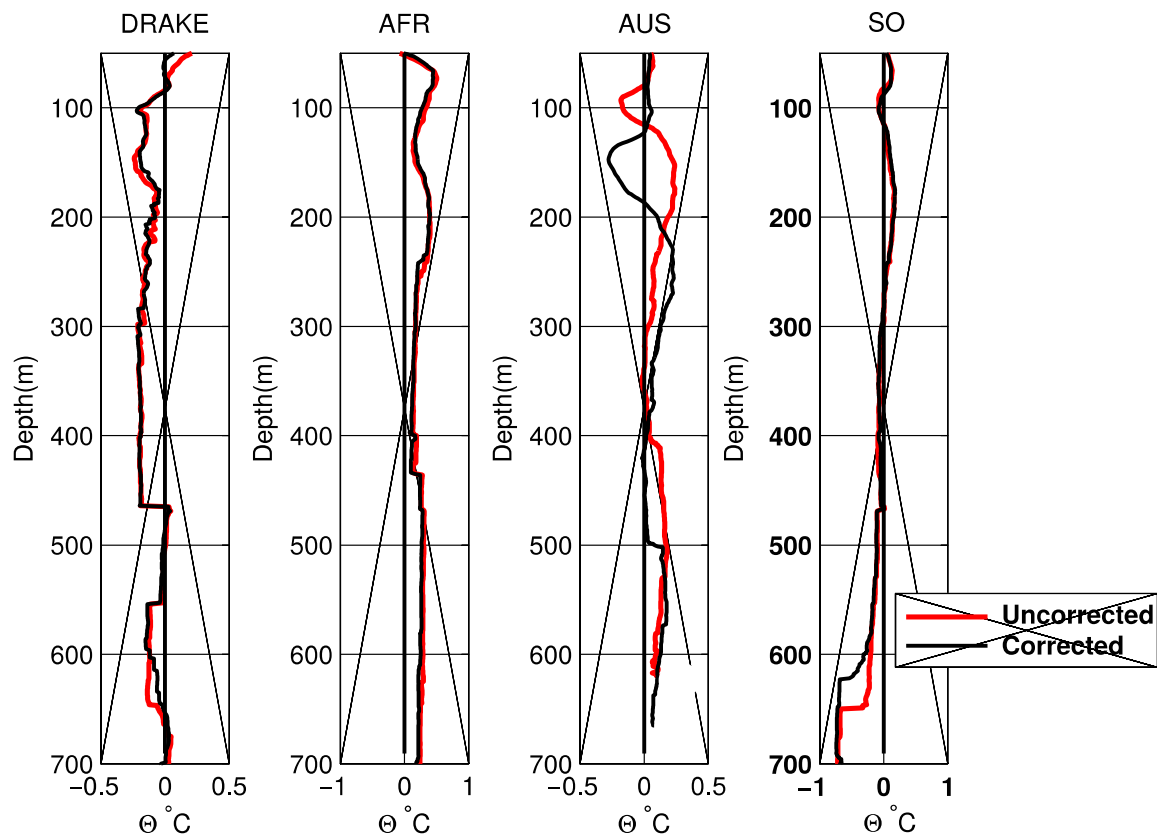
Ideal pairs are those where the “xbt wave” is identified without the major displacement of the entire XBT profile as represented by the left panel. In the middle panel there is an example of profiles that have presented a more significant displacement of the XBT profile but were also still considered in the analysis. Finally, the right panel shows one of the rejected profiles that does not quite correspond to the CTD profile in any depth. Profiles with more than  $1^{\circ}\text{C}$  difference or with curves presenting fairly different behaviours fall into this last category.



**Figure 5.** Example of collocated XBT-CTD pairs. Temperature XBT (blue), CTD (red) and corrected XBT (green) profiles are displayed in sequence representing ideal pairs (left panel), not ideal but still in the range of acceptance pairs (mid panel) and rejected pairs (right panel). All of the three profiles in display are from Drake Passage.

The purpose of this analysis was to assess the XBT FRE errors in the Southern Ocean by testing the performance of a regional FRE equation ultimately assessing the impacts on Ocean Heat Content estimates. Because using the averaged terms can mask small differences, the RMS of the CTD temperature was subtracted from the RMS of the corrected (black) and uncorrected (red) XBT temperature profile. Positive (negative) values indicate that the XBT temperature profile was lower (higher) than the CTD temperature profile at a certain depth. Figure 6 shows the temperature RMS differences analysis for each of the ACC

chokings to facilitate comparison. Profiles were interpolated and averaged by depth before performing RMS in a 2D dimension.



**Figure 6.** Difference between CTD and corrected and uncorrected XBT mean RMS for the three chokings along depth. Red (black) solid lines show the difference between CTD RMS and uncorrected (corrected) XBT RMS.

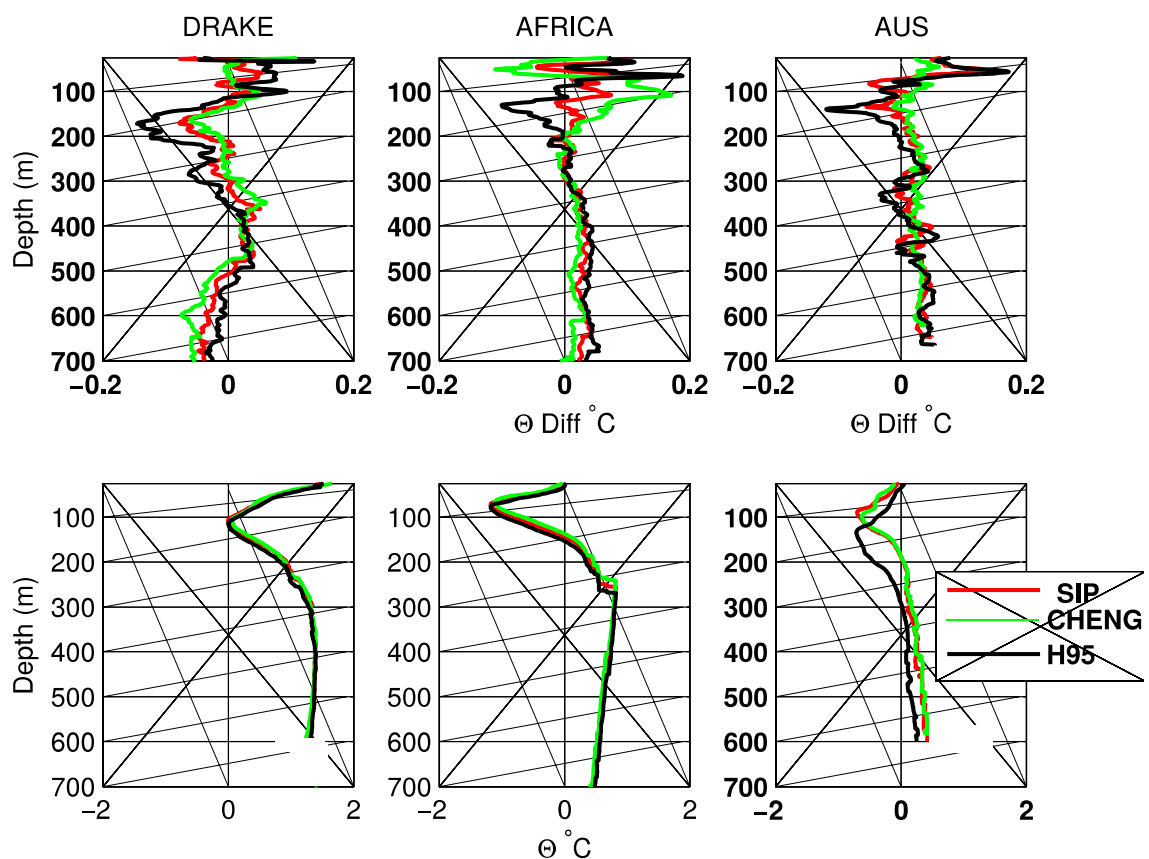
For most XBT-CTD pairs in the dataset, XBT temperature was higher than the temperature recorded by the CTD. AFR and AUS have reflected what was observed from [Thadatil \*et al.\* \[2002\]](#) and [Hutchinson \*et al.\* \[2013\]](#), respectively. Although the former had only 16 pairs south of Tasmania to report the warm bias for high latitudes, the latter indicated that the warming observed in the Southern Ocean might not be as pronounced as thought based in 148 pairs distributed between South Africa and Antarctic. For Drake Passage, however, the opposite behavior is observed: positive signal throughout the water column, meaning CTD

profiles are mostly warmer than XBT profiles. Nevertheless, it is important to note that yet [Hutchinson et al\[2013\]](#) have reported an overall warm bias on the Southern Ocean, they have also observed a cooling bias south of the Polar Front around 200m, whose southernmost limit is at least north of 56°S in average for all cruises considered. This particular bias was associated with the presence of the Winter Water on the subsurface which sharpens vertical gradients specially during late summer. A seasonal analysis should be conduct in DRA to verify if it is also the case. When taking into account the dataset as a whole, these differences tend to stay very close to zero, suggesting that the processes that are occurring on the choking points are in balance. Except below 500m, where there seems to be a shift and XBT profiles are colder than CTD profiles in average, similar to DRA.

The steep changes at around 450m depth in DRA (and in the SO representation) are possibly responses to shallower pairs, which might compromise the analysis at this critical layer. To give some perspective, 44% (19 pairs) of the pairs in DRA are shallower than 500m. This number is reduced to 30% (12 pairs) and 29% (19 pairs) for AFR and AUS, respectively, constituting 34% (50 pairs) of the Southern Ocean dataset in total.

Following the prior RMS comparison test, the mean temperature differences and profiles along depth were visually inspected. In figure 7, mean temperature differences between CTD and H95 (black), uncorrected (red) and corrected (green) XBT can be seen for each of the chokings on the upper panels. Temperature differences were calculated subtracting CTD temperature from the XBT profile. In general, it is noticeable that the adjustment provided by Cheng's method is very efficient in reducing differences between XBT and CTD profiles for

all regions assessed. In AUS and AFR, differences are very close to zero for most of the profile. Above 200m depth in Africa, the correction scheme did not perform very well, possibly because it is a very energetic region with high incidence of eddies and mesoscale features (ACC eddies) that might not have been completely excluded from the dataset [Hutchinson *et al.* 2013]. AUS displayed better results possibly because there are more pairs composing the mean in this region.



**Figure 7.** Mean temperature differences and profiles for Drake, Africa and Australia. Upper panels show the differences between CTD and uncorrected XBT (red), corrected XBT (green) and the classic H95 correction (black). Lower panels show uncorrected (red), Cheng corrected (green) and H95 corrected (black) XBT profiles for the three choking regions.

In Drake Passage, the new coefficients do not correct the profile properly, performing worse than H95 below 500m. That is consistent with Hallock &

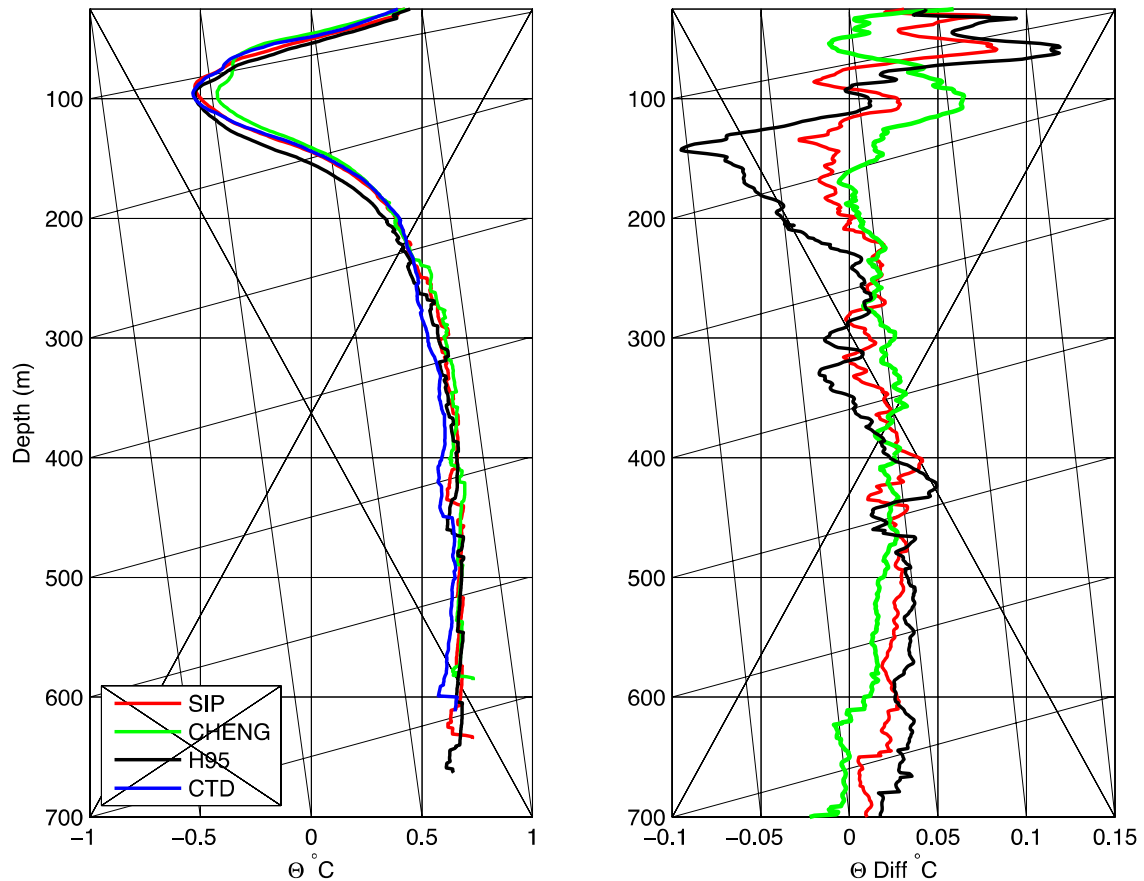
Teague [1992] and Cheng *et al.* [2011] that have encountered a great degree of uncertainty and significant temperature differences between 500 and 600m in Barbados and the Mediterranean Sea. Considerable temperature differences between CTD and XBT measurements within the thermocline are common and well reported, but very few is known about differences in this deeper layer. Cheng *et al.* [2011] found significant but small biases (less than  $0.18^{\circ}\text{C}$ ) that would still remain both within the thermocline regions and at the 450–650-m depth, where the temperature gradients would be varying irregularly with depth. It has been suggested that more detailed studies are needed in order to clarify the processes that might be affecting this specific layer.

For this comparison of the side-by-side pairs, the bias seems to be mostly positive, except for Drake Passage. After corrections, the total bias for Drake, AFR and AUS was  $-0.0176$ ,  $0.0341$  and  $0.0240^{\circ}\text{C}$ , respectively. Hutchinson *et al.* [2013] found also a positive bias for south of Africa but larger, reaching  $0.13^{\circ}\text{C}$ . This indicates that for most of the dataset XBT profiles were reporting warmer temperatures than the CTD profiles, possibly because of an overestimation of the FRE.

The lower panels of figure 7 show the mean temperature profiles for each of the chokings using all pairs available, displaying also Cheng (green) and H95 (black) corrections. Data seems to be in good agreement without extraneous profiles, except for a significant shift in H95 correction for AUS.

When addressing the dataset as a whole and testing one single regional equation for the Southern Ocean in the form of , figure 8 shows temperature means and differences for the whole dataset. Cheng's method seems to be the best

correction for the XBT profiles once differences keep oscillating around zero. The upper layer can be more confusing, but the *offset* term clearly makes a difference on the fitting. The total bias for the Southern Ocean dataset is  $0.0167\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figure 8.** Southern Ocean analysis comparing CTD profiles to uncorrected XBT (red), Cheng corrected XBT (green), the classic H95 correction (black) and CTD (blue). Left plot shows mean temperature profiles and the panel to the right displays the mean differences.

The bias for the entire dataset seems to be largely positive which is once more in agreement with [Hutchinson \*et al.\* \[2013\]](#) and [Thadathil \*et al.\* \[2002\]](#) results. However, the Sippican FRE provided by the manufacturer seems to be responding relatively well to cold conditions. To analyze the performance of each correction scheme, we computed the mean RMS along the profiles, assessing how far from zero are the typical XBT-CTD differences. Table 3 shows the total

RMS values for each of the ACC choking regions individually and for the whole dataset.

Drake Passage was the only region where the Sippican FRE truly performed better than Cheng's correction scheme. When comparing Sippican FRE with Cheng's correction scheme, using a T-test, differences were significant for DRA at 95% confidence level. For AUS, Cheng's method improves the adjustment by .01 °C in comparison and the differences are also significant, within 5% chance of error. The T-test for AFR was inconclusive. H95 presented the worst performance between the three, varying in relation to Cheng's up to .02 °C in AUS, .004 °C in AFR and 0.1 °C in DRA. These results become more significant if the number of pairs by choking comes into question. AUS has 65 pairs, making its estimates more significant when compared to the other two. At the same time, 43 pairs do not seem to be enough of a number in order to analyze XBT FRE variability in the DRA, since the discrepancies are large, even when considering H95. Considering the entire dataset, Cheng's method improves the adjustment by .02 °C when compared to both Sippican FRE and classic H95 correction scheme.

**Table 3.** Total RMS per correction scheme for each of the ACC choking points and for the whole dataset. All variables are in °C.

	<b>DRA</b>	<b>AFR</b>	<b>AUS</b>	<b>SO</b>
<b>SIP</b>	0.0634	0.057	0.037	0.0537
		6	1	
<b>CHEN</b>	0.0731	0.051	0.028	0.0330
<b>G</b>		8	4	
<b>H95</b>	0.1542	0.055	0.044	0.0544
		9	5	



In that sense, this supports the claim that the manufacturer's FRE coefficients might not be perfectly adequate for the extreme conditions of the Southern Ocean but, at the same time, indicates that the Sippican coefficients are still reliable when taking into account high latitudes alone. Overall both Sippican FRE and Cheng's correction results support the claim that indeed the higher viscosity of the region influences the probe drag and speed, thus leading to slower fall than anticipated by the manufacturer. This makes XBT temperature readings shallower than real depth, leading to warmer readings than the CTD for the same reported depth [Hutchinson *et al.* 2013]. Ideally, Cheng's method should be used at all times and locations, but taking into account the peculiarities of the high latitude environments.

### 3.2 Ocean Heat Content

In terms of Ocean Heat Content, results also endorse previous authors in the sense that XBT bias and its dominance between 80s and early 2000 might be overestimating the observed warming for the Southern Ocean [Hutchinson *et al.* 2013]. Figure 9 shows the calculated Ocean Heat Content values for the Southern Ocean coefficients defined by Cheng's method (blue), Sippican's FRE (dark blue) and CTD data (pink). XBT-CTD pairs were grouped in 0.5° latitude bins and, when applying Cheng's method, *offset* was considered individually per XBT profile.

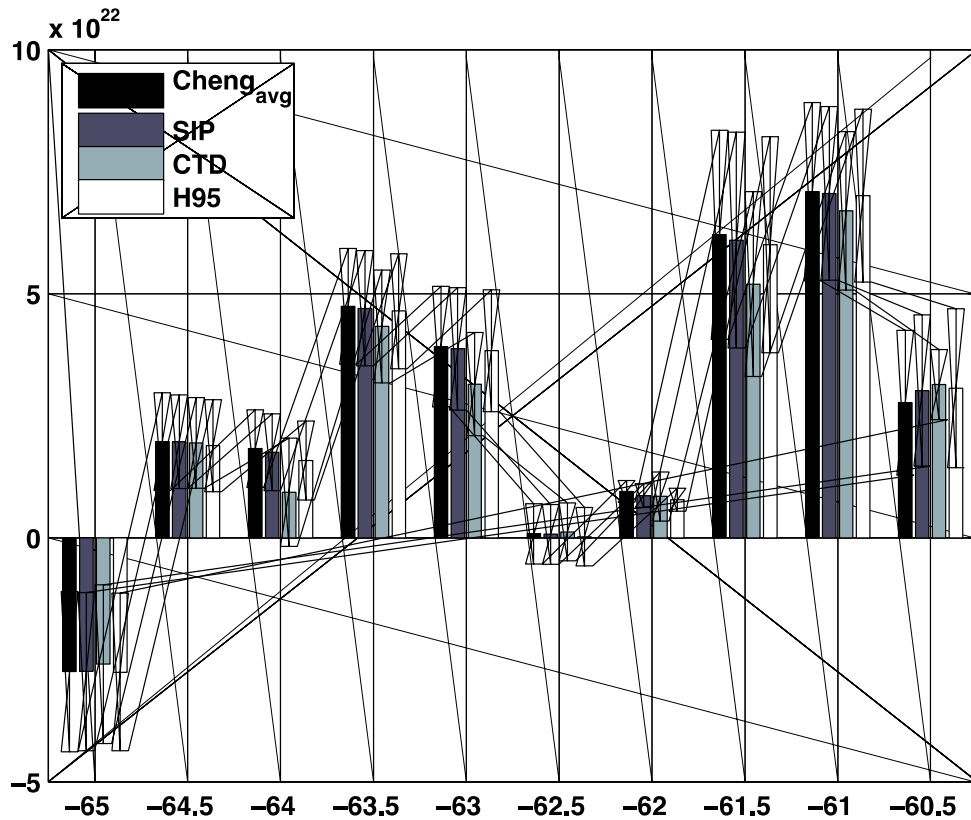
The heat content estimates the amount of heat stored along vertical profiles, as such:

where  $\rho$  is density in  $\text{kg m}^{-3}$ ,  $c_p$  is specific heat capacity in  $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $T$  is temperature in  $^\circ\text{C}$  and  $z$  is depth in  $\text{m}$  [Ishii & Kimoto 2009].

This approach explains why the heat is not gradually increasing while we move north in this dataset. Temperature was interpolated with 1m resolution but the grid was not filled by unrealistic interpolation, leaving blank depths along some profiles.

Comparing both FREs with the CTD data does not indicate very significant differences which is mostly due to the number of pairs used in each latitude bin (10 pairs minimum). It is noticeable that the recommended method and the Sippican's FRE are both achieving a similar correction range. The best performance actually seems to be, in average, from the FRE provided by the manufacturer. However, despite all corrections, both equations still overestimate heat for the ocean's upper layer in average approximately 10%. It seems that both FREs also tend to overestimate negative estimates of heat as well, since in latitude  $65^\circ\text{S}$  the heat content calculated was smaller than the CTD. H95's method was shown not to be a good and comprehensive method for the Southern Ocean, performing worse than Sippican FRE in all previous tests. For OHC, however, its performance is not far from the other correction schemes, even seeming to be the best of the methods at first sight.

Looking at the averaged, Cheng's method overestimates OHC the most, indicating  $2.680 \times 10^{21} \text{ J } ^\circ\text{C}$  of heat against  $2.377 \times 10^{21} \text{ J } ^\circ\text{C}$  estimated with the CTD profiles. Sippican and H95 estimate a total of  $2.666 \times 10^{21} \text{ J } ^\circ\text{C}$  and  $2.607 \times 10^{21} \text{ J } ^\circ\text{C}$ , respectively. All methods though, seem to be overestimating OHC in about 10%.



**Figure 9.** Ocean Heat Content relative to the area occupied by the pairs. OHC was calculated for profiles corrected with mean coefficients and individual *offset* (black), Sippican (purple) CTD (gray) and H95 (white). The errorbars indicate 95% confidence interval.

Within each other, Sippican and Cheng's method FRE differ in less than 1% regarding OHC calculations and in about 1% from H95's. Unarguably, more paired high quality profiles are needed in order to make a full assessment of the OHC biases for the Southern Ocean region.

Finally, it is important to account that XBT bias sources were not addressed as a whole in this study. Firstly, it would be preferred to investigate launch heights in relation to the start-up error as to further account the wide source of errors associated with this term and make the correction as tight as possible. In addition,  $dT$  ideally should have been added using fabrication year and not the

year the probe was launched. This can also be integrating the remaining bias in the results.

#### 4. Summary and Conclusions

The study has investigated the XBT bias in the Southern Ocean, comparing XBT and CTD data to the south of 60°S. The data was extracted from WOD13 in order to find appropriate time-spaced pairs. In total, 147 XBT-CTD pairs with a maximum distance radius of 12.5nm and temporal difference below 10h were analyzed. In agreement with previous studies that also contributed in accounting for the XBT bias in the Southern Ocean, this XBT dataset has shown a positive temperature bias, indicating that there is in fact an overestimating of depth in the region. The Sippican FRE, however, does not perform badly in the Southern Ocean, since its depth estimates are not far from those performed by the recommended method. That is in agreement with [Thadathil \*et al.\* \[2002\]](#) who have observed that the manufacturer's FRE tended to have a better performance in high latitudes than they have in other parts of the globe. One possible cause, might be related to how homogenous the water column is in the Southern Ocean when compared to other ocean regions. The less estratified, the harder it is to model the coefficient of the FRE, related to change in water characteristics (density and viscosity). Thus, the coefficient – which is a function of the hydrodynamic of the probe in the water – would have more significance in correcting the XBT bias. Yet, we estimate that the Sippican FRE overestimation of the coefficients for the whole Southern Ocean dataset is of approximately 2%. When grouped by choking points, results again endorse previous observations

for the Southern Ocean, especially for south of Africa and Australia. For Drake Passage, however, most of the net bias was negative, meaning CTD profile actually records warmer temperatures than the XBT. That could be due to the fact that we lacked the necessary amount of pairs to define the XBT variability in the region. Also, the very dynamic environment might induce plenty of random errors that are sometimes not spotted. Also, the method had trouble adjusting the profiles between 500-600m depth, reproducing a not very much understood behavior already observed by [Hallock & Teague \[1992\]](#).

Regarding to OHC differences, our results show, despite all corrections, an overestimation of heat for the ocean's upper layer in an average of approximately  $2.9617 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{C}$  (or 10%) for both Cheng's and Sippican's equations. Our results therefore indicate that the region is possibly warming less than expected from previous studies in the region [[Gille 2008](#)]. We say possibly because the same time span used in previous studies would be necessary to investigate and compare to precisely understand this bias.

XBTs comprise a large part of the global temperature datasets and science still relies on this equipment for a wide range of ocean, climate and modeling studies. In particular for the Southern Ocean, XBTs form almost 50% of all data available between 1970 and 1980 mainly. In that sense, it is critical to develop a better understanding on XBT bias to use this valuable and significant source of data in climate sciences. A possibility yet to be explored, since the higher the latitude the more the vertical velocity of the probe seems to decrease, would be attributing regional weights to the existing correction schemes.

Thus, more efforts are needed in order to account for XBT biases various sources and  $dT$  relation to latitude, temperature and recording system. In that sense,

more simultaneous pairs are needed to effectively solve these particular issues and diminish uncertainty. The sampling should be ideally simultaneous because sampling these profiles at the exact same time is very significant for improving the performance of our corrections.

### ***Acknowledgements***

This study is a contribution to the activities of the Brazilian High Latitudes Oceanography Group (GOAL; [www.goal.furg.br](http://www.goal.furg.br)), part of the Brazilian Antarctic Program (PROANTAR). GOAL has been funded by and/or has received logistical support from the Brazilian Ministry of the Environment (MMA), the Brazilian Ministry of Science, Technology and Innovation (MCTI), and the Council for Research and Scientific Development of Brazil (CNPq) through grants from the Brazilian National Institute of Science and Technology of Cryosphere (INCT-CRIOSFERA; 573720/2008-8), POLARCANION, NAUTILUS, and CAPES/CMAR2 projects (556848/2009-8; 405869/2013-4, 23038.001421/2014-30). N. R. Santos acknowledges the graduate fellowship funded by the CAPES Foundation. Finally, we would like to thank Dr. L. Cheng for his availability and interest during the development of this study, NOAA World Ocean Database and all scientists who participated in the data collection and made it freely available through the respective databases.

## Capítulo V: Considerações Finais

**E**ste estudo investigou os erros associados às sondas tipo XBT no Oceano Austral, comparando dados de XBT e CTD ao sul de 60°S. Os dados foram extraídos do WOD13, a fim de encontrar pares espaço-temporais dentro de um intervalo pré-determinado. No total, foram analisados 147 pares XBT-CTD admitidos em um raio de distância máxima de 12,5mn e com um intervalo inferior a 10h. De acordo com estudos anteriores que também contribuíram para um melhor entendimento

do erro do XBT no Oceano Austral, o conjunto de dados de XBT mostrou um erro positivo, indicando que há, de fato, uma superestimação da profundidade na região. A FRE da Sippican, no entanto, responde bem às condições do Oceano Austral, uma vez que as suas estimativas da profundidade não diferem significativamente daquelas realizadas pelo método recomendado. Isso está de acordo com [Thadathil et al. \[2002\]](#) que observaram que a FRE do fabricante tende a apresentar um melhor desempenho em latitudes elevadas do que em outras partes do oceano global. No entanto, estima-se que os coeficientes ideais para esse conjunto de dados do Oceano Austral estejam aproximadamente 2% menores que os da Sippican.

Quando agrupados nos pontos de estrangulamento da ACC, os resultados novamente endossam observações anteriores do Oceano Austral, especialmente ao sul da África e Austrália. Para a Passagem de Drake, no entanto, a maior parte do erro total médio foi negativo, significando que os perfis de CTD em sua maioria registraram temperaturas mais quentes do que os perfis de XBT. Isso pode ser porque não possuíamos a quantidade necessária de pares para definir a variabilidade na região. Além disso, sendo o ambiente muito dinâmico, os processos físicos de mesoescala podem ter induzido erros aleatórios que passaram despercebidos pelo processamento. Além disso, o método teve problemas para ajustar os perfis entre profundidade 500-600m, reproduzindo um comportamento não muito compreendido já observado por [Hallock & Teague \[1992\]](#).

No que diz respeito às diferenças OHC, nossos resultados mostram, apesar de todas as correções, uma superestimação de calor para a camada superior do oceano, em uma média de aproximadamente  $2,9617 \times J \text{ } ^\circ C$  (ou 10%) tanto para Cheng quanto para a FRE da Sippican. Nossos resultados, portanto, indicam que o aquecimento acima da média observado por estudos anteriores na região pode ser de ordens menores [[Gille 2008](#)]. Dizemos possivelmente, porque o mesmo período de tempo semelhante ao



utilizado em estudos anteriores seria necessário para que se possa investigar e comparar com segurança.

XBTs compreendem uma grande parte dos conjuntos de dados globais da temperatura e a ciência ainda conta com este equipamento para uma ampla gama de estudos oceânicos, climáticos e de modelagem. Em particular para o Oceano Austral, XBTs formam quase 50% de todos os dados disponíveis entre 1970 e 1980. Nesse sentido, é fundamental que se desenvolva uma melhor compreensão sobre os erros associados ao XBT para que se utilize esta fonte valiosa e significativa de dados em ciências climáticas.

Assim, são necessários mais esforços para investigar as várias fontes de erro e fatores adversos relacionados ao uso do XBT, principalmente no que diz respeito à relação entre os erros do termistor com a latitude, temperatura da água e sistema de gravação. Nesse sentido, são necessários mais pares simultâneos para resolver efetivamente esses problemas mais específicos e diminuir as incertezas. Recomendamos uma amostragem verdadeiramente simultânea, porque a amostragem desses perfis exatamente ao mesmo tempo seria muito significativo para melhorar o desempenho das correções em locais onde o gradiente de temperatura é baixo ou constante, como no Oceano Austral.

## **Referências Bibliográficas**

Abraham JP, Baringer M, Bindoff NL, Boyer TP, Cheng LJ, Church JA, Conroy JL, Domingues CM, Fasullo JT, Gilson J (2013) A review of global ocean temperature observations: Implications for ocean heat content estimates and climate change. *Rev of Geophys* 51(3): 450-483.

Anderson ER (1980) Expendable bathythermograph (XBT) accuracy studies. NOSC Technical Report 550, pp 201.

Boyer TP, Antonov JI, Baranova OK, Garcia HE, Johnson DR, Mishonov AV, O'Brien TD, Seidov D, Smolyar I, Zweng MM et al (2013) World Ocean Database 2013. NOAA Atlas NESDIS 72, pp 209.

Bringas F, Goni G. (2015) Early Dynamics of Deep Blue XBT Probes. *J Atmos Oceanic Technol*32(12): 2253-2263.

Cowley R, Wijffels S, Cheng L, Boyer T, Kizu S(2013) Biases in expendable bathythermograph data: A new view based on historical side-by-side comparisons. *J Atmos Oceanic Technol*30: 1195-1225. doi:10.1175/JTECH-D-12-00127.1.

Cheng L, Zhu J, Reseghetti F, Liu Q (2011) A new method to estimate the Systematical Biases of Expendable Bathythermograph. *J Atmos Oceanic Technol*28(2): 244-265.

Cheng L, Zhu J, Cowley R, Boyer T, Wijffels S (2014) Time, probe type, and temperature variable bias corrections to historical expendable bathythermograph observations. *J Atmos Oceanic Technol*31(8): 1793-1825.

Cheng L, Abraham J, Goni G, Boyer T, Wijffels S, Cowley R, Gouretski V, Reseghetti, F, Kizu S, Dong S (2015) XBT Science: assessment of instrumental biases and errors. *Bulletin of the AMS*. doi:10.1175/BAMS-D-15-00031.1.

Domingues CM, Church JA, White NJ, GlecklerPJ, Wijffels SE, Barker PM, Dunn JR (2008) Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise. *Nature*453: 1090-1093.

Emery WJ, Lee W, Zenk W, Meincke, J (1986) A low-cost digital XBT system and its application to the real-time computation of dynamic height. *J Atmos Oceanic Technol*3(1): 75-83.

Flierl GR, Robinson AR (1977) XBT measurements of thermal gradients in the MODE eddy. *J Phys Oceanogr*7(2): 300-302.

Georgi DT, Dean JP, Chase JA (1980) Temperature calibration of expendable bathythermographs. *Oc Eng*7(4): 491-499.

Giese BS, Chepurin GA, Carton JA, Boyer TP, Seidel HF (2011) Impact of bathythermograph temperature bias models on an ocean reanalysis. *J Clim*24(1): 84-93.

Gille ST (2008) Decadal-scale temperature trends in the Southern Hemisphere ocean. *J Clim*21(18): 4749-4765.

Good SA (2011) Depth biases in XBT data diagnosed using bathymetry data. *J Atmos Oceanic Technol*28(2): 287-300.

Gouretski V(2012) Using GEBCO digital bathymetry to infer depth biases in the XBT data. *Deep-Sea Res Pt I:Oceanogr Res Papers* 62: 40-52.

Gouretski V, Reseghetti F (2010) On depth and temperature biases in bathythermograph data: Development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database. *Deep-Sea Res Pt I:Oceanogr Res Papers* 57(6): 812-833.

Green AW (1984) Bulk dynamics of the expendable bathythermograph (XBT). *Deep-Sea Res Pt I:Oceanogr Res Papers* 31(4): 415-426.

Hallock ZR, Teague WJ (1992)The fall rate of the T-7 XBT. *J Atmos Oceanic Technol*9:470-483.

Hamon M, Reverdin G, Le Traon PY (2012) Empirical correction of XBT data. *J Atmos Oceanic Technol* 29(7): 960-973.

Hanawa K, Rual P, Bailey R, Sy A, Szabados M (1995) A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT). *Deep-Sea Res Pt I:Oceanogr Res Papers*42(8): 1423-1451.

Hanawa K, Yasuda T (1992) New detection method for XBT depth error and relationship between the depth error and coefficients in the depth-time equation. *J Oceanogr*48(2): 221-230.

Heinmiller RH, Ebbesmeyer CC, Taft BA, Olson DB, Nikitin OP (1983) Systematic errors in expendable bathythermograph (XBT) profiles. *Deep-Sea Res Pt I:Oceanogr Res Papers*30(11): 1185-1196.

Hutchinson KA, Swart S, Ansorge IJ, Goni GJ (2013) Exposing XBT bias in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Deep-Sea Res Pt I:Oceanogr Res Papers* 80: 11-22.

Ishii M, Kimoto M (2009) Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J Oceanogr*65(3): 287-299.

Kizu S, Yoritaka H, Hanawa K (2005) A new fall-rate equation for T-5 expendable bathythermograph (XBT) by TSK. *J Oceanogr*61(1): 115-121.

Levitus S, Antonov JI, Boyer TP, Locarnini RA, Garcia HE, Mishonov AV (2009) Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophys Res Lett*, 36(7): L07608. doi:10.1029/2008GL037155.

Lockheed Martin Corporation (2005) Expendable Bathythermograph, Expendable Sound Velocimeter (XBT/XSV), Expendable Profiling Systems. NDCR, pp 4.

Lyman JM, Good SA, Gouretski VV, Ishii M, Johnson GC, Palmer MD, Willis JK (2010) Robust warming of the global upper ocean. *Nature*465(7296): 334-337.

Orsi AH, Whitworth T, Nowlin WD (1995) On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res Pt I: Oceanogr Res Papers*42(5): 641-673.

Pennington NJ, Weller RA (1981) Drifting vertical current meter, moored Aanderaa thermistor chain, and XBT data-Jason 1978 Atlantis-II Cruise. WHOI Tech Rep. 102.

Reseghetti F, Borghini M, Manzella GMR (2007) Factors affecting the quality of XBT data – results of analyses on profiles from the Western Mediterranean Sea. *Ocean Sci* 3(1): 59-75.

Reverdin G, Marin F, Bourles B, Lherminier P (2009) XBT temperature errors during French research cruises (1999-2007). *J Atmos Oceanic Technol*26(11): 2462-2473.

Ridgway KR, Dunn JR, Wilkin JL (2002) Ocean interpolation by four-dimensional weighted least squares-application to the waters around Australasia. *J Atmos Oceanic Technol*19(9): 1357-1375.

Seaver GA, Kuleshov S (1982) Experimental and analytical error of the expendable bathythermograph. *J Phys Oceanogr*12(6): 592-600.

Singer JJ (1990) On the error observed in electronically digitized T-7 XBT data. *J Atmos Oceanic Technol*7(4): 603-611.

Sun C, Watts DR (2002) Heat flux carried by the Antarctic Circumpolar Current mean flow. *J Geophys Res: Oceans*107(C9): 1-13.

Thadathil P, Saran AK, Gopalakrishna VV, Vethamony P, Araligidad N, Bailey R (2002) XBT fall rate in waters of extreme temperature: A case study in the Antarctic Ocean. *J Atmos Oceanic Technol* 19(3): 391-396. doi:10.1175/1520-0426-19.3.391.

Torquato RN (2016) Desempenho da equação de queda do XBT Deep Blue no Atlântico Sudoeste. Monografia, FURG, Rio Grande, pp 38.

Wijffels SE, Willis J, Domingues CM, Barker P, White NJ, Gronell A, Ridgway K, Church JA (2008) Changing expendable bathythermograph fall rates and their impact on estimates of thermosteric sea level rise. *J Clim* 21(21): 5657-5672. doi:10.1175/2008JCLI2290.1.

Wisotzki A, Fahrbach E (1991) XBT-Data Measured from 1984 to 1991 in the Atlantic Sector of the Southern Ocean by R.V. "Meteor" and R.V. "Polarstern". Alfred Wegner Institut Tech Rep 18: 1-86.

