



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
Instituto de Oceanografia
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física,
Química e Geológica

ARTHUR GERARD QUADROS DE SOUZA

ESTRUTURA E VARIABILIDADE DAS ÁGUAS MODAIS
NA TERMOCLINA DO OCEANO ATLÂNTICO SUL

Rio Grande
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
Instituto de Oceanografia
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física,
Química e Geológica

ESTRUTURA E VARIABILIDADE DAS ÁGUAS MODAIS
NA TERMOCLINA DO OCEANO ATLÂNTICO SUL

ARTHUR GERARD QUADROS DE SOUZA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG, como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Kerr Duarte Pereira

RIO GRANDE, RS, BRASIL
Setembro – 2015

de Souza, Arthur Gerard Quadros

Estrutura e Variabilidade das Águas Modais na Termoclina do oceano Atlântico Sul /
Arthur Gerard Quadros de Souza – Rio Grande: FURG, 2015.

81 páginas.

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande. Mestrado em Oceanografia Física, Química e Geológica. Área de Concentração: Oceanografia Física.

1. Estrutura das Águas Modais
2. Oceano Atlântico Sul
3. Variabilidade Interanual



ATA ESPECIAL DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – 12/2015

Às oito e trinta horas do dia 28 de Setembro do ano dois mil e quinze, no na Sala 4115 do pavilhão 4 - FURG/Carreiros, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de MESTRADO intitulada " **ESTRUTURA E VARIABILIDADE DAS ÁGUAS MODAIS NA TERMOCLINA DO OCEANO ATLÂNTICO SUL**", do **Acad. ARTHUR GERARD QUADROS DE SOUZA**. A Comissão Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Rodrigo Ker - Orientador/Presidente – (IO/FURG), Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo - (IO /FURG), Prof. Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho – UFSC-SC. Dando início à reunião, a intitulada Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Profa. Dra. Elisa Helena Fernandes, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que o Candidato teria um tempo 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 ao Candidato 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 ao Candidato. 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 o candidato **APROVADO**, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ATA que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pelo Candidato e pelo Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.



Prof. Dr. Rodrigo Kerr
Presidente



Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo



Prof. Dr. Antonio Fernando H. Fetter Filho



Acad. Arthur Gerard Q. de Souza



Profª. Dra. Elisa Helena Fernandes
Coordenadora do PPGOFQG

Aos meus pais, Franklin e Olga, e à minha irmã, Amanda. Com todo amor e carinho.

"Um passo à frente e você não está mais no mesmo lugar."

(Chico Science)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao professor Rodrigo Kerr por todo o auxílio, participação e paciência na confecção do meu trabalho. Em nome do mesmo, gostaria de agradecer ao corpo docente do Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima (LEOC), seus funcionários e alunos, bem como a todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, que direta ou indiretamente contribuíram para a ampliação dos meus horizontes no que diz respeito à Oceanografia.

À banca de avaliação (Prof. Dr. José Luiz L. de Azevedo e Prof. Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho) pela ajuda, comentários e sugestões para o melhoramento do meu trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e também à Universidade Federal do Rio Grande (FURG), pela infraestrutura no decorrer desses dois anos.

Aos amigos da sala onde permaneci durante esses dois anos: Guilherme (Catarina), Lorena, Paula, Gabi, Maria Isabel, Fábio Dias, Natalia, Lucas, Sergio, André e Lidiane, pela ajuda, convivência, risadas e colaboração durante essa jornada. Também não posso esquecer o “pessoal da outra sala”: Malu, Iole, Tiago, Ella, Wilton, Mariah e Camila. Alguns de vocês podem nem ter percebido, mas também contribuíram de alguma forma, para que eu chegasse até aqui. Ao Fujita pelas ajudas com a manutenção do meu computador, pois sem ele em perfeito estado eu não teria conseguido.

Aos meus amigos da FURG: Gabriel, Cátia, Daniel, Fiamma, Larissa, Laís, Rafael (Jarrão), Ricardo, Rafael (O Guia), William, , Flávia, Camila Sukekava, Kayla, Catherine, Eduardo (Lost) e Roberto (Alemão). Posso estar me esquecendo de pôr alguém nesta lista, mas no meu coração estão todos. Muito obrigado por tudo!

Aos meus amigos Átila e Paulo Victor (Carioca), pela moradia dividida, convivência amistosa e pela paciência que vocês tiveram comigo esse tempo todo.

À Isadora Sukekava, pela companhia, amizade e dedicação para me apoiar em praticamente todos os meus momentos até aqui, nunca esquecerei!

Por último, mas nunca menos importante, à minha família: Franklin (painho) Olga (mainha) e Amanda. Obrigado pelo amor, carinho e por todo o apoio, psicológico, moral e financeiro durante esses 25 anos. Mesmo estando a 4 mil km de distância, vocês sempre dão um jeito maravilhoso de tornar o meu dia mais feliz. Eu amo muito vocês.

Índice

AGRADECIMENTOS	12
LISTA DE ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS	16
LISTA DE FIGURAS	18
LISTA DE TABELAS	20
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
RESUMO	22
1. Introdução	24
1.1 Definição e processo de formação	24
1.2 Região de Estudo	26
1.3 <i>Águas Modais</i> presentes no oceano Atlântico Sul	30
1.4 Antecedentes	32
1.5 Objetivos	34
1.6 Motivação	35
2. Metodologia	37
2.1 Conjunto de dados	37
2.2 Método OMP	39
2.2.1 Definições das <i>Águas-Tipo-Fonte</i> e dos Pesos dos Parâmetros.....	43
2.3 Análise de Sensibilidade	44
3. Resultados e Discussão.....	47
Abstract.....	48

1. Introduction.....	49
2. Data and Methodology.....	54
3. Results.....	59
4. Summary and Conclusions	74
4. Conclusões.....	76
5. Referências Bibliográficas.....	78

LISTA DE ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

AABW – *Antarctic Bottom Water*

AAIW – *Antarctic Intermediate Water*

ACAS – *Água Central do Atlântico Sul*

AFA – *Água de Fundo Antártica*

AIA – *Água Intermediária de Fundo*

AMOC – *Atlantic Meridional Overturning Circulation*

APAN – *Água Profunda do Atlântico Norte*

BC¹ - *Benguela Current*

BC² - *Brazil Current*

CB¹ - *Corrente de Benguela*

CB² - *Corrente do Brasil*

CAS – *Corrente do Atlântico Sul*

CCES – *Contracorrente Equatorial Sul*

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

DO – *Dissolved Oxygen*

ENSO – *El Niño South Oscillation*

ESACW – *Eastern South Atlantic Central Water*

ICW – *Indian Central Water*

NACW – *North Atlantic Central Water*

NADW – *North Atlantic Deep Water*

NaN – *Not-a-Number*

NCEP – *National Centers of Environmental Prediction*

OD – Oxigênio Dissolvido

OMP – Análise Otimizada com Multiparâmetros (*Optimum Multiparameter Analysis*)

PV – *Potential Vorticity*

S – Salinidade (*Salinity*)

SACW – *South Atlantic Central Water*

SAF – Frente Subantártica (*Subantarctic Front*)

SAMW – Água Modal Subantártica (*Subantarctic Water*)

SIMW – *Subtropical Indian Mode Water*

SPMW – Água Modal Sub-polar

STEMW – Água Modal Subtropical de Leste

STMW – Água Modal Subtropical (*Subtropical Mode Water*)

SWT – Água-tipo-fonte (*Source Water Type*)

T – Temperatura (*Temperature*)

θ – Temperatura Potencial

TS – Temperatura-Salinidade (*Temperature-Salinity*)

VP – Vorticidade Potencial

XBT – Batitermógrafo Descartável (*Expendable Bathythermograph*)

WOA – *World Ocean Atlas*

WOD2013 – *World Ocean Database 2013*

WSACW – *Western South Atlantic Central Water*

WOCE – *World Ocean Circulation Experiment*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema da distribuição das *Águas Modais* ao redor dos oceanos do globo. Região vermelho-escuro: *Água Modal Subantártica* (SAMW) e *Água Modal Subpolar* (SPMW); vermelho: *Água Modal Subtropical* (STMW); rosa: *Água Modal Subtropical de Leste* (STEMW). Os números referem-se a densidade média da água modal em cada região do oceano global. Os ciclos fechados representam o giro subtropical de cada oceano. (Retirado de Hanawa & Talley, 2001).....25

Figura 1.2 – Esquema de subducção de uma camada de mistura de inverno na região de formação de uma *Água Modal*. Adaptado de Poole & Tomczak (1999)..... 26

Figura 1.3 – Região de estudo: Giro Subtropical do oceano Atlântico Sul representado através de suas correntes oceânicas. Retirado de Stramma & England (1999)..... 27

Figura 1.4 – Diagrama TS do Atlântico Sul a 30°S, com suas massas de água representadas. Adaptado de Stramma & Engand (1999)..... 29

Figura 1.5 – Diagrama TS da seção WOCE A10, onde se encontram destacadas as *Águas Modais* presentes no Atlântico Sul. Vermelho para *Água Modal Subtropical 1* (STMW 1), azul para *Água Modal Subtropical 2* (STMW 2), rosa para *Água Modal Subtropical 3* (STMW 3) e verde para *Água Modal Subantártica* (SAMW)..... 32

Figura 2.1 - a) Distribuição espacial e b) temporal dos perfiladores Argo utilizados... 38

Figura 2.2 - a) Distribuição espacial e b) temporal dos dados do World Ocean Database..... 38

Figura 2.3 - Distribuição espacial das seções WOCE A10..... 39

Figura 2.4 – Regiões de formação das *Águas Modais* do Atlântico Sul: Azul para STMW 1, vermelho para STMW 2, amarelo para STMW 3 e verde para SAMW..... 44

Figure 3.1. Study area. (a) Argo floats distribution (blue dots), WOCE A10 repeat section (red line), and mode waters source regions: STMW 1 (area 1), STMW 2 (area

2), STMW 3 (area 3) and SAMW (area 4). (b) WOD 2013 hydrographic data distribution (blue dots)..... 55

Figure 3.2 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 100 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW..... 61

Figure 3.3 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 200 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW..... 62

Figure 3.4 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 300 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW..... 63

Figure 3.5 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 500 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW..... 64

Figure 3.6 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 700 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 3, b) SAMW..... 66

Figure 3.7 – Mode waters mean vertical distribution at WOCE A10 section. Mean percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW..... 67

Figure 3.8 – Mode waters standard deviation at WOCE A10 section for a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW..... 68

Figure 3.9 – Mode water vertical distribution at WOCE A10 section. Percentage of mixture of STMW 1 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and STMW 2 at d) 1993, e) 2003 and f) 2011..... 69

Figure 3.10 – Mode water vertical distribution at WOCE A10 section. Percentage of mixture of STMW 3 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and SAMW at d) 1993, e) 2003 and f) 2011..... 69

Figure 3.11 – Contribution anomalies at WOCE A10 section for STMW 1 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and STMW 2 at d) 1993, e) 2003 and f) 2011..... 72

Figure 3.12 – Contribution anomalies at WOCE A10 section for STMW 3 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and SAMW at d) 1993, e) 2003 and f) 2011..... 73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades hidrográficas das massas de água do oceano Atlântico Sul.... 30

Tabela 2 – Propriedades hidrográficas das Águas Modais do oceano Atlântico Sul..... 32

Tabela 3 – Águas-tipo-fonte, pesos e desvios-padrão das Águas Modais calculados para serem utilizados no OMP..... 45

Tabela 4 – Tendências de variabilidade dos índices dos parâmetros hidrográficos das Águas Modais do Atlântico Sul..... 46

Table S1 - Source Water Types and parameter weights used to represent mode water varieties found in the South Atlantic Ocean. The standard deviations and trends of each property from 1990 to 2014 (yr^{-1} ; in brackets) used to perform OMP sensitivity analysis is also presented (see section 2.4)..... 58

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para obter o título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica é requerido que o discente realize a defesa da sua dissertação mediante uma banca avaliadora e a submissão de pelo menos um artigo científico como primeiro autor em periódico indexado com corpo editorial. Desse modo, os resultados da pesquisa desenvolvida durante o período de mestrado e a discussão dos mesmos são apresentados em forma de artigo no corpo desta dissertação.

Este documento é composto por quatro seções. Na primeira seção será apresentada uma breve introdução sobre a região de estudo, sua importância e os avanços realizados para compreender a contribuição percentual e variabilidade temporal das *Águas Modais* do oceano Atlântico Sul. Também serão apresentadas as motivações e os objetivos a serem alcançados no presente trabalho. Na segunda seção, será descrita a metodologia empregada durante o desenvolvimento do trabalho, como dados utilizados, critérios para a separação das *Águas Modais*. Na seção três, está contido o manuscrito adaptado que será submetido para o corpo revisor do periódico *Deep-Sea Research I*. Por fim, um sumário do trabalho e as considerações finais são apresentadas na quarta seção.

RESUMO

Os oceanos atuam como importantes agentes reguladores do clima global, devido a sua interação com a atmosfera e os processos envolvidos, que explicam as variações e fenômenos que acontecem em toda sua extensão. A compreensão das suas características e propriedades é alvo de estudo das mais diversas áreas das ciências exatas, como por exemplo, a compreensão do papel dos oceanos na variabilidade e mudanças climáticas, onde é necessária a compreensão dos detalhes da circulação oceânica. É sabido que os oceanos carregam tanto calor em direção aos polos quanto a atmosfera, mas em escalas de tempo muito diferentes, maiores para os oceanos. Estes possuem mais capacidade para agirem como mecanismos de amortecimento para rápidas flutuações que ocorrem no clima. Portanto, muito do que diz respeito à variação do clima está relacionado com os oceanos, pois estes liberam calor para a atmosfera devido à interação com a mesma. O oceano Atlântico Sul é parte fundamental do *Cinturão de Revolvimento Meridional*, atuando como agente regulador do clima global guardando características fundamentais que nos dão informações a respeito da configuração climática global.

As variações das propriedades hidrográficas do oceano Atlântico Sul são estudadas e reportadas por cientistas ao redor do mundo, através de dados coletados *in situ* e por meio de sensoriamento remoto, que se encontram compilados em bancos de dados de instituições de pesquisa. O presente trabalho faz uso de dados hidrográficos históricos oriundos de diferentes bancos de dados e tem como objetivo a observação das características espaciais e variabilidade temporal das *Águas Modais* presentes na termoclina do oceano Atlântico Sul, separadas e classificadas em termos de suas propriedades hidrográficas como temperatura potencial, salinidade e densidade potencial.

Para este trabalho foi utilizado o método OMP, que fez a quantificação da fração de mistura das *Águas Modais Subtropicais* e *Subantártica*, STMW e SAMW, respectivamente. A distribuição das variedades da STMW e SAMW está em concordância com investigações anteriores a respeito de águas da termoclina reportadas na região. Em relação a variabilidade temporal, entre os anos 1993 e 2011, as variedades de Água Modal Subtropical 2 (STMW 2) e Água Modal Subtropical 3 (STMW 3) mostram um aumento de sua contribuição na termoclina do oceano Atlântico Sul, enquanto que a contribuição relativa das variedades de Água Modal Subtropical 1 (STMW 1) e Água Modal Subantártica (SAMW) apresentam uma diminuição.

Palavras-chave: *Águas Modais*, termoclina do Atlântico Sul, método OMP, variabilidade temporal das águas da termoclina.

1. Introdução

Neste capítulo são apresentadas algumas características gerais das Águas Modais que serão estudadas, como suas propriedades hidrográficas, suas áreas de formação e também informações sobre a região de estudo, bem como os antecedentes usados para a elaboração deste trabalho e os objetivos a serem alcançados.

1.1 Definição e processo de formação

O termo *Água Modal* normalmente é usado para definir camadas de água quase verticalmente homogêneas encontradas ao longo de uma área relativamente grande, que ocorrem normalmente dentro ou próximas do topo da termoclina permanente (Hanawa & Talley, 2001). Em um diagrama temperatura-salinidade (TS), por exemplo, a homogeneidade apresentada pelas *Águas Modais* quando comparada com as águas altamente estratificadas que as circundam, produz um registro máximo. O termo *Água Modal* foi utilizado primeiramente por Masuzawa (1969), quando ele chamou uma camada espessa de 16-18°C de temperatura, localizada no noroeste do giro subtropical do Pacífico Norte, de *Água Modal Subtropical (Subtropical Mode Water)*. As *Águas Modais* foram identificadas em todas as bacias oceânicas do globo, sempre no lado quente de uma frente ou corrente. Essas águas estão sempre distribuídas abaixo da superfície, longe de suas regiões de formação (Hanawa & Talley, 2001). Tais regiões localizam-se junto das frentes permanentes, no lado de baixa densidade das mesmas, onde a inclinação das isopicnais pré-condiciona a região para a formação de uma camada mais espessa do que ocorre no lado de alta densidade desta mesma frente (Figura 1.1).

O processo de formação das *Águas Modais* está normalmente associado com a mistura convectiva de inverno que ocorre devido à perda de flutuabilidade da água na camada superficial do oceano. As correntes que levam águas quentes dos trópicos em

direção aos polos sofrem resfriamento intenso, principalmente durante os invernos, quando o oceano perde muito mais calor para a atmosfera. As condições rigorosas de inverno fazem com que as águas que estão na superfície percam flutuabilidade através do seu resfriamento, ocorrendo a convecção superficial.

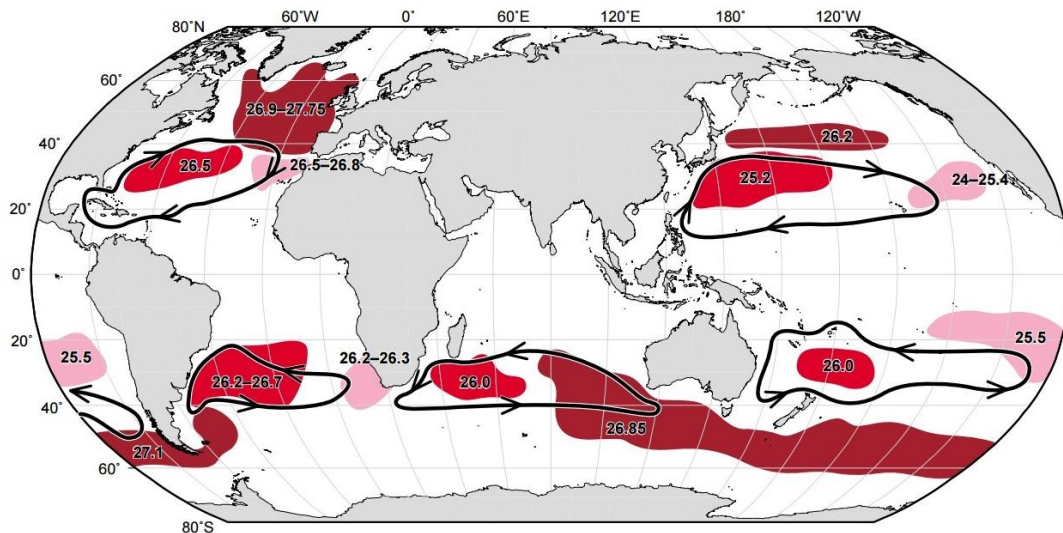


Figura 1.1: Esquema da distribuição das Águas Modais nos oceanos do globo. Região vermelho-escuro: Água Modal Subantártica (SAMW) e Água Modal Subpolar (SPMW); vermelho: Água Modal Subtropical (STMW); rosa: Água Modal Subtropical de Leste (STEMW). Os números referem-se a densidade média da água modal em cada região do oceano global. Os ciclos fechados representam o giro subtropical de cada oceano. Retirado de Hanawa & Talley (2001).

Esta convecção produz uma camada de mistura muito profunda. Na primavera uma termoclina rasa se desenvolve e isola a água da parte profunda da camada de mistura de inverno. A água isolada da superfície é subductada e carregada para longe de sua região de formação através da circulação geral (Figura 1.2). Este processo renova a termoclina principal com águas que tiveram um contato recente com a atmosfera e, assim, possuem elevadas concentrações de oxigênio (Provost et al., 1999).

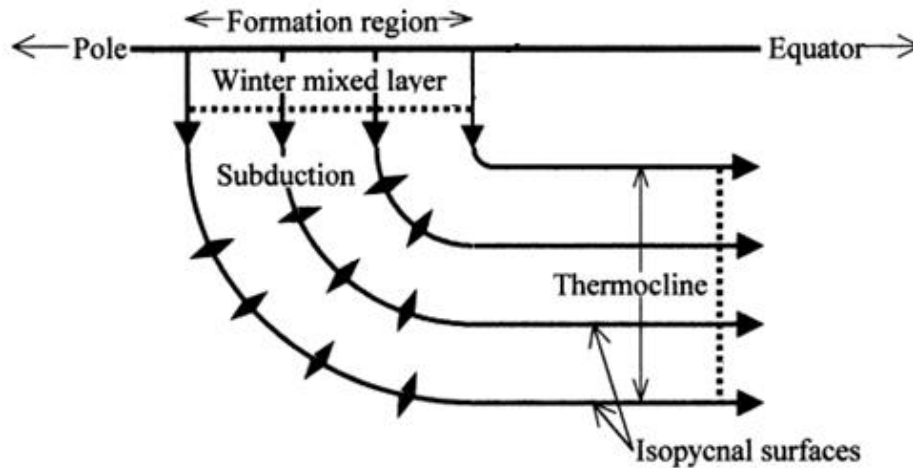


Figura 1.2 – Esquema de subducção de uma camada de mistura de inverno na região de formação de uma Água Modal. Retirado de Poole & Tomczak (1999).

1.2 Região de Estudo

A área de estudo deste trabalho engloba o oceano Atlântico Sul, situado entre as coordenadas 0° - 60° S de latitude e 70° W- 20° E de longitude. O Atlântico Sul possui uma profundidade média de 3926 m e atinge sua maior profundidade na fossa Sandwich do Sul, com 7235 m. Devido à distribuição das *Águas Modais* aqui estudadas, este estudo se limita até 1000 m de profundidade. O oceano Atlântico Sul pode ser delimitado também em termos de suas correntes oceânicas superficiais, que são: a norte, a Contracorrente Equatorial Sul (CCES); ao sul, a Corrente do Atlântico Sul (CAS), próximo a 40° S situado na frente subtropical; a leste, pela Corrente de Benguela (CB¹), na costa oeste da África; e a oeste, pela Corrente do Brasil (CB²), na costa leste do Brasil (Peterson & Stramma, 1991). Estas correntes oceânicas de larga escala, que transportam ativamente e distribuem grande parte das massas de água, formam um giro anticiclônico denominado de giro subtropical do Atlântico Sul (Figura 1.3).

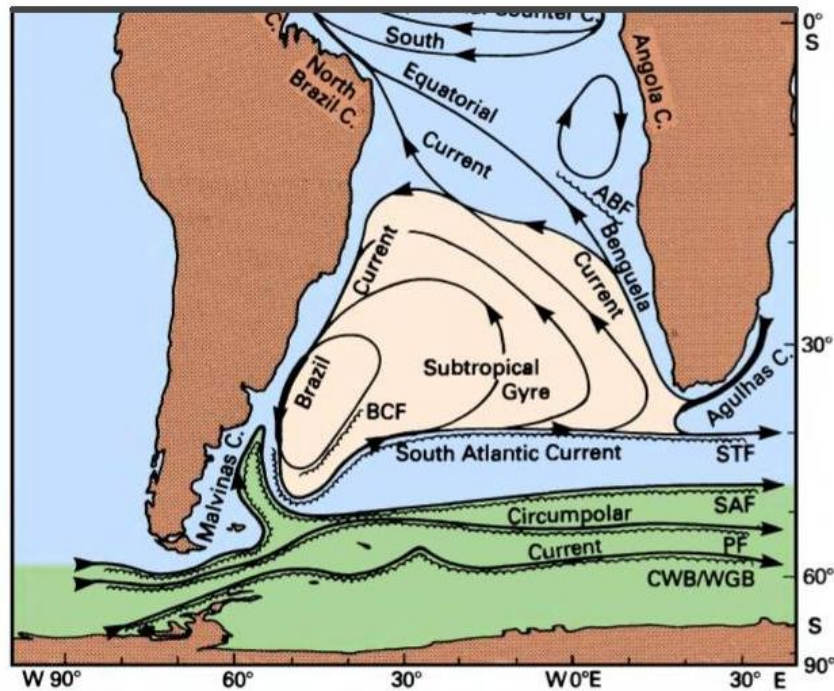


Figura 1.3 – Região de estudo: Giro Subtropical do oceano Atlântico Sul representado através de suas correntes oceânicas. Retirado de Stramma & England (1999).

A estrutura de massas de água encontradas no oceano Atlântico Sul está representada da superfície ao fundo, embora neste trabalho sejam consideradas apenas as camadas central e intermediária, conforme o diagrama TS (Figura 1.4) e suas propriedades hidrográficas sumarizadas na Tabela 1. A descrição de cada massa de água é apresentada a seguir:

- Água Tropical (AT): Esta massa de água é formada devido à alta taxa de evaporação em relação à taxa de precipitação característica do oceano Atlântico Tropical. É uma água quente e salina que ocupa a superfície do oceano Atlântico Sul. Esta é transportada para sul pela Corrente do Brasil e nessa trajetória mistura-se com águas de origem costeira mais frias e de salinidades mais baixas. A AT é caracterizada por temperaturas maiores que 20°C e salinidade superior a 36 (Emílson, 1961), sendo representada pelos pontos extremos no diagrama TS. Sua densidade apresenta valores menores que 25,8 kg m⁻³. A AT pode ser

descrita como uma água de máxima salinidade, pois tem seu núcleo associado ao máximo de salinidade na coluna de água que ocorre, geralmente, em subsuperfície (Mémery et al., 2000).

- Água Central do Atlântico Sul (ACAS): É uma massa de água de propriedades bem uniformes ao longo de sua extensão. Sua curva TS é bem descrita por uma linha estreita entre os pontos 5°C/34,3 e 20°C/36,0, com uma densidade entre 25,8-26,8 kg m⁻³. A curva TS da ACAS é semelhante a curva TS da Água Central do Índico e da Água Central do Oeste do Pacífico Sul, refletindo a história de formação comum entre todas as águas centrais do Hemisfério Sul, que são subductadas na Convergência Subtropical. Sverdrup *et al.* (1942) reportaram que a ACAS é formada por afundamento das águas na região da Convergência Subtropical, e subsequente espalhamento ao longo da superfície de densidade adequada a seu ajustamento hidrostático. Alguma parcela desta água central é formada também no oeste do Atlântico Sul, zona de confluência das Correntes do Brasil e das Malvinas, gerando uma variedade com altos valores de salinidade da ACAS, que é recirculada dentro do Giro Subtropical Sul e, portanto restrita ao oeste do sul do Pacífico Sul (Gordon, 1981). A ACAS entra como parte do Giro Subtropical, circula com as Correntes do Atlântico Sul e Benguela, e atinge a costa da América do Sul transportada pela Corrente Sul Equatorial.
- Água Intermediária Antártica (AIA): Abaixo da ACAS encontra-se a AIA, caracterizada por apresentar valores mínimos de salinidade. Esta massa de água é formada principalmente no leste do Pacífico Sul e adentra o oceano Atlântico através da Passagem de Drake. Quando se espalha pelo Atlântico Sul, é transportada pela Corrente das Malvinas, atingindo também o Hemisfério Norte.

A formação da AIA no oceano Atlântico ocorre através da conversão de massas de água no oceano Austral com contato atmosférico direto limitado. A maior parte da AIA que adentra o oceano Atlântico vem da mesma região de formação da *Água Modal Subantártica* (SAMW), no leste do oceano Pacífico, sendo esta água uma de suas principais contribuintes. (McCartney, 1977). Sverdrup *et al.* (1942) se referem a AIA possuindo valores de temperatura entre 3°C-6°C, de salinidade entre 34,3-34,6 e densidade entre 27,1-27,2 kg m⁻³.

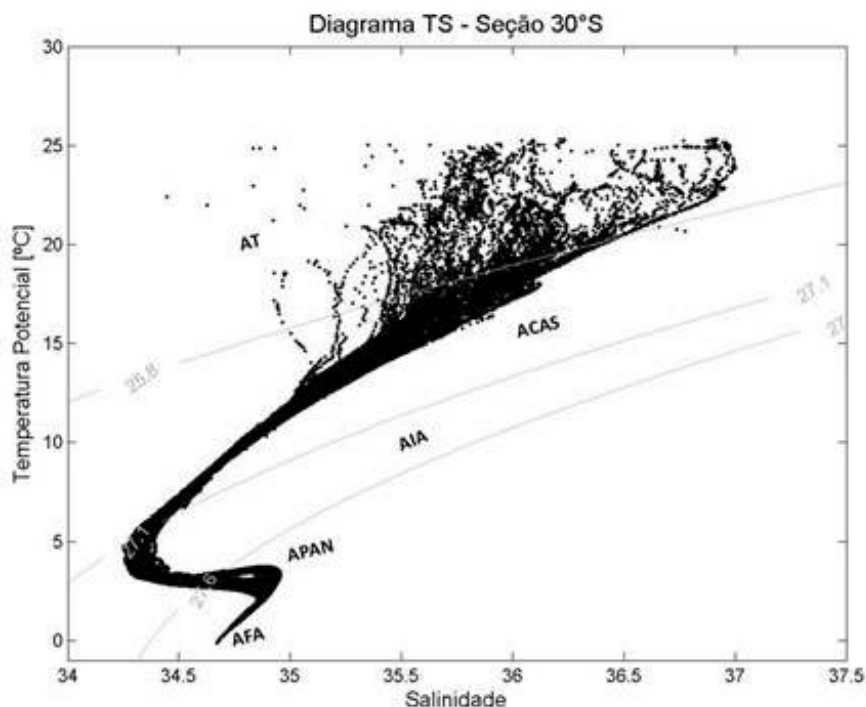


Figura 1.4 – Diagrama TS do Atlântico Sul a 30°S, com suas massas de água representadas. Adaptado de Stramma & Engand (1999).

- **Água Profunda do Atlântico Norte (APAN):** Mesmo encontrada no Hemisfério Sul, a APAN é originária do Hemisfério Norte. Apresenta altos níveis de oxigênio e de salinidade quando comparada com as águas superiores e inferiores (Stramma & England, 1999). Seus valores de temperatura e salinidade estão entre 1,5-4°C e 34,8-35,0. Sua densidade potencial está entre 27,8 e 28,0 kg m⁻³.

- Água de Fundo Antártica (AFA): É a massa de água de maior densidade dos oceanos globais ocupando as principais bacias oceânicas profundas (Orsi et al., 1999). Muitas variedades de AFA são produzidas e exportadas ao redor das margens continentais da Antártica, sendo formadas devido a vários processos de interação entre oceano, atmosfera e plataformas de gelo (Orsi et al., 1999). Sua temperatura na região de formação está entre -1,8 e -0,5 e sua salinidade entre 34,88 e 34,94. Sua densidade é maior que 28,0 kg m⁻³.

Tabela 1 - Propriedades hidrográficas das massas de água do oceano Atlântico Sul.

	θ (°C)	S	σ_t (kg m ⁻³)
AT	> 20	> 36,0	< 25,8
ACAS	5-20	34,3-36,0	25,8-26,8
AIA	3-6	34,3-34,6	27,1-27,2
APAN	1,5-4	34,8-35,0	27,8-28,0
AFA	-1,8-(-0,5)	34,88-34,94	> 28,0

1.3 Águas Modais presentes no oceano Atlântico Sul

Para o Atlântico Sul, foram listados dois tipos de *Águas Modais*. McCartney (1977), Roden (1986), Tsuchiya et al. (1994), Talley (1996) e Provost et al. (1999) identificaram e classificaram as *Águas Modais* com base em suas densidades: o tipo menos denso, chamado de *Água Modal Subtropical (Subtropical Mode Water)*, que possui densidades menores que 27,0 kg m⁻³ e o tipo mais denso, chamado de *Água Modal Subantártica (Subantartic Mode Water)*, que possui densidades maiores que 27,0 kg m⁻³. Provost et al. (1999) fizeram uma subdivisão para as *Águas Modais* Subtropicais, baseada em suas propriedades hidrográficas. Essa classificação segue a ordem ascendente da densidade, assim o tipo mais leve de *Água Modal Subtropical* é denominada como a variedade 1 (STMW 1), que é formada abaixo de 30°S na porção

médio-leste do Atlântico Sul. Suas propriedades T e S variam entre 16-18°C e 35,9-36,2, respectivamente e sua densidade potencial está entre 26,0 e 26,2 kg m⁻³. Na parte oeste do giro, entre 30-40°S e 30-50°W, é formado o segundo tipo de *Água Modal Subtropical*, a STMW 2. Sua densidade está entre 26,3 e 26,5 kg m⁻³ e seus intervalos de valores de T e S são, respectivamente, 14-16°C e 35,5-35,9. Grande parte do conteúdo desta água fica aprisionado na região de recirculação e somente uma parte consegue escapar e seguir a componente sul do giro subtropical. O tipo mais denso, STMW 3, é formado por volta de 35-40°S e 30°S-10°E, com densidade variando entre 26,4 e 26,6 kg m⁻³ e valores de T e S que vão de 12-14°C e 35,2-35,5, respectivamente.

Para a *Água Modal Subantártica*, a convecção de inverno da Frente Subantártica (SAF) da Corrente Circumpolar Antártica (ACC) forma uma camada de mistura profunda conhecida como *Água Modal Subantártica* (McCartney, 1977). O tipo de SAMW formado a oeste da Passagem de Drake no extremo sudeste do Pacífico Sul é o mais frio e menos salino, que possui propriedades 4-6°C e 34,1-34,2 de T e S, com densidade de 27,0-27,1 kg m⁻³. Este é o tipo de SAMW que contribui mais diretamente para a formação da *Água Intermediária Antártica* (AIA) no Atlântico Sul (McCartney, 1977; Holte et al., 2012). A densidade da SAMW, bem como suas propriedades, varia gradualmente de oceano para oceano, sendo as variações mais discrepantes encontradas em regiões de transição, como ao sul da África e da América do Sul, e nos arredores da Nova Zelândia (Piola & Georgi, 1982). As quatro *Águas Modais* estudadas neste trabalho encontram-se representadas no Diagrama TS da seção latitudinal WOCE A10, a 30°S entre o Brasil e a África do Sul, no ano de 2011 (Figura 1.5) e suas propriedades hidrográficas descritas na Tabela 2.

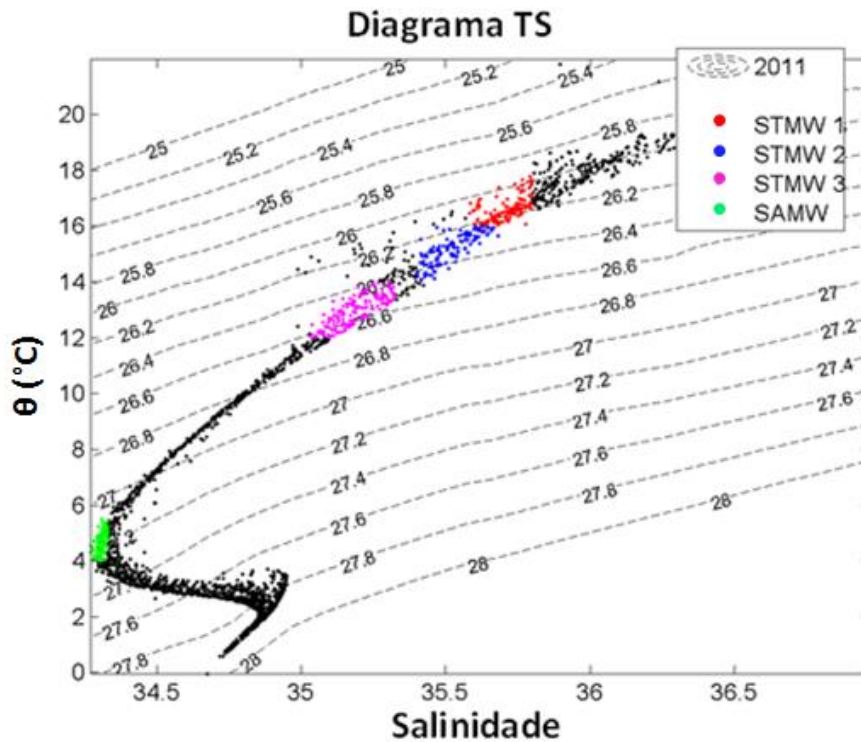


Figura 1.5 – Diagrama TS da seção WOCE A10, onde se encontram destacadas as Águas Modais presentes no Atlântico Sul. Vermelho para *Água Modal Subtropical 1* (STMW 1), azul para *Água Modal Subtropical 2* (STMW 2), rosa para *Água Modal Subtropical 3* (STMW 3) e verde para a *Água Modal Subantártica* (SAMW).

Tabela 2 – Propriedades hidrográficas das Águas Modais do oceano Atlântico Sul.

	θ (°C)	S	σ_t (kg m ⁻³)
STMW 1	16-18	35,9-36,2	26,0-26,2
STMW 2	14-16	35,5-35,9	24,3-24,5
STMW 3	12-14	35,2-35,5	26,4-26,6
SAMW	4-6	34,1-34,2	27,0-27,1

1.4 Antecedentes

Provost et al. (1999) realizaram um estudo detalhado utilizando dados hidrográficos obtidos com batitermógrafos descartáveis (XBTs) do programa *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) e identificaram três Águas Modais

Subtropicais, bem como suas regiões de formação e espessura média. Estes autores também observaram que dentro da principal janela de ventilação, as STMWs exibem significativa variabilidade em suas características e também no seu volume. Sato & Polito (2014) investigaram as regiões de formação dessas mesmas águas, sua distribuição e variabilidade através da utilização de perfiladores Argo e também observaram formação de Água Modal em regiões de resfriamento cumulativo do oceano. A variabilidade das STMWs do Atlântico Sul foi primeiro analisada por Venegas et al. (1996, 1997, 1998), que analisaram a temperatura da superfície do mar (SST) e a pressão do nível do mar no Atlântico Sul e observaram escalas de tempo interdecadais e interanuais, de aproximadamente 20, 6-7 e 4 anos. Ainda de acordo com Venegas et al. (1998), os ciclos de 20 anos começaram logo após 1910, 1930, 1950 e 1970. Durante cada ciclo o Giro Subtropical apresentou anomalia de SST positiva da metade do segundo até o décimo ano e anomalia de SST negativa da metade do décimo segundo até o vigésimo ano. Karstensen & Quadfasel (2002) usaram dados de reanálise da *National Centers of the Environmental Prediction* (NCEP), encontraram divergência do fluxo de densidade superficial e sugeriram um aumento na formação das águas da termoclina em torno de 50%, entre os anos 1980 e 2000.

McCartney (1977), observando camadas bem misturadas que apareciam no final do inverno, no lado norte da Frente Subantártica, foi o primeiro a sugerir o nome Água Modal Subantártica (SAMW). Ele também reportou que a SAMW formada no sudeste do oceano Pacífico era a maior contribuinte da Água Intermediária (AAIW) presente no oceano Atlântico Sul. Muitos autores (McCartney, 1977, 1982; Talley, 1996; Hanawa & Talley, 2001) sugeriram que a SAMW se resfria, fica menos salina e mais densa no sentido de oeste para leste ao longo de sua trajetória circumpolar, com vários desvios em direção norte ao entrar nos giros subtropicais. Sloyan et al. (2010) utilizou dados de

levantamentos hidrográficos do inverno austral de 2005 (final de Agosto – começo de Outubro) e do verão austral de 2006 (de Fevereiro – meados de Março) para investigar a SAMW formada no sudeste do Pacífico e reportou que sua mistura turbulenta controlada por perda de fluabilidade e forçante dos ventos é essencial para a formação das profundas camadas de mistura de SAMW. A variabilidade da SAMW foi estimada por Naveira Garabato et al. (2009), que utilizou séries temporais de parâmetros físicos e biogeoquímicos da SAMW na Passagem de Drake entre 1969 e 2005, onde eles observaram que a SAMW sofreu aquecimento e aumento na salinidade durante os anos 1970 e após isso ocorreu resfriamento e diminuição na salinidade entre os anos 1990 e 2005. Poole & Tomczak (1999) aplicaram o método OMP no conjunto de dados espaçados entre 1900 e 1993 do World Ocean Atlas (WOA) e dividiram as águas da termoclina do Atlântico Sul em três massas de água: Água Central do Oeste do Atlântico Sul (WSACW), a água menos densa, originada na Confluência Brasil-Malvinas; Água Central do Leste do Atlântico Sul (ESACW), formada no oceano Índico e inserida no Atlântico Sul pelo vazamento das Agulhas; e a Água Central do Atlântico Norte (NACW), uma água com alta variabilidade ambiental formada no Hemisfério Norte e que permanece no fundo da termoclina.

1.5 Objetivos

Objetivo geral:

Este estudo tem por objetivo geral quantificar o percentual de mistura das *Águas Modais* nas camadas central e intermediária do oceano Atlântico Sul.

Objetivos específicos:

Os objetivos específicos da dissertação são:

- determinar a distribuição espacial das *Águas Modais* presentes na região de estudo;
- investigar a variabilidade temporal do percentual de mistura das *Águas Modais* em 30°S e;
- inferir aspectos da circulação oceânica a partir da distribuição encontrada das *Águas Modais*.

1.6 Motivação

A investigação e análise a respeito das *Águas Modais* nos oceanos globais têm aumentado significativamente nas últimas décadas, principalmente devido ao fato de que essas águas refletem variações temporais do clima. Também, variações nas propriedades, distribuição e circulação das *Águas Modais* podem nos fornecer informações a respeito das mudanças climáticas, taxas de resfriamento da superfície do mar durante o inverno nas regiões de formação, transporte de calor para a área de formação e atividade turbulenta na região de formação (Hanawa & Talley, 2001).

Entretanto, o oceano Atlântico Sul é pouco amostrado em comparação com outros oceanos. Também existem poucos estudos sobre a distribuição das *Águas Modais* presentes nele. Sendo assim, este trabalho representa um passo inicial no sentido da quantificação do percentual de mistura das *Águas Modais* que ocorrem nesta região.

O método de separação de massas de água, o método OMP (ver Seção 2.2), é comprovado por diversos autores que já o aplicaram em diversos tipos de bancos de dados observacionais ao redor do globo. Recentemente, dados de T e S oriundos dos perfiladores Argo foram utilizados para a observação de *Águas Modais* no Atlântico Sul (Sato & Polito, 2014). Além disso, espera-se que os resultados deste trabalho possam

ser utilizados em conjunto com a literatura já existente sobre o tema, no sentido de complementar e servir de base para novos estudos.

2. Metodologia

2.1 Conjunto de dados

Este trabalho utiliza dados de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido oriundos de dois conjuntos de dados diferentes: World Ocean Database 2013 (WOD2013) e perfiladores Argo. Os dados das seções do WOCE A10 estão contidos no WOD2013. Valores de vorticidade potencial, que não estavam contidos nos conjuntos de dados, foram calculados a partir de:

$$VP = -\frac{f}{\rho_0} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial z} \quad (1)$$

onde f é vorticidade planetária, ρ_0 é densidade média da água da água mar, $\partial \sigma_\theta$ é a derivada parcial da densidade potencial e ∂z é a derivada da profundidade.

Os dados dos perfiladores Argo totalizam 3191 estações (Figura 2.1a) com medições de T, S e OD distribuídos entre os anos 2004-2014 (Figura 2.1b). Esses dados foram obtidos no domínio <http://www.argodatamgt.org/Access-to-data/Argo-data-selection>. É realizado um controle de qualidade para os mesmos, a partir do critério de seleção “*only good data*” no momento do download. Os dados dos perfiladores Argo possuem uma cobertura espacial razoável na região equatorial e aceitável na região subtropical do Atlântico Sul, quando considerados apenas perfiladores com sensor de oxigênio dissolvido acoplado.

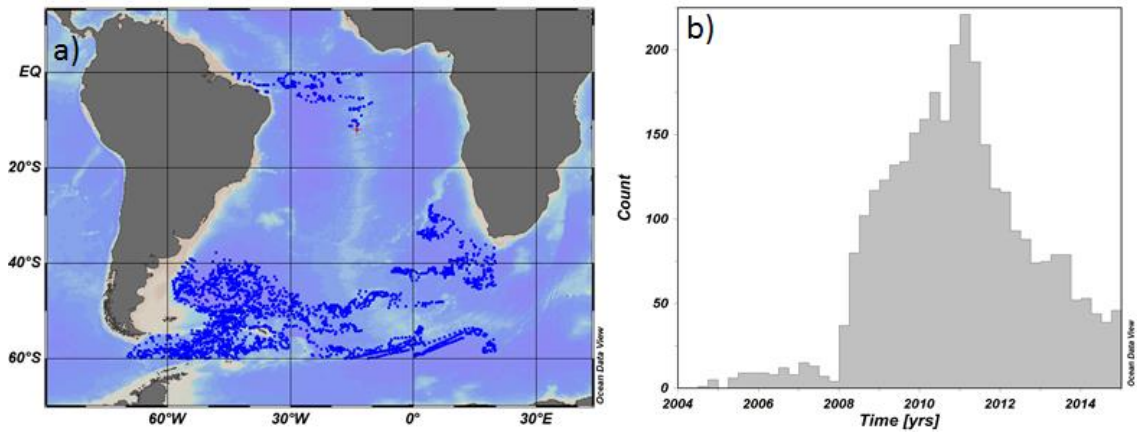


Figura 2.1 - a) Distribuição espacial e b) temporal dos perfiladores Argo utilizados.

Os dados do World Ocean Database, coletados através de garrafas e CTD totalizaram 16764 estações (Figura 2.2a), possuem uma cobertura melhor distribuída no tempo e no espaço, cobrindo o Atlântico Sul quase que por completo, entre os anos de 1906 e 2013 (Figura 2.2b). Este conjunto de dados foi obtido no domínio <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/dbsearch/dbsearch.html>. Os dados espúrios foram substituídos por valores NaN (*Not-a-Number*), para garantir que somente os dados de boa qualidade fossem usados em combinação com os dados oriundos dos perfiladores Argo nesta análise.

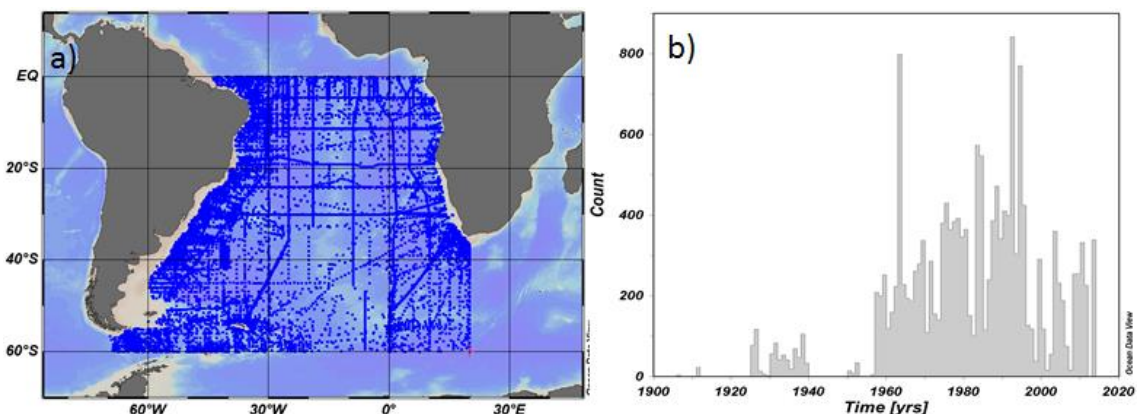


Figura 2.2 - a) Distribuição espacial e b) temporal dos dados do World Ocean Database.

Os dados das seções de repetição WOCE A10 (Figura 2.3) foram obtidos no site <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/dbsearch/dbsearch.html> e foram coletados em três anos diferentes: com 112 estações de 27 de Dezembro de 1992 até 31 de Janeiro de 1993, pelo Navio Meteor; 111 estações de 6 de Novembro até 5 de Dezembro de 2003, pelo Navio Mirai; e 120 estações de 26 de Setembro até 31 de Outubro de 2011, pelo Navio Ronald H. Brown. Estes levantamentos foram realizados na latitude 30°S, sendo que os dois primeiros foram feitos no sentido Brasil-África e o último, no sentido contrário.

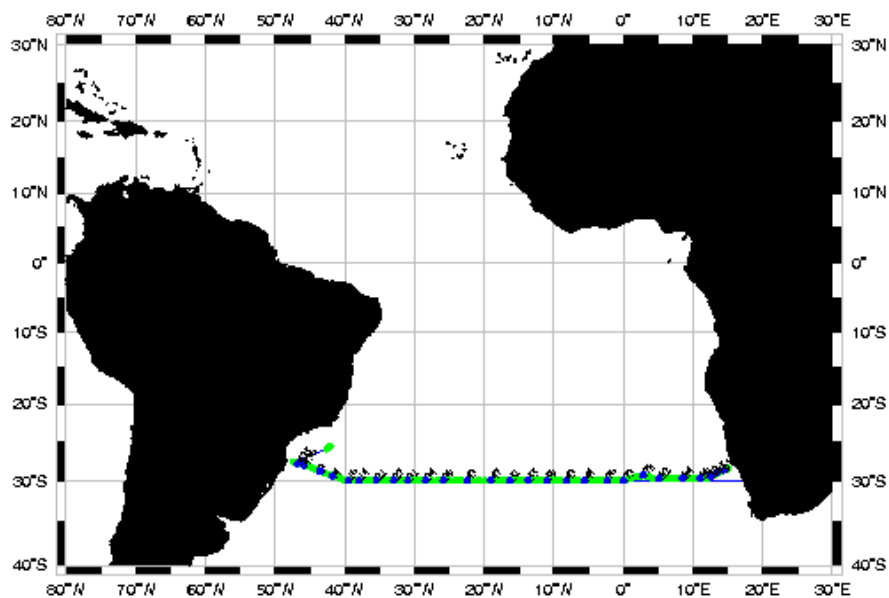


Figura 2.3 - Distribuição espacial das seções WOCE A10.

2.2 Método OMP

A Análise Otimizada com Parâmetros Múltiplos (*Optimum Multiparameter Analysis*) é uma extensão da análise clássica dos triângulos de mistura das massas de água no diagrama TS. Este método se baseia na utilização de parâmetros conservativos e semi-conservativos como traçadores de massas de água. Propriedades conservativas são aquelas que são modificadas apenas por processos de mistura com outras parcelas

de água (e.g., temperatura, salinidade) e propriedades semi-conservativas são modificadas também por processos biogeoquímicos (Tomczak & Large, 1989).

Para entender a análise OMP, primeiro precisamos compreender as definições de massa de água, *água-fonte*, *água-tipo* (*Water Type*) e *água-tipo-fonte* (*Source Water Type*): Massa de água é um corpo de água com uma história de formação comum no oceano (Tomczak & Large, 1989) e que, segundo Tomczak (1999), sofre influência das condições meteorológicas locais atuantes em um determinado intervalo de tempo, sendo originada em regiões particulares do oceano. *Água-fonte* é uma água precursora de outra massa de água. *Água-tipo* corresponde aos valores das propriedades hidrográficas de uma massa de água, enquanto *água-tipo-fonte* (SWT) pode ser definida pelos valores das propriedades hidrográficas de uma massa de água em sua região de formação (Tomczak & Godfrey, 1994).

A partir destes conceitos, podemos ter uma *água-tipo* que representa uma massa de água em determinada região, mas que não seja uma *água-tipo-fonte*, devido a processos de mistura com outras águas à medida que esta se desloca desde a sua área de formação. Matematicamente, as massas de água são representadas pela relação funcional entre as propriedades hidrográficas (*i.e.*, combinação das *águas-tipo-fonte*) e por seus respectivos desvios-padrão (Tomczak, 1999; Poole & Tomczak, 1999).

A solução do OMP ocorre a partir de um sistema linear de equações de mistura, onde as contribuições das *águas-tipo-fonte* são as variáveis e as propriedades hidrográficas são os parâmetros desse sistema. Sendo assim, o OMP determina as contribuições das *águas-tipo-fonte* pré-definidas em uma parcela de água de uma determinada região a partir de dados observacionais de parâmetros hidrográficos. O principal objetivo da análise é expressar as parcelas de água analisadas como combinações lineares das SWTs, cujas propriedades físico-químicas são completamente

conhecidas (Poole & Tomczak, 1999). Embora uma massa de água possa ser representada com uma combinação de um número finito de SWT, algumas regiões oceânicas, em que uma única massa de água é encontrada, distintamente apresenta relações lineares entre T e S, de tal maneira que duas SWTs possam ser consideradas para representar esta massa de água. Em alguns casos, quando uma massa de água é o resultado de um processo de formação muito localizado, esta massa de água pode ser representada por uma única SWT na vizinhança de sua região de formação (Tomczak, 1999; Budillon et al., 2003). O OMP ainda apresenta duas restrições físicas na sua solução: (i) a soma da contribuição de todas as *águas-tipo-fonte* não deve ser superior a 100%, de forma a manter a conservação da massa e; (ii) a contribuição das *águas-tipo-fonte* não pode ser negativa, visto que este resultado não possui significado físico.

Neste trabalho, assumimos uma situação de mistura que envolve quatro *águas-tipo-fonte* (cada uma representando uma variedade distinta de Água Modal) e um conjunto de dados observacionais referentes a quatro parâmetros: temperatura potencial (θ), salinidade (S), oxigênio dissolvido (OD) e vorticidade potencial (VP). Para a análise OMP, uma situação de mistura pode ser descrita como a mistura entre um número finito de SWTs e escrito como um sistema linear de equações:

$$Gx - d = R \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ OD_1 & OD_2 & OD_3 & OD_4 \\ VP_1 & VP_2 & VP_3 & VP_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_{obs} \\ S_{obs} \\ OD_{obs} \\ VP_{obs} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_\theta \\ R_S \\ R_{OD} \\ R_{VP} \\ R_{massa} \end{bmatrix}$$

onde G é a matriz que contém os valores dos parâmetros que definem as *águas-tipo-fonte*, d é um vetor contendo os dados observados, x é um vetor contendo as contribuições relativas ou taxas de mistura das *águas-tipo-fonte* em relação a parcela de

água e R é um vetor de resíduos. O método mais comumente utilizado para a resolução deste sistema linear é o da minimização através do Método dos Mínimos Quadrados (Tomczak & Large, 1989).

Uma vez que os parâmetros são identificados com seus valores médios e desvios-padrão, que dependem de variabilidade ambiental e da acurácia das medições, podem haver alguns erros associados a esses fatores. Com intuito de minimizar esses erros associados, a matriz G deve ser ponderada por uma matriz diagonal W , que é obtida por:

$$W_i = \frac{\sigma_i^2}{\delta_{i\max}} \quad (3)$$

onde σ_i é o desvio-padrão de cada parâmetro considerando a matriz G , σ_i^2 é a variância e $\delta_{i\max}$ é a variância máxima associada com o mesmo parâmetro na região de formação da massa de água. Os pesos calculados para cada parâmetro se encontram na Tabela 3. Assim a equação linear, minimizada, se torna:

$$\begin{aligned} R^T R &= (Gx - d)^T W^T W (Gx - d) \\ &= \sum_{i=1}^m W_i^2 \sum_{j=1}^n (G_{ij} x_j - d_i) \end{aligned} \quad (4)$$

Uma vez que as equações são ponderadas para garantir uma melhor representação dos dados hidrográficos, os resíduos objetivamente indicam a qualidade da solução. Portanto, um baixo resíduo de conservação da massa indica que as propriedades daquela parcela de água são bem representadas pelas *águas-tipo-fonte* consideradas (Poole & Tomczak, 1999). Aplicando-se um limite superior aos resíduos de conservação da massa, regiões que não foram bem resolvidas pelo modelo podem ser identificadas e removidas dos resultados. Assim, um limite superior de 5% de conservação da massa foi considerado para fornecer um resultado satisfatório. As

contribuições das SWTs que representam as Águas Modais do Atlântico Sul neste trabalho foram interpoladas objetivamente em um *grid* de $0,25^\circ$ de latitude \times $0,25^\circ$ de longitude para a análise da distribuição espacial. Para as seções WOCE A10, foi utilizado o *grid* de $0,5^\circ$ de longitude \times 5 dbar de pressão.

A diferença entre a contribuição de cada Água Modal em cada ano e a contribuição média para a mesma Água Modal foi calculada para todos os pontos do *grid* para obtenção das anomalias de contribuição dessas massas de água para cada ano de dados da seção A10. Estas anomalias foram calculadas somente para uma contribuição percentual da massa de água superior a 30 %.

De forma resumida, a análise OMP segue os seguintes passos:

- 1) Plotar todos os parâmetros disponíveis *versus* temperatura para determinar o intervalo sobre o qual as relações lineares entre esses parâmetros são boas aproximações para os dados;
- 2) Determinar as *águas-tipo-fonte* a serem utilizadas na matriz G a partir de regressões lineares de todos os parâmetros *versus* a temperatura, gerando também as variâncias descritas anteriormente;
- 3) Adimensionalizar os parâmetros da matriz G e do vetor d ;
- 4) Determinar os pesos W a partir da equação (3);
- 5) Resolver a matriz equação (4) através de minimização de resíduos, usando o método dos quadrados mínimos;

2.2.1 Definições das Águas-Tipo-Fonte e dos Pesos dos Parâmetros

Neste trabalho as Águas Modais foram representadas por índices calculados através de regressões lineares. A temperatura potencial (θ) foi escolhida como parâmetro independente e os índices dos outros parâmetros (i.e., salinidade, oxigênio

dissolvido e vorticidade potencial), bem como seus desvios-padrão e tendências de variabilidade foram calculados a partir dos intervalos dos valores de ocorrência de temperatura potencial para cada Água Modal na sua respectiva região de formação (Figura 2.4). As regiões de formação utilizadas para determinação dos índices das Águas Modais Subtropicais seguiram a delimitação realizada por Sato & Polito (2014), enquanto para a Água Modal Subantártica utilizou-se a área definida por Holte et al. (2012). A Tabela 3 mostra os índices usados para representar cada Água Modal: STMW 1, STMW 2, STMW 3 e SAMW, além dos pesos aplicados para cada parâmetro.

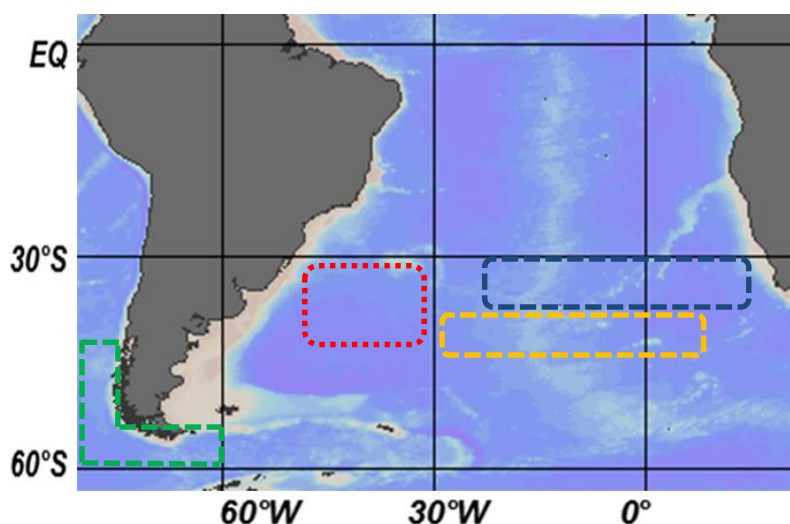


Figura 2.4 – Regiões de formação das Águas Modais do Atlântico Sul: Azul para STMW 1, vermelho para STMW 2, amarelo para STMW 3 e verde para SAMW. Áreas definidas de acordo com Sato & Polito (2014) para STMWs e Holte et al. (2012) para SAMW

2.3 Análise de Sensibilidade

Uma vez que a análise OMP assume que não há variação temporal nas *águas-tipo-fonte*, é necessário realizar uma análise de sensibilidade para verificar a validade quantitativa dos resultados obtidos. A análise de sensibilidade é necessária para mostrar o quanto contribuições fracionais de massas de água são dependentes dos índices de água-tipo-fonte definidos e se há influência de variação temporal de uma determinada propriedade. Nesta análise, valores das *águas-tipo-fonte* ligeiramente diferentes são

usados para cada ano, pois variações nas propriedades das águas-tipo também aparecem como variações da composição fracional na mistura (e.g. Leffanue & Tomczak, 2004).

Alguns estudos calcularam as tendências de variabilidade para as Águas Modais estudadas, alguns em termos de densidade potencial (Karstensen & Quadfessel 2002, Sato & Polito 2014) e outros em termos de T, S e VP (Naveira Garabato et al., 2009). Assim, é importante investigar como esses parâmetros não-estáticos podem afetar os resultados.

Tabela 3 – Águas-tipo-fonte, pesos e desvios-padrão das Águas Modais calculados para serem utilizados no OMP.

	T (°C)	S	OD ($\mu\text{mol kg}^{-1}$)	VP ($\text{m}^{-1} \text{s}^{-1} \times 10^8$)
STMW 1	18 ± 0.56	35.80 ± 0.11	238.4 ± 12.1	-0.043 ± 0.047
STMW 2	14 ± 0.53	35.40 ± 0.01	212.8 ± 38.1	-0.011 ± 0.029
STMW 3	12 ± 0.50	35.03 ± 0.14	233.3 ± 25.6	-0.014 ± 0.040
SAMW	4 ± 0.50	34.23 ± 0.04	237.9 ± 44.7	-0.005 ± 0.022
Pesos	21.472	21.472	0.689	0.063

Para minimizar esse problema e fornecer uma melhor avaliação dos resultados, utilizou-se a adição e subtração dos respectivos desvios-padrão das *águas-tipo-fonte* definidas e também tendências de variabilidade das propriedades entre 1990-2014 (Tabela 4) para alterar as águas-tipo-fonte pré-definidas na Tabela 3. Uma vez que a variação no conteúdo percentual de cada massa de água, a partir de cada rodada de sensibilidade, não apresentou alterações significativas (normalmente inferior a 8% de contribuição), os resultados apresentados neste trabalho correspondem a média dos resultados de todas as rodadas executadas, sendo estas: 1) rodada com as águas-tipo-fonte apresentadas na Tabela 3; 2) rodada com águas-tipo-fonte modificadas por desvio-padrão positivo (Tabela 3); 3) rodada com águas-tipo-fonte modificadas por desvio-

padrão negativo (Tabela 3); 4) rodada com águas-tipo-fonte modificadas por tendências anuais de variabilidade para cada ano (Tabela 4).

Tabela 4 – Tendências de variabilidade dos índices dos parâmetros hidrográficos das Águas Modais do Atlântico Sul, entre os anos de 1990 e 2014.

	T (°C yr⁻¹)	S (yr⁻¹)	OD (μmol kg⁻¹ yr⁻¹)	VP (m⁻¹ s⁻¹ yr⁻¹ × 10⁸)
STMW 1	-0.0055	-0.00086	-0.0786	-0.000064
STMW 2	-0.0021	-0.0023	-0.0205	-0.0000056
STMW 3	-0.0035	-0.00071	-0.0034	0.000014
SAMW	-0.0119	-0.00028	-0.1714	-0.000009

3. Resultados e Discussão

Mode Waters structure and variability in the South Atlantic Ocean thermocline

Arthur Gerard Quadros de Souza^{*,1}, Rodrigo Kerr¹ & José Luiz L. de Azevedo¹

¹Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima, Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, RS, 96203-900, Brazil.

*Corresponding author: A.G.Q de Souza

Address: Av. Itália km 8 s/n, Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Rio Grande, RS, 96203-900, Brazil

E-mail: arthur_gerard@hotmail.com

Phone number: +55 53 3233 6858

Running Title: Mode Waters in the South Atlantic Ocean

To be submitted to Deep-Sea Research I

Abstract

We investigated the spatial distribution and temporal variability (1993-2011) of the mode waters presented in the South Atlantic Ocean thermocline. We applied the OMP analysis within a compiled dataset including measurements from the World Ocean Database and Argo floats to quantify the fractions of mixture of the Subtropical and Subantarctic Mode Waters, respectively, STMW and SAMW (source water masses that fill the thermocline layer in the South Atlantic). The STMW and SAMW varieties distribution is in a good agreement with previous investigation of the central and intermediate water masses reported in the region. About the temporal variability, whereas STMW 2 and STMW 3 are increasing their contributions in the South Atlantic, STMW 1 and SAMW appear to be decreasing their contributions.

Key words: South Atlantic Thermocline, Mode Waters, OMP, Spatial Distribution

HIGHLIGHTS

- STMW 2 distribution is confined regionally, but its contribution to South Atlantic central waters over time appears to be increasing.
- *Subantarctic Mode Water* formed southeast Pacific Ocean, seems to be decreasing its contributions to South Atlantic intermediate waters.
- The STMW 3 contribution increases westwards, which suggests an increased activity of the Agulhas Leakage eddies in the South Atlantic.

1. Introduction

Mode Water is defined as a homogeneous water layer with a nearly vertical and horizontal volume found on a relatively large geographical area, which often occurs within or near the top of the permanent pycnocline (Hanawa & Talley, 2001). As these waters are characterized by homogeneity in their hydrographic properties (i.e., temperature, salinity, or dissolved oxygen) distribution, they tend to occupy a well-defined isopycnal volume in space (McCartney, 1977). Mode Waters are generally distributed below the surface far away from their formation areas. Subtropical Mode Waters are associated with every separated western boundary current of subtropical gyres. In the Southern Hemisphere, the Subantarctic Front is the southern boundary of the subtropical gyres. Because isopycnals plunge so rapidly towards the north across the front, very thick mode water is found to the north of the front (Hanawa & Talley, 2001).

Source areas of mode waters occur along permanent fronts, on the low-density side of the front, where the isopycnal slopes precondition the region for a thicker layer. Its formation or maintenance is usually associated with wintertime convective mixing due to buoyancy loss from the ocean surface, in a much more limited region than that of the total area occupied by the mode water (Hanawa & Talley, 2001). Formation of the Subtropical Mode Waters occurs during the winter and early spring months: usually between July and October in the south hemisphere. During this time, warm waters from western boundary currents flowing from the tropics poleward, undergo intense cooling during their path and lose heat to the atmosphere. The flux of heat to the atmosphere results in surface convection. This convection produces a mixed layer that can be very deep and then isolated when a shallow thermocline develops in spring, leaving the water in the deep part of the winter mixed layer. The water volume isolated from the surface subducts and is carried away from its formation region by the ocean circulation. This

ventilation process renews the main thermocline with water that was recently in contact with the atmosphere and thus saturated with dissolved oxygen, which generates a specific kind of mode water called *Subtropical Mode Water* (STMW) (Provost et al., 1999; Sato & Polito, 2014).

Comprehension of mode water hydrographic properties and physical processes are useful from several points of view. For example, variations in Mode Water properties and distribution are understood as changes of surface cooling rates, oceanic heat transport and eddy activity during wintertime in its source area (Hanawa & Talley, 2001). Formation of mode waters affects the oceanic heat storage and fluxes of heat and freshwater at seasonal to interannual scales (Qiu & Chen, 2006; Dong et al., 2007). Thus, investigating the mode water variability can contribute to the understanding of climate-related processes in the South Atlantic Ocean (e.g. Sato & Polito, 2014).

McCartney (1982), Roden (1986), and Tsuchiya et al. (1994) observed two types of mode waters in the South Atlantic: SAMW and STMW based on their surface densities. Provost et al. (1999) performed a detailed study using hydrographic data obtained in the 1980s and 1990s and XBTs collected between 1990 and 1996 by the World Ocean Circulation Experiment (WOCE) program. They identified three STMWs and their respective formation regions, estimated their mean thickness and observed that within the main ventilation window, STMWs exhibit quite a significant variability in characteristics and volume. Sato & Polito (2014) investigated the South Atlantic STMWs source regions, distribution and thickness using Argo profiles and found that almost all profiles that indicated mode water formation occurred at the time and within the region where the cumulative heat flux was negative. Venegas et al. (1996, 1997, 1998) analysed surface sea temperature (SST) and sea level pressure and observed interdecadal and interannual variability timescales of about 20, 6-7 and 4 years. Venegas

et al. (1998) observed that the 20-year cycles of mode waters variability began just after 1910, 1930, 1950, and 1970. The Subtropical Gyre have displayed positive SST anomaly from the half of second to the tenth year, and negative SST anomaly from the half of twelfth to the twentieth year of each cycle. Also, Karstensen & Quadfasel (2002) through the use of reanalysis data from the National Centers of the Environmental Prediction (NCEP), found surface density flux divergence and suggested an increase of thermocline water formation by about 50%, from the year 1980 to 2000.

McCartney (1977), by observing well-mixed layers in late winter north of the circumpolar Subantarctic Front (SAF), was the first to suggest that *Subantarctic Mode Water* (SAMW). He also suggested that SAMW formed southeast Pacific Ocean was the major contributor of Antarctic Intermediate Water (AAIW) present in the South Atlantic. Many authors (McCartney, 1977, 1982; Talley, 1996; Hanawa & Talley, 2001) suggested that SAMW cools, freshens and densifies from west to east along its circumpolar pathway, with several major detrainments northward into the subtropical gyres. Sloyan et al. (2010), utilized hydrographic surveys data from 2005 austral winter (late August–early October) and 2006 austral summer (February–mid-March) to investigate SAMW formed southeast Pacific Ocean and reported that its turbulent mixing driven by buoyancy loss and wind forcing is essential for forming the deep SAMW mixed layers. SAMW variability was estimated by Naveira Garabato et al. (2009), which used time series of the physical and biogeochemical properties of SAMW in the Drake Passage between 1969 and 2005. They found SAMW warmed and salinified during the 1970s and underwent to cooling and freshening of its waters from 1990 to 2005. Poole & Tomczak (1999), applying the same methodology as us and utilizing World Ocean Atlas (WOA) data from 1900 to 1993, divided thermocline waters at South Atlantic in three water masses: Western South Atlantic Central Water

(WSACW), the less dense water, originated at Brazil-Malvinas Confluence; Eastern South Atlantic Central Water (ESACW), formed at Indian Ocean and brought to South Atlantic by the Agulhas Leakage; and North Atlantic Central Water (NACW), a water with high environmental variability formed at Northern Hemisphere and standing at the bottom of the thermocline waters.

The South Atlantic Ocean, in comparison with other ocean basins, is a poorly sampled area and it has little information about distribution, variability and circulation of mode waters. The composition of water column is also often made in terms of central and intermediate waters. Therefore, we intend to use this work as a complement to previous studies and as a first step to understanding the mode waters varieties fractional contribution within South Atlantic thermocline.

1.1 South Atlantic Ocean

The study area covers the South Atlantic Ocean, among 0°-60°S latitude and 70°W-20°E longitude. The South Atlantic Ocean has an average depth of about 3.926 m and its deepest site is 7.235 m, at South Sandwich Trench. The South Atlantic Ocean may be also delimited in terms of its surface ocean currents, which are: South Equatorial Countercurrent (SECC) at north; South Atlantic Current (SAC) on the Subtropical Front (STC) near 40°S, at south; Benguela Current (BC¹), on west coast of African continent; and Brazil Current (BC²), on east coast of Brazil (Peterson & Stramma, 1991). These large scale currents flow in an anticyclonic gyre known as the South Atlantic Subtropical Gyre.

The South Atlantic water mass structure is represented from the surface to the bottom, as it follows: Tropical Water (TW), formed due high evaporation rates against precipitation rates observed on South Atlantic. TW is characterized by temperatures and

salinities higher than 20°C and 36, respectively, with density lower than 25.8 kg m⁻³ (Emilson, 1961); South Atlantic Central Water (SACW), which has very uniform properties along its extent. On TS diagram, it shows a curve marked at the points 5-20°C for temperature and 34.3-36 for salinity, with density ranging from 25.8 to 26.8 kg m⁻³ (Emery & Meincke, 1986); Antarctic Intermediate Water (AAIW), characterized by salinity minimum and dissolved oxygen maximum, which is found right below SACW. AAIW has temperature values between 3-6°C and salinity values between 34.3-34.6, with density between 27.15-27.2 kg m⁻³ (Emery & Meincke, 1986); North Atlantic Deep Water (NADW), which even found at South Atlantic, is originated from North Hemisphere. It shows high salinity and oxygen levels when compared to its limiting water masses, from top and bottom. Its temperature and salinity values are 1.5-4°C and 34.8-35.0, with density between 27.8-28.0 kg m⁻³ (Stramma & England, 1999); Antarctic Bottom Water (AABW), the densest and deepest water mass found in South Atlantic, with temperatures between -1.8°C and -0.5 °C, and salinity between 34.88-34.94. Its density is higher than 28.0 kg m⁻³ (Emery & Meincke, 1986). Here we focused on the upper ocean up to 1000 m of depth, which is filled with SACW and AAIW.

Two types of mode waters are recognizable in the South Atlantic Ocean. Several authors (e.g. McCartney 1977, McCartney 1982, Roden 1986, Tsuchiya et al. 1994, Provost et al. 1995, and Provost et al. 1999) identified and classified these mode water varieties based on their densities: Subtropical Mode Water is the less dense type with potential density less than 27.0 kg m⁻³, whereas Subantarctic Mode Water is the denser type characterized with potential density greater than 27.0 kg m⁻³. Provost et al. (1999) distinct the STMWs in three types, which follow the density (and temperature) ascendant order are: STMW 1 with temperature range from 16°-18°C and density range

from 26.0-26.2 kg m⁻³, STMW 2 ranging from 14°C to 16°C and 26.3 to 26.5 kg m⁻³ and STMW 3 ranging from 12°C to 14°C and 26.4 to 26.6 kg m⁻³. All varieties of STMW are formed in the South Atlantic Ocean and contribute to the South Atlantic Central Water (SACW) (e.g. Tomczak & Godfrey, 1994; Stramma & England, 1999; Provost et al., 1999; Sato & Polito, 2014). SAMW properties vary with the southward shift of the SAF towards the east (Hanawa & Talley, 2001). The coldest and freshest SAMW type (4 -5°C and 27.0-27.1 kg m⁻³) is located just west of Drake Passage in the South Pacific Ocean (McCartney, 1977) and strongly contribute to Antarctic Intermediate Water (AAIW) found in the South Atlantic Ocean (McCartney, 1977).

2. Data and Methodology

Here, we combined World Ocean Database and Argo float data to investigate the spatial distribution from fractional mixture of source water types (SWT) of the South Atlantic mode waters. Further, the three repetitions at WOCE A10 section are used to evaluate the temporal variability and the vertical extent of the water mass fractional mixture between 1993 and 2011.

2.1 DATA SET

The data used here covered the South Atlantic basin from the equator to 60°S latitude and longitudes from 70°W to 20°E. We combined data of Argo floats with DO sensor available (www.argodatamgt.org) with hydrographic data from the World Ocean Database 2013 (WOD2013; www.nodc.noaa.gov). The temporal coverage of Argo spans from 2006 to 2014, while the WOD2013 dataset spans from 1906 to 2013. Potential vorticity (PV) has been obtained through:

$$PV = -\frac{f}{\rho_0} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial z} \quad (1)$$

Where f is the potential vorticity, ρ_0 is the mean density of sea water, $\partial \sigma_\theta$ is the potential density partial derivative and ∂z is the depth derivative. A data quality control was made to ensure that noisy data were removed and only the good data were used in combination with Argo data, which were selected by marking “only good data” on their domain. After that, repeated stations and parameter data higher than one standard deviation were removed.

We chose the WOCE repeat section A10 (30°S) to investigate the water masses temporal variability. WOCE A10 sections (<http://cchdo.ucsd.edu/search?q=A10>) were conducted during three surveys by: RV *Meteor* from December 27th, 1992 to January 31th, 1992; RV *Mirai* from November 6th to December 5th, 2003; and RV *Ronald H. Brown* from September 26th to October 31th, 2011. The first two cruises were performed from South America (Rio de Janeiro) to South Africa (Cape Town) and the last one on the opposite way. The cruise repetitions of WOCE A10 sections allowed quasi-20 years comparison of the central/intermediate water mass structure changes.

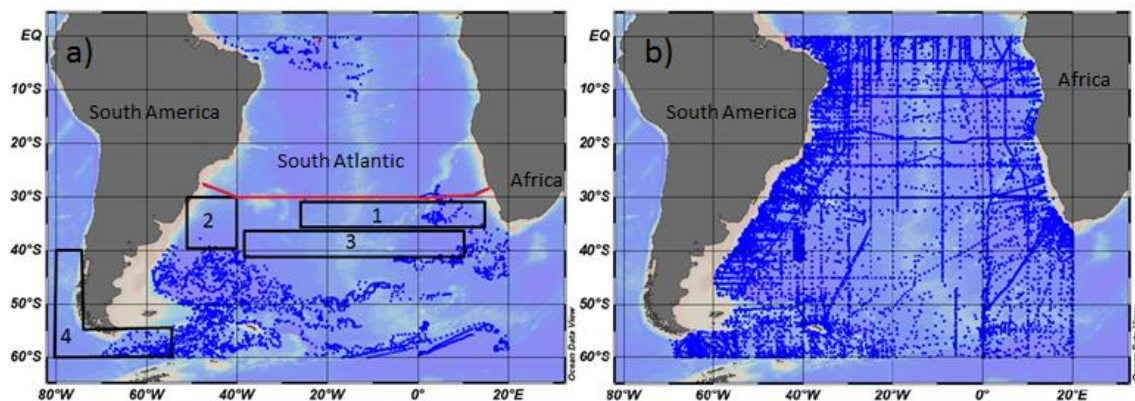


Figure 3.1. Study area. (a) Argo floats distribution (blue dots), WOCE A10 repeat section (red line), and mode waters source regions: STMW 1 (area 1), STMW 2 (area 2), STMW 3 (area 3) and SAMW (area 4). (b) WOD 2013 hydrographic data distribution (blue dots).

2.2 OMP ANALYSIS

Optimum Multiparameter (OMP) analysis is an inverse modeling technique that determines the relative fractions of mixture of distinct water types to a water sample. As the method has been previously described by several authors (e.g. Tomczak & Large, 1989; Tomczak, 1999; and Poole & Tomczak, 1999), we only summarized here some important aspects. The basic assumption of OMP analysis is that a linear relationship exists between the parameters. This entails considering complete mixing, so that all turbulent coefficients can be considered as being of the same order. The most important step in this analysis is to express all seawater samples as linear combinations of some selected source water types (SWTs), which are the parameter values that represent a water mass in its source region. OMP output is calculated by residual minimization through the least squares method.

Here, we used four SWTs to represent the South Atlantic mode waters varieties, i.e. STMW 1, STMW 2, STMW 3, and SAMW. We considered the following parameters to distinct the water masses contribution: potential temperature (θ), salinity (S), dissolved oxygen (DO), and potential vorticity (PV). Thus, the linear mixing equations can be expressed in a matrix form, as expressed by:

$$Gx - d = R \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\ OD_1 & OD_2 & OD_3 & OD_4 \\ VP_1 & VP_2 & VP_3 & VP_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \theta_{obs} \\ S_{obs} \\ OD_{obs} \\ VP_{obs} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_\theta \\ R_S \\ R_{OD} \\ R_{VP} \\ R_{massa} \end{bmatrix}$$

where G is the SWT matrix, which contains the hydrographic parameters representing each one of the mode waters; x is the relative contributions of the water sample; vectors B and R are the observed data and the residuals, respectively. The last row represents

the mass conservation. Total contribution of all SWT shall not be more to 100% and negative contributions are not allowed, because no physical meaning exists. The contributions of the mode waters for the South Atlantic Ocean were objectively mapped within a grid of 0.25° latitude vs. 0.25° longitude for the maps of spatial distribution, while vertical profiles were interpolated into a grid of 0.5° longitude vs. 5 dbar.

OMP assumes that information contained in the data for each parameter is from good quality. However, this does not occur often, especially due influence of environmental variability and accuracy of measurements, which can result in a not realistic solution of the method. In order to correct the influence of these features, we applied a weighted version of G matrix $W(Gx - d) = R$, by including a diagonal matrix W , which has respective weights for each parameter. Diagonal matrix W is obtained by:

$$W_i = \frac{\sigma_i^2}{\delta_{i\max}} \quad (3)$$

where σ_i^2 is the variance of each parameter i among all SWTs and $\delta_{i\max}$ is the maximum variance associated with the same parameter in the source water mass region. Mass conservation gets the highest weight amongst the parameters weights. For more information about OMP method see Tomczak & Large (1989).

Since mixing equations are weighted to make optimal use of the hydrographic data, the residuals objectively indicate the quality of the solution. Therefore, a low mass conservation residual indicates that the properties of the water sample are well represented by the source water types considered (Poole & Tomczak, 1999). All mode waters are well represented in our analysis and all figures analyzed here show only results with a mass conservation residual below 5%. Differences between the water mass contribution of each year of WOCE A10 data and the mean contribution for the same water mass from all cruises were computed at each grid point to calculate the

Mode Water Mass contribution anomalies for the respective years. Anomalies were calculated only if the percentage of water mass contribution to the mixture was greater than 30%.

2.3 SOURCE WATER TYPES DEFINITIONS

In this study, we considered STMW source regions identified by Sato & Polito (2014), whereas a compilation of source areas for SAMW was identified (e.g. McCartney, 1977; Hanawa & Talley, 2001; Holte & Talley, 2013). Potential Temperature values were based on Provost et al. (1999) for STMWs and Holte et al. (2012) for SAMW. *S*, DO and PV values were obtained through linear regression of these parameters against potential temperature in the source regions and weights of all parameters were calculated following equation (3), by using the variance of each SWT, shown in Table S1 and the parameters variance in each source region. Also in the source regions, we computed variability trends of SWT for each mode waters within its own potential temperature range.

Table S1 - Source Water Types and parameter weights used to represent mode water varieties found in the South Atlantic Ocean. The standard deviations and trends of each property from 1990 to 2014 (units per yr⁻¹; in brackets) used to perform OMP sensitivity analysis is also presented (see section 2.4).

	T (°C)	S (PSU)	DO (μmol kg⁻¹)	PV (m⁻¹ s⁻¹ × 10⁸)
STMW 1	18 ± 0.56 [-0.005]	35.80 ± 0.11 [-0.0009]	238.4 ± 12.1 [-0.08]	-0.043 ± 0.047 [-6.4 × 10 ⁻⁵]
STMW 2	14 ± 0.53 [-0.002]	35.40 ± 0.01 [-0.0023]	212.8 ± 38.1 [-0.02]	-0.011 ± 0.029 [-5,6 × 10 ⁻⁶]
STMW 3	12 ± 0.50 [-0.003]	35.03 ± 0.14 [-0.0007]	233.3 ± 25.6 [-0.01]	-0.014 ± 0.040 [-1,4 × 10 ⁻⁵]
SAMW	4 ± 0.50 [-0.001]	34.23 ± 0.04 [-0.0005]	237.9 ± 44.7 [-0.17]	-0.005 ± 0.022 [9,0 × 10 ⁻⁶]
Weights	21.472	21.472	0.689	0.063

2.4 OMP Sensitivity Analysis

As OMP does not allow SWTs changes along the time, a sensitivity analysis (e.g. Kerr et al., 2009; Leffanue & Tomczak, 2004) was performed in order to evaluate the results obtained with static SWTs. A variation associated with the water type definition is an important issue; because of the water mass variability of its contributions to the total mixture could also arise from temporal variability. Thus, the variability of the water mass contributions could, in part, be artefacts of the method instead of real variations in water mass fractions (e.g. Kerr et al., 2009). A sensitivity test is needed to show how the fractional water mass contributions might change with their standard deviations and if a time-dependent property is used. In this context, slightly different water types are used for each year because changes in the properties of the water types also emerge as variations of the fractional composition in the mixture (e.g. Leffanue & Tomczak, 2004). Thus, we perturbed the SWTs parameters with their standard deviations and also using the parameters trends (Table S1) found from 1990 to 2014 in each source water mass region. In general, changes in the water masses contributions between distinct OMP runs did not exceed 8%. The final results presented throughout the manuscript are the average contribution among all OMP runs performed.

3. Results

We present here the mode water spatial distributions (Figs. 3.2-3.6) on horizontal surfaces at 100, 200, 300, 500, and 700 dbar. Further, average distribution and associated standard deviations (Figs. 3.7-3.8) and the vertical distribution and temporal variability (Figs. 3.9-3.12) are shown and discussed.

3.1 SPATIAL DISTRIBUTION ACCORDING TO ARGO AND WORLD OCEAN DATABASE DATA

STMW 1 is the lightest type of Subtropical Mode Water in the South Atlantic, and it occupies almost the entire tropical portion of the basin at 100 dbar. STMW 1 occurs from equator to $\sim 40^{\circ}\text{S}$ up to 100 dbar (Fig. 3.2a), decreasing its contribution until 200 dbar (Fig. 3.3a), where its highest contributions are now more concentrated at the western side of the basin, near Brazilian coast between $10\text{-}30^{\circ}\text{S}$. Its signature is found until 300 dbar as a small feature with contributions around 35%. STMW 2 starts to be found with small contributions at 100 dbar (Fig. 3.2b), increasing its contributions as deeper in the water column. STMW 2 significant contributions start to appear at 200 dbar (Fig. 3.3b) and its highest contributions can be found between 300-400 dbar (Figs. 3.4-3.5b), covering an area around $25\text{-}35^{\circ}\text{S}$ and $20\text{-}40^{\circ}\text{W}$. It is remarkable that a wide equatorial region is filled with contributions of STMW 2 from 100 to 400 dbar. However, according to previous studies (e.g. Hanawa & Talley, 2001) STMW 2 is not found there and that water mass may be an equatorial water mass with similar features to STMW 2 that were resolved by the mixing scheme applied.

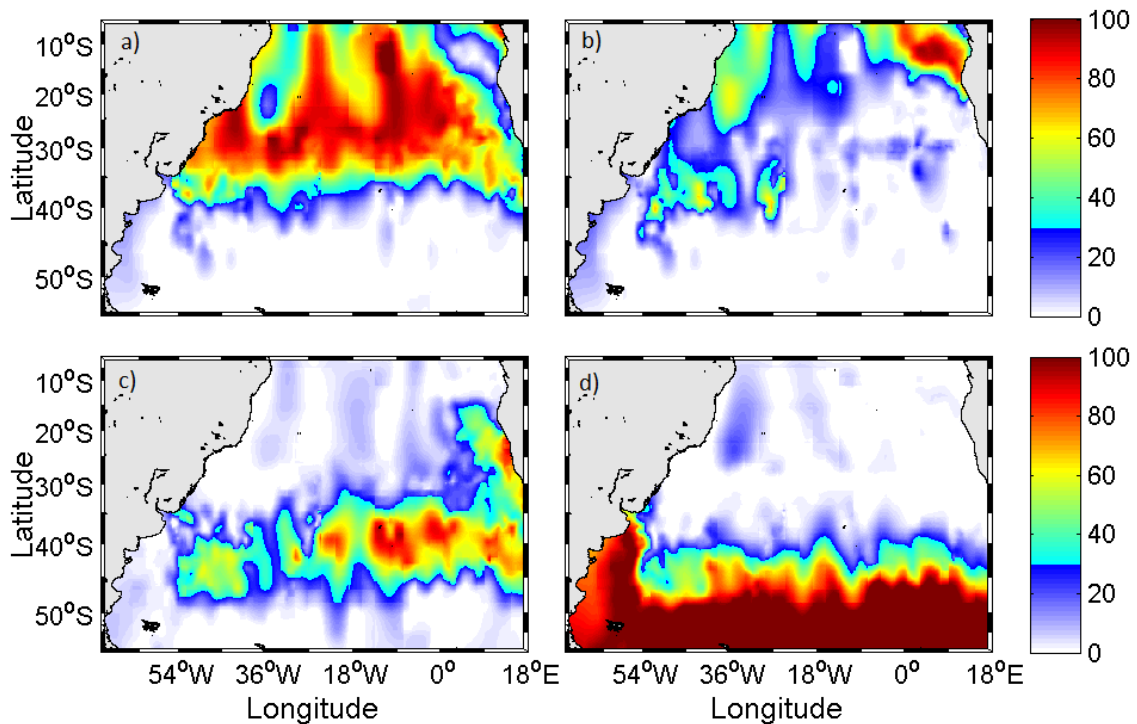


Figure 3.2 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 100 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW.

STMW 3 at 100 dbar is zonally distributed at 40°S and is more pronounced near South African coast (Fig. 3.2c). Between 100 and 300 dbar (Figs. 3.2-3.4c), STMW 3 highest contributions are more concentrated on the eastern side of the basin. From 300 to 700 dbar (Figs. 3.4-3.6c), STMW 3 acquires the spatial setting of the pathway of Agulhas Leakage at South Atlantic (Biastoch et al., 2009), suggesting that this mode water carries Indian Waters within its extent. STMW 3 is traceable down to 750 dbar at the center of the gyre (not shown). SAMW appears with high contributions below 45°S at 100 dbar (Fig. 3.2d). At this pressure level, SAMW is restricted to latitudes higher than 40°S, with an exception for the confluence region where it goes beyond 40°S, due the injection of Malvinas Current (MC), which carries waters from southeast Pacific that were modified when flowing through Drake Passage and entered in the South Atlantic continental shelf (McCartny, 1977). As it goes deeper, SAMW still exhibits high contributions around SAF and advances through South Atlantic (Figs. 3.3-3.4d),

sinking below STMW 3 at the center of the subtropical Gyre and shows up again between 10-20°S (Figs. 3.5-3.6d) with lower contributions. From 800 until 1000 dbar, SAMW is the major contributor for the structure of mode waters at the South Atlantic.

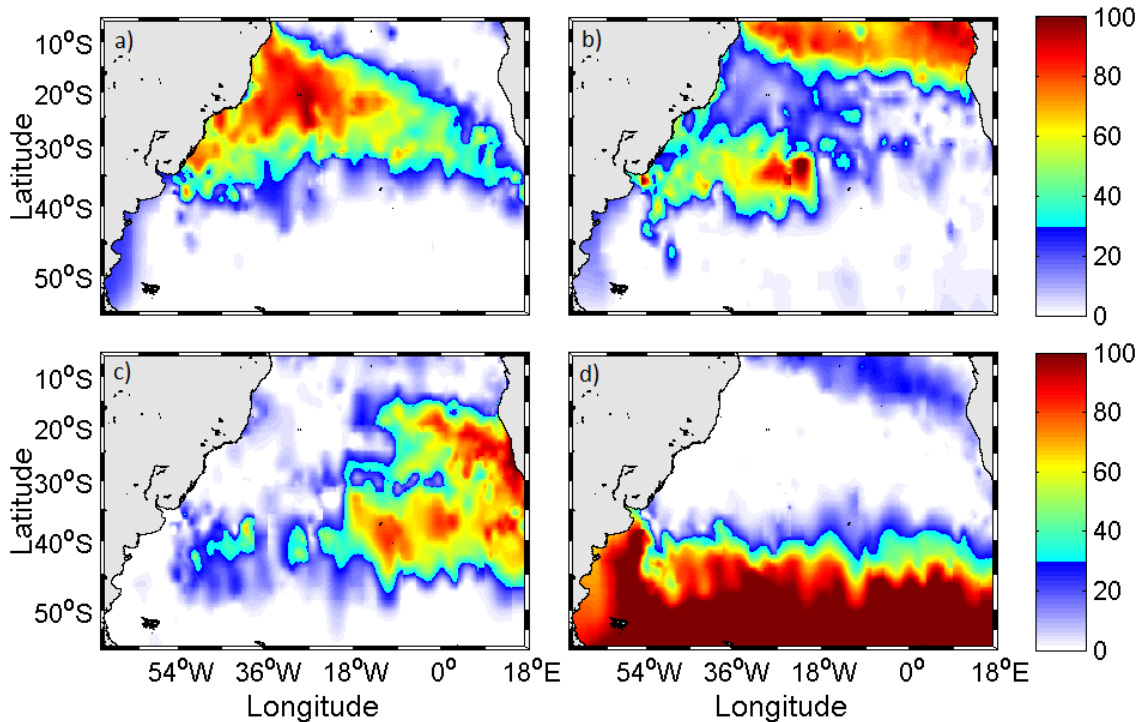


Figure 3.3 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 200 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW.

The spatial distribution of the mode waters matches the general surface circulation proposed by Peterson & Stramma (1991). The four density levels 26.2, 26.5, 26.7 and 27.1 kg m⁻³, often found in the recirculation region of the subtropical gyre, i.e., west of 40°W and south of 30°S are found at the basin, represented by the percentual contribution of mode waters. Previous studies (e.g. Siedler et al., 1987; Hanawa & Talley, 2001; Sato & Polito, 2014) showed that STWM 1 reaches deeper levels east of Greenwich and shallower levels westwards in the South Atlantic Ocean, reaching the western side of the basin around 40°W. Here, we observe that the contributions of this mode water are deeper in the western side of the gyre (Fig. 3.3a), as Provost et al. (1999) observations suggested. The spatial distribution of the STMW 1 suggests that this mode water is zonally advected from east to west at subsurface levels by the

Benguela Current and a returning branch of the Brazil Current recirculation gyre (Stramma & England, 1999).

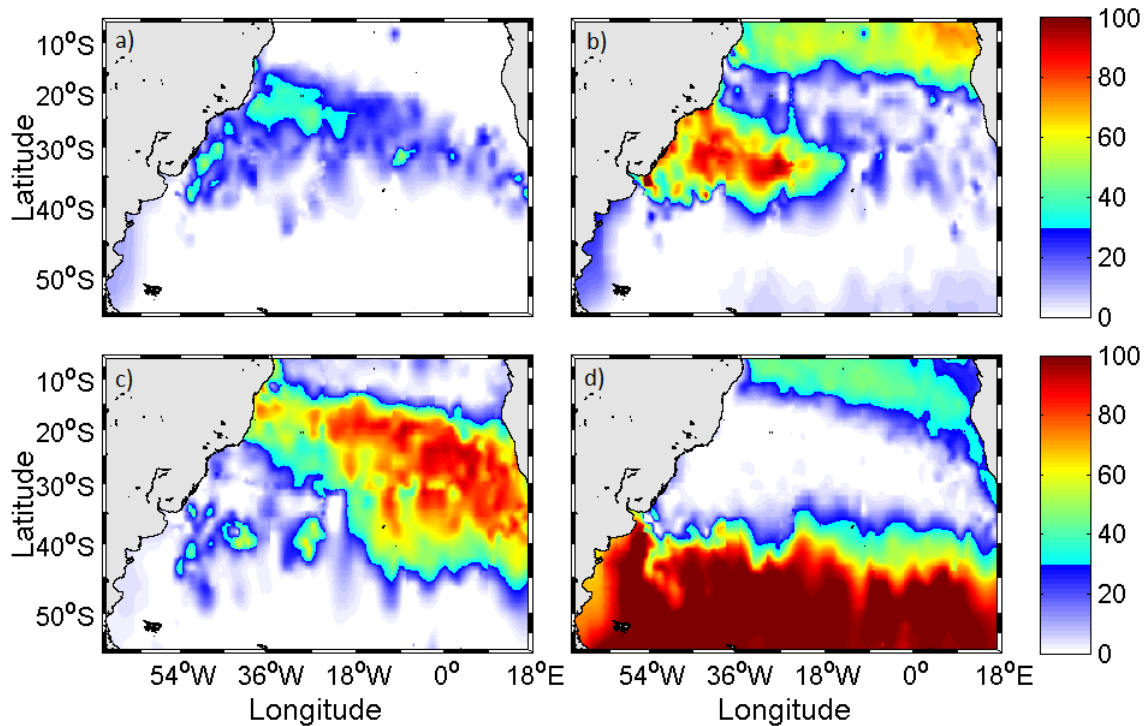


Figure 3.4 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 300 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW.

The distribution of STMW 2 presented here (Figs. 3.2-3.5b) is predominantly concentrated west of 25°W in the Brazil Current (BC²) recirculation gyre, and in the region affected by the southern excursions of the BC² fronts (Stramma & England, 1999). We observe that STMW 2 is located only around its formation region, with an exception for the sub-equatorial portion of the basin. STMW 2 found in Brazil-Malvinas Confluence region could be the result of the interaction between the southward Brazil Current and the northward Malvinas Current occurs around the latitude of 38°S (Sato & Polito, 2014). The appearance of STMW 2 around 10°S may be explained by the presence of another water mass with similar properties as STMW 2.

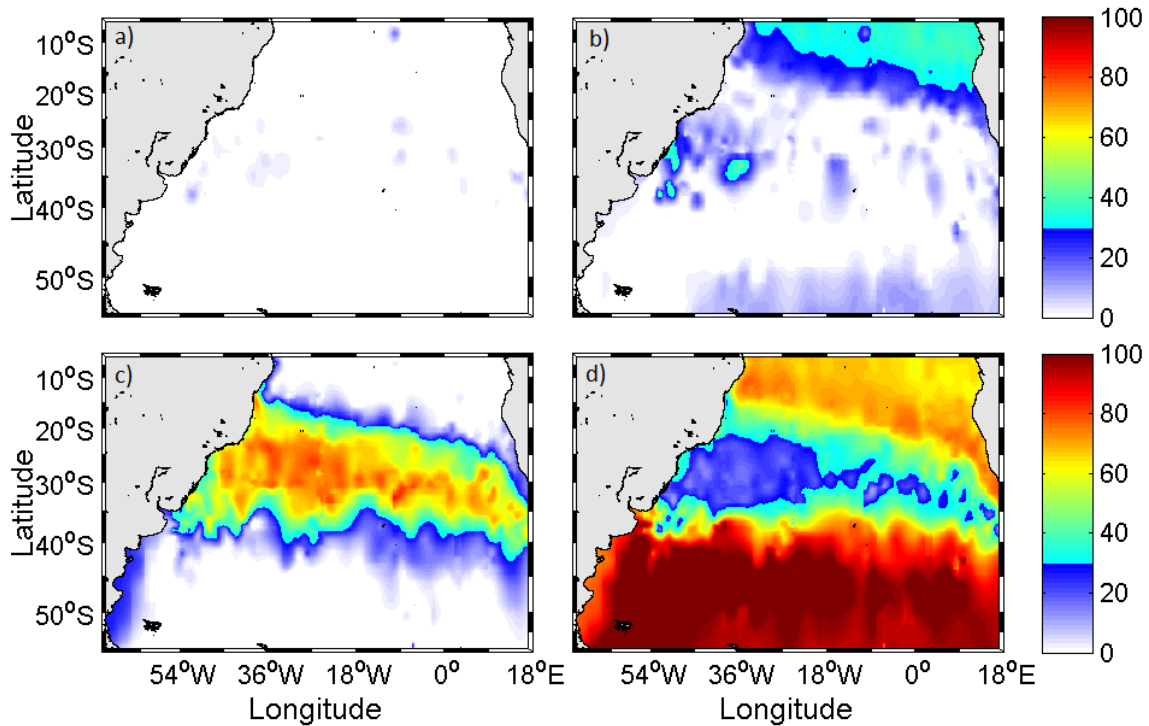


Figure 3.5 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 500 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW.

STMW 3 is primarily found on the southern and eastern side of the Subtropical Gyre (Fig. 3.2c), between 10°W and 10°E , in agreement with Provost et al. (1999) observations. STMW 3 structure along the South Atlantic Ocean is explained by the physical mechanism of Ekman pumping in the anticyclonic Subtropical Gyre, which leads to a thermocline sinking in the center of gyre. Also, its spatial setting suggests that this mode water carries eddies released by the Agulhas Retroflection at southeastern South Atlantic. These eddies contain Subtropical Indian Mode Water (SIMW) brought from Indian Ocean and spread into South Atlantic within the pathway of the Agulhas Leakage, reaching the Brazilian coast (Biaostoch et al., 2009; Gordon, 1985). Even classified as a SAMW by some authors, STMW 3 is formed near the Subtropical Front and its main contribution is for SACW, but STMW 3 found often in the interior of the Argentine basin is considered a mixture of the Subantarctic Surface Water (SASW) and the SACW (Maamaatuaiahutapu et al., 1999). Also, the distribution of STMW 2 and

STMW3 could be compared to the one made by Poole & Tomczak (1999) for thermocline waters, where they split SACW in two components (WSACW and ESACW). Here, WSACW could be our STMW 2 and ESACW could be STMW 3. STMW 2 formed at the same region as WSACW and some STMW 3 brought and shed within South Atlantic by Agulhas Leakage (Poole & Tomczak, 1999). At 300 dbar (Fig. S4), our STMW 2 is well spread around Confluence region, whereas they found WSACW filling practically all South Atlantic at that depth level. When it comes to 500 dbar, STMW 2 practically disappear and STMW 3 acquires the almost the same shape as WSACW. Even they are formed at different regions, this setting may be explained because the range of chosen hydrographic parameters of each water mass, which are close to each other, especially on the top values of temperature and salinity.

The spreading of the SAMW in the South Atlantic Ocean is linked to the AAIW circulation scheme. South of the confluence region, the SAMW, or the lightest AAIW, follows the path of the MC (Piola & Gordon, 1989; Talley, 1996). North of the confluence region, the AAIW flows with the Subtropical Gyre (Reid, 1989; Suga & Talley, 1995; Boebel et al., 1997; Maamaatuaiahutapu et al., 1998). SAMW is the main contribution for AAIW at the South Atlantic (McCartney 1977; Talley, 1996). It can be seen that SAMW goes down on the center of the gyre, because there is the presence of STMW 3 at the center, as it is sank by Ekman pumping, leading SAMW contributions at the center only be considerable from 600 dbar. At 700 dbar (Fig. 3.6), the pathway of Agulhas Leakage is still marked as mesoscale features.

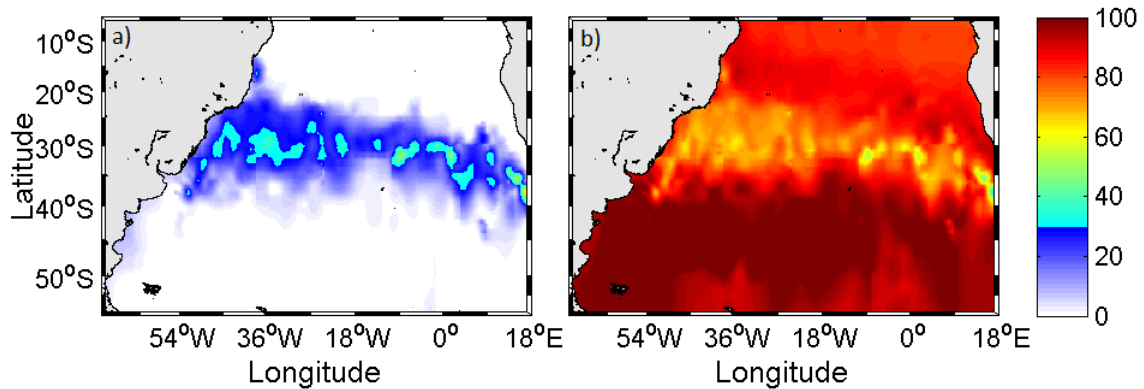


Figure 3.6 – South Atlantic mode waters spatial distribution at 700 dbar. Percentage of mixture of a) STMW 3, b) SAMW.

3.2 MODE WATER DISTRIBUTION ALONG 30°S

STMW 1 presents almost uniform all along the section (Fig. 3.7a) and its highest contributions are spread along the section, down to 200 dbar. STMW 1 highest contribution appears at 10°E. STWM 2 shows a weak and small signature and it starts at 45°W with contributions decreasing to less than 50% until near 20°W (Fig. 3.7b). STMW 3 appears all along the section its highest contributions are around 400 dbar between 45°W and 20°W (Fig. 3.7c). SAMW is well located with medium contributions between 600 and 700 dbar and shows a very small rise towards South Africa coast (Fig. 3.7d). Below 700 dbar, SAMW shows its highest contributions, with an exception for the eastern side, after 10°E, where SAMW 90% contribution reaches 600 dbar.

The associated standard deviations (Fig. 3.8a-f) show regions of high and low variability of those mode waters. For STMW 1, it can be seen that this shallow mode water shows standard deviations higher than 20%, which can be explained due the various and intense ocean-atmosphere exchanges and the existence of Tropical Water (TW), which was not accounted for in our analysis. At 200 dbar located 45°W, with standard deviations around 15-20%, STWM 2 displays high variability, as it is formed at the confluence region (Sato & Polito, 2014). STMW 3 shows regions of high

variability, some of them may be explained due to mesoscale processes that occur at this region, like the Agulhas Rings that carry Indian Central Water (ICW) and (SIMW), which are shed by the Agulhas Leakage (Poole & Tomczak, 1999; Biastoch et al., 2009). SAMW is the most stable, showing highest values at the shallowest region of it, with values around 0.17 at 30°W and getting higher eastwards, reaching 0.20, always on the top of the layer.

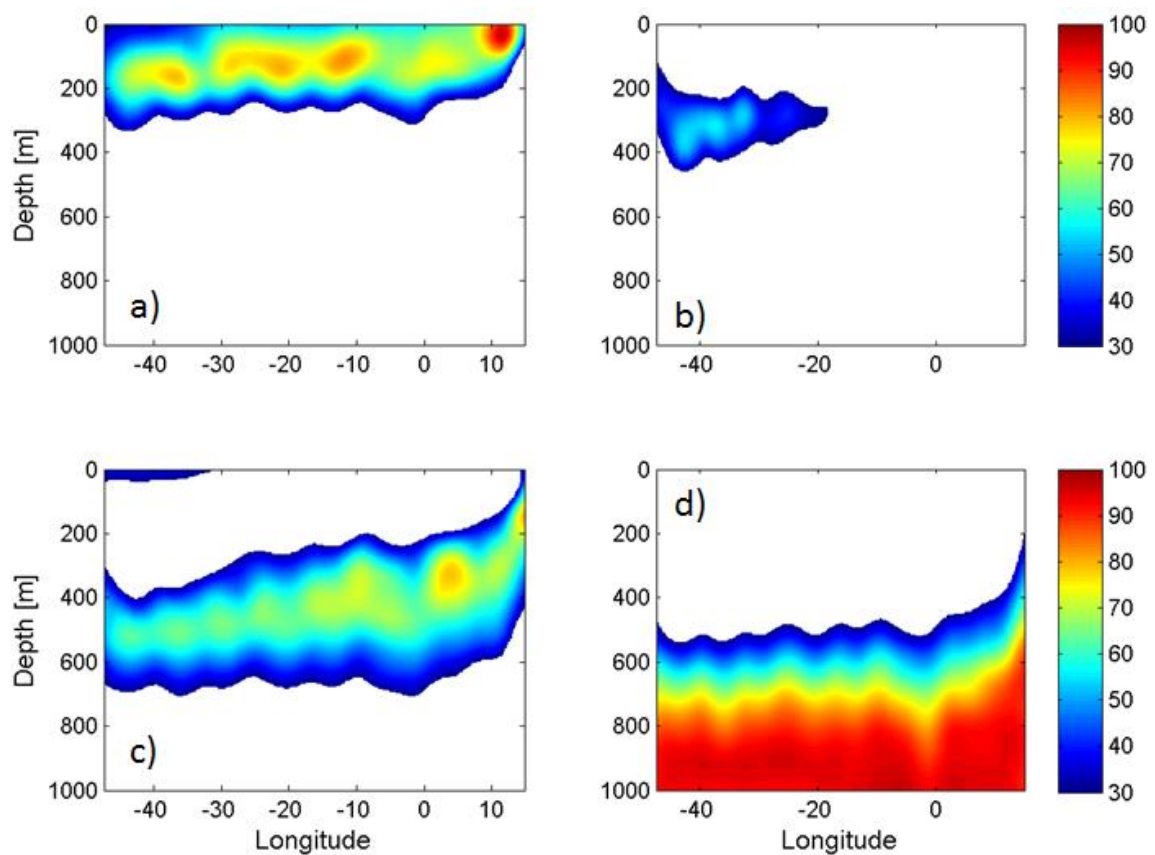


Figure 3.7 – Mode waters mean vertical distribution at WOCE A10 section. Mean percentage of mixture of a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW.

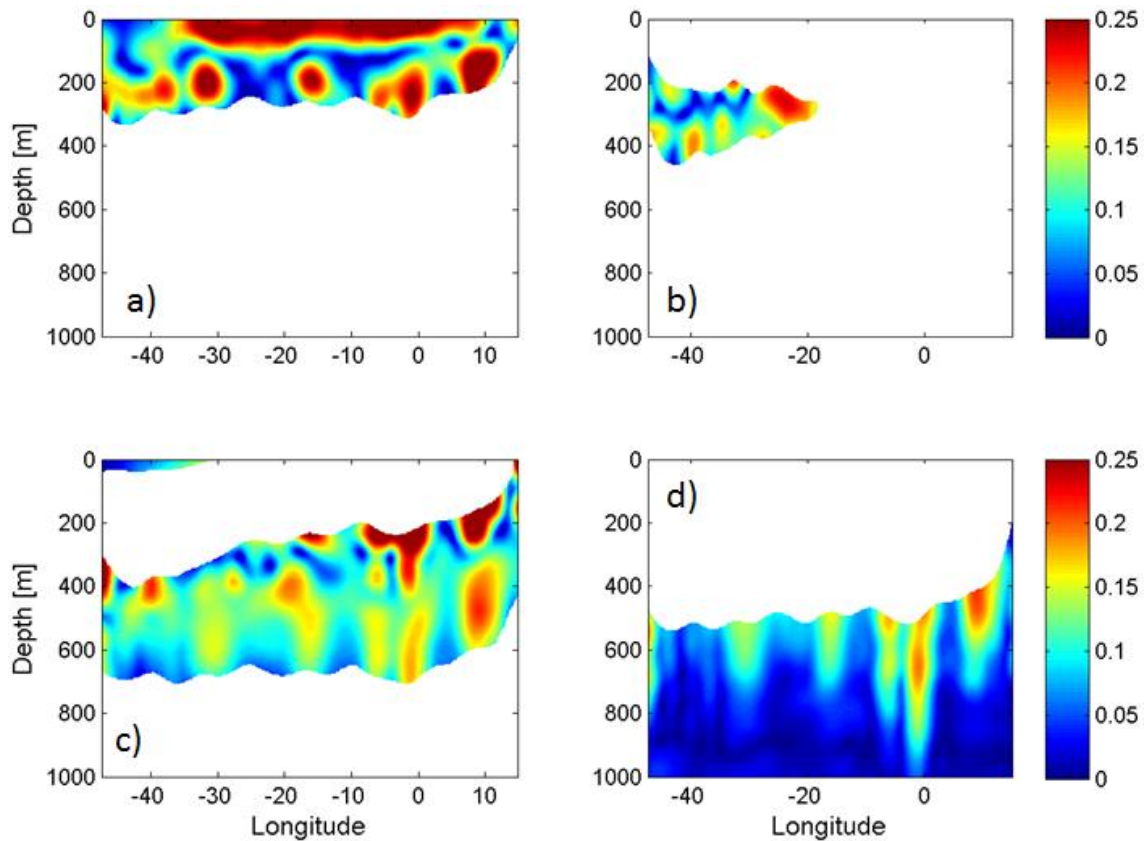


Figure 3.8 – Mode waters standard deviation at WOCE A10 section for a) STMW 1, b) STMW 2, c) STMW 3 and d) SAMW.

WOCE A10 repeated hydrographical sections are executed on a nearly decadal range. STMW 1 is always found on the first 200 dbar. For 1993 (Fig. 3.9a), STMW 1 presents its highest contributions, between all years of data, starting at 30°S and reaching 10°E. This main contribution gets weaker in the following years. STMW 1 shows a decreasing pattern of distribution, with a drop of contribution on its more significant region of the section, differing a little between 2003 and 2011 (Fig. 3.9b-c).

STMW 2 displays a progressive increase in contributions from around 60% to 80% (Fig. 3.9d-f), getting more pronounced as the years pass by, as well a small increase in its distribution eastwards, reaching 20°W, with small contributions.

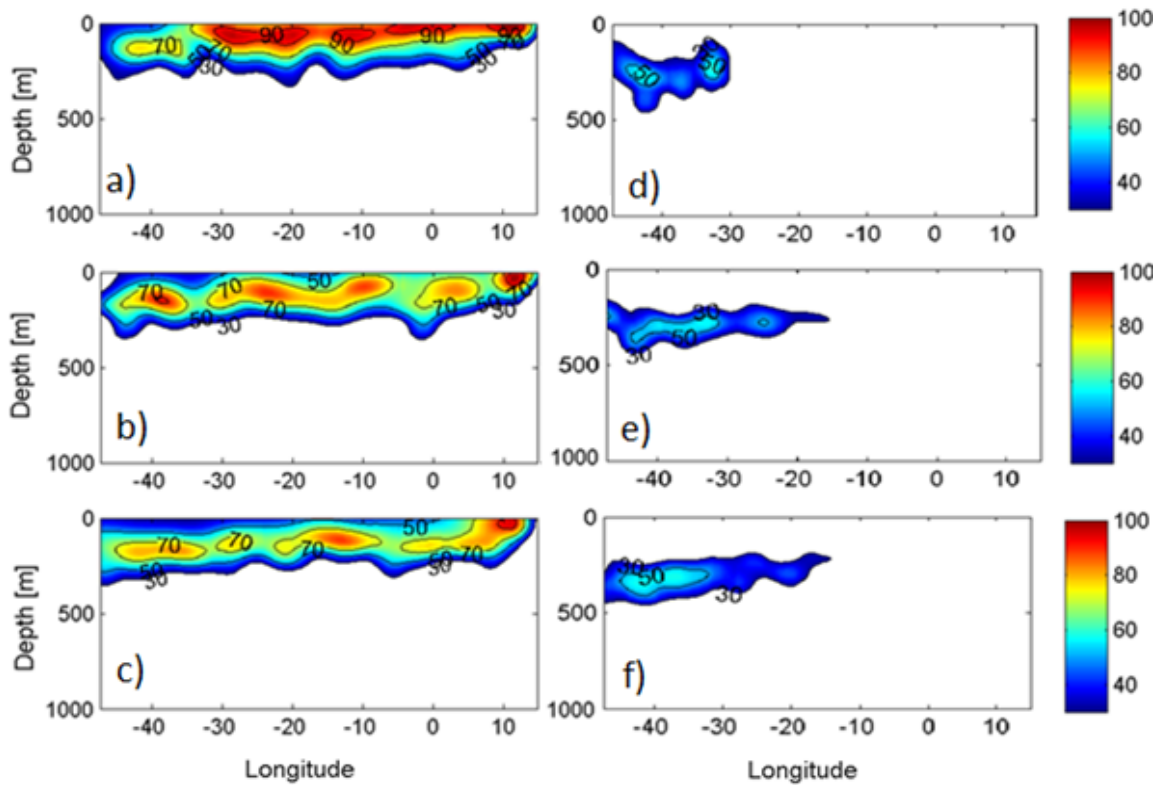


Figure 3.9 – Mode water vertical distribution at WOCE A10 section. Percentage of mixture of STMW 1 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and STMW 2 at d) 1993, e) 2003 and f) 2011.

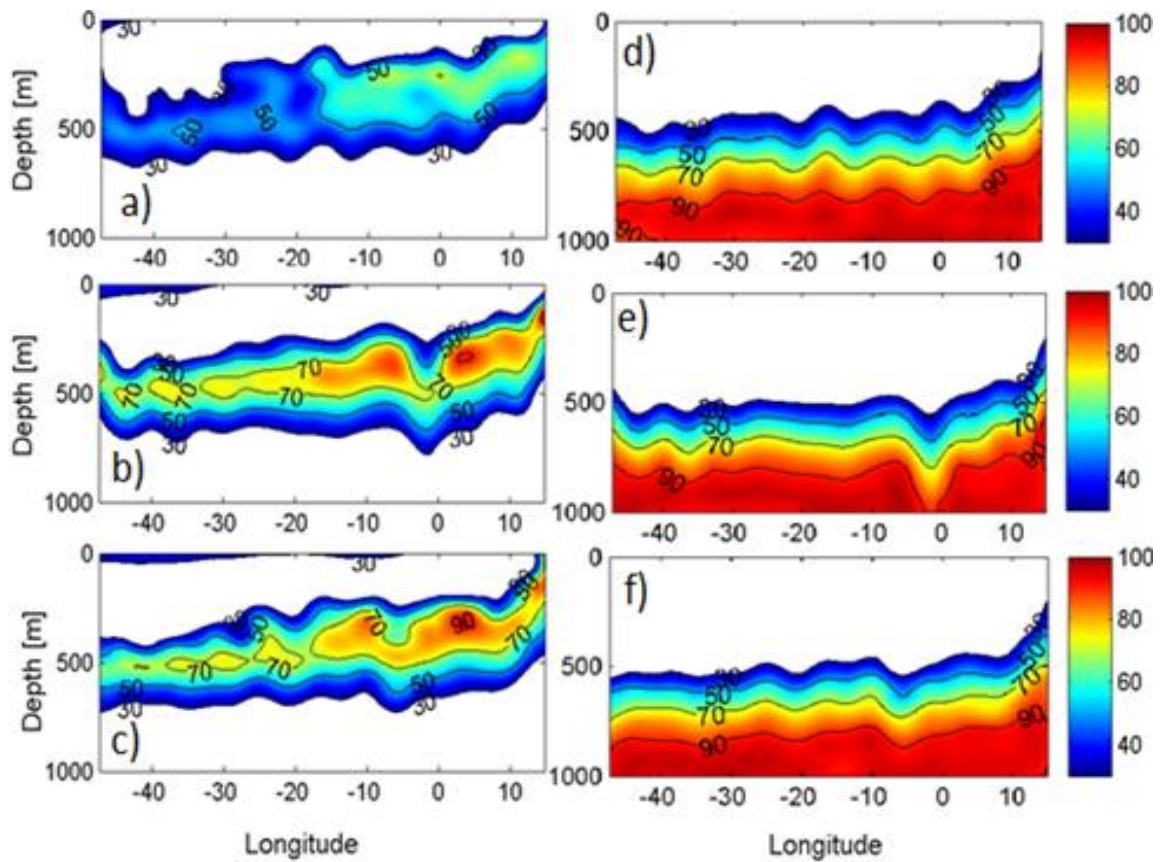


Figure 3.10 – Mode water vertical distribution at WOCE A10 section. Percentage of mixture of STMW 3 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and SAMW at d) 1993, e) 2003 and f) 2011.

STMW 3 highest contributions in 1993 (Fig. 3.10a) are more concentrated to the eastern side of the basin than the following years, showing contributions higher than 80% from 15°W until coast of Africa. From 2003 to 2011 (Fig. 3.10b-c), STMW 3 highest contributions were displaced westwards, reaching the Brazilian coast.

SAMW stays practically unaltered, but its contributions around 70% at the eastern side of the section seem to go down from 500 dbar in 1993 (Fig. 3.10d) to 600 dbar offshore Africa, from 1993 to 2011 (Fig. 3.10e-f).

In summary, STMW 1 does not seem show any significant change among the years. The only exception is for the year 1993, when it appeared with higher contributions. STMW 2 increase may be due its source region, which is marked by high variability, Brazil-Malvinas axis displacement and the change in intensity of these two currents. STMW 3 increase westwards suggests that there was an increase in the activity of the Agulhas Eddies and other mesoscale features shed by Agulhas Retroflexion. SAMW seems to be virtually unaltered.

3.3 MODE WATERS TEMPORAL VARIABILITY AT 30°S

STMW 1 appears with positive contribution anomalies on its top and negative contribution anomalies at 1993, and then it gets the opposite. Between 2003 and 2011, STMW 1 seems to decrease its contributions. STMW 2 displays a gradual increase on its contribution anomalies from 1993 to 2011. In 1993 it shows negative values almost and gets positive values mainly in 2011. STMW 3 presents negative contribution anomalies in 1993 almost on it whole and then gets stronger. In 2003, STMW 3 shows huge areas of positive contributions and they are still positive or slightly near zero in 2011. SAMW in 1993 shows positive contributions throughout itself, especially on the

top. The same areas where SAMW showed positive contribution anomalies in 1993, now turn negative in 2003 and in 2011.

Venegas et al. (1998) showed that the interdecadal cycle for mode waters in South Atlantic is related to interactions between the wind-driven subtropical ocean gyre and the atmospheric circulation. In other words, for a harsh winter, there is subtropical mode water formation and for a mild winter, practically does not. Provost et al. 1999 pointed that mesoscale structures may influence interannual variations and suggested a qualitative correlation between the heat fluxes and the formation of Subtropical Mode Waters, which can be seen for STMW 1 and especially for STMW 2 and STMW 3, mode waters that receive many mesoscale features influence. For SAWM, its interannual variability is primarily driven by variations in wintertime air–sea turbulent heat fluxes and net evaporation modulated by the El Niño Southern Oscillation (ENSO) (Naveira Garabato et al., 2009).

Also according to Venegas et al. (1998), 20-year cycles of mode waters interdecadal variability began just after 1910, 1930, 1950, and 1970. Karstensen & Quadfasel (2002) suggested an increase of thermocline water formation by about 50%, from the year 1980 to 2000. By maintaining these sequences, our mode waters that have experienced this increase on their contribution were, again, STMW 2 and STMW 3.

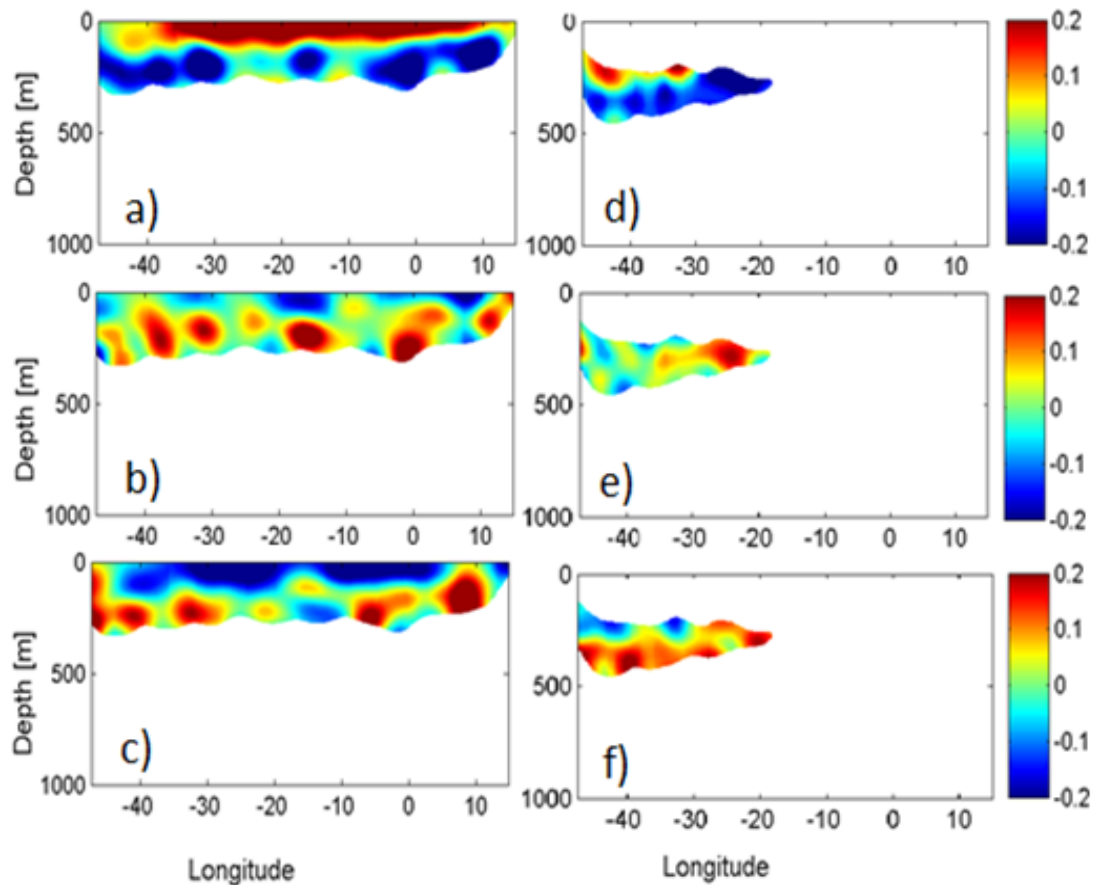


Figure 3.11 – Contribution anomalies at WOCE A10 section for STMW 1 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and STMW 2 at d) 1993, e) 2003 and f) 2011.

STMW 1 contribution anomalies decrease, especially on its top part, may be due its air-sea interaction. Increases on STMW 1 contributions only appear as small structures, which appear being mesoscale features, such as the Agulhas Rings. STMW 2 increase on its contribution may be linked to the fact that this mode water are formed in a region of high interannual variability, fed by the encounter of BC and MC waters which carry distinct types of hydrographic properties, besides this region is the main ventilation window for the South Atlantic Subtropical Gyre. STMW 3 increase may be suggested due the increase of rings shed at Agulhas leakage, which is likely because of the poleward shifting of Southern Hemisphere westerlies. (Biaoch et al., 2009). Formation regions for STMW 1 and STMW 3 suggest that, especially the formation

region of STMW 3, which covers partially the pathway of Agulhas Leakage at South Atlantic (Biaستoch et al., 2009). As it is formed at southeastern Pacific, SAMW decrease on its contribution anomalies may be suggested by ENSO occurrences through the years passed by. Also, as Naveira Garabato et al. (2009) suggested, SAMW underwent to cooling and freshening of its waters from 1990 to 2005, noticed on the variability trends.

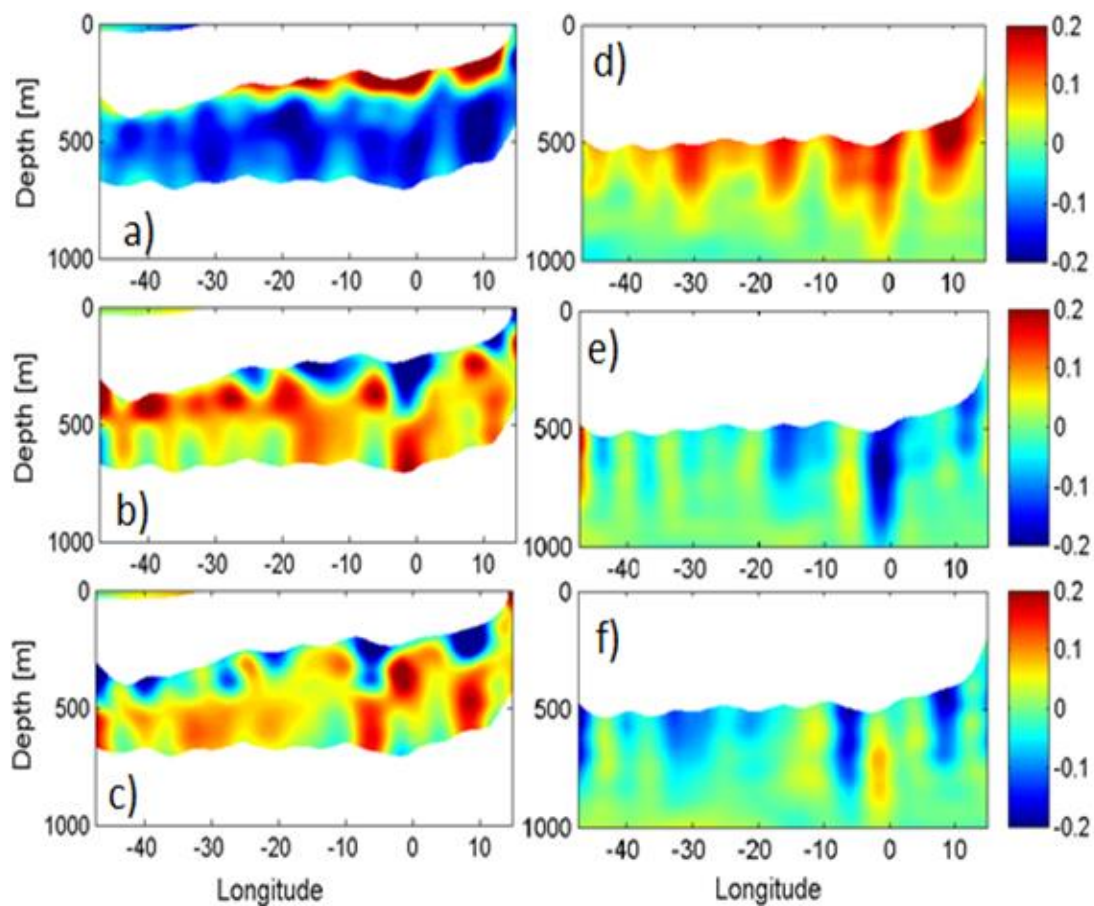


Figure 3.12 – Contribution anomalies at WOCE A10 section for STMW 3 at a) 1993, b) 2003, c) 2011 and SAMW at d) 1993, e) 2003 and f) 2011.

4. Summary and Conclusions

We infer here about the detailed distribution of South Atlantic Mode Waters varieties. STMW 1 extends almost in its totality on the tropical band of South Atlantic, with its highest contributions near the surface. At 200 dbar, it restricts to the western side of the basin, suggesting that this mode water sinks westwards, as it is advected by the Benguela Current and a returning branch of the Brazil Current recirculation (e.g. Stramma & England, 1999). The distribution of STMW 2 was first documented and strictly occurring southeast of the South Atlantic basin, near its formation region at Brazil-Malvinas confluence (Provost et al. 1999). STMW 2 appearance near Equator may be due some other water mass which has similar properties that have been resolved by OMP. However, when Poole & Tomczak (1999) made their water masses separation, this region was filled with WSACW at 300 dbar and with ESACW at 500 dbar, whereas here STMW 2 appears at this region from 100 to 500 dbar. STMW 3 at surface is restricted to its formation region near Agulhas Leakage and it spreads as it gets deeper. The pathway of Agulhas Leakage appears to be well marked by this mode water, even in depth, suggesting that Indian Waters play an important role on central and intermediate South Atlantic water masses formation. However, further investigation is needed regarding this issue. SAMW at lower pressure levels is restricted to the SAF and the more pressure increases it gets more pronounced. It also comes up at the north portion at the gyre, resulting from Ekman Pumping.

STMW 1 appears to be decreasing its contributions. As we can see by looking at the contribution anomalies maps, in 1993 it has high anomalies values and they get weaker as the years go by, with small increase displayed by mesoscale features. As it stands right below surface, strong variability associated with air-sea interaction may be related. STMW 2 shows the opposite, getting stronger with the years, especially on the

bottom and eastern regions. STMW 3 displays a high increase on its contributions. The increase of rings shed at the Agulhas Leakage seems to influence this. SAMW is displaying decreasing of their contribution, which can be related to ENSO occurrences at Pacific Ocean, where this mode waters originates.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This study is a contribution of the Brazilian High Latitudes Oceanography Group (GOAL, www.goal.furg.br) through the project “*Estudos Avançados de Médias e Altas Latitudes*” (CAPES n° 23038.001421/2014-30). GOAL has been funded by 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 grants n° 550370/2002-1; 520189/2006-0; 556848/2009-8; 405869/2013-4). A.G.Q de Souza acknowledges financial support received from the CAPES Foundation.

4. Conclusões

Neste trabalho foram inferidos detalhes sobre a distribuição das águas-fonte das águas centrais do oceano Atlântico Sul, complementando estudos prévios sobre *Águas Modais* (e.g. McCartney, 1977; Provost et al., 1999; McCarthy & Talley, 1999; Hanawa & Talley, 2001; Sato & Polito, 2014) ou águas centrais e intermediárias (e.g. Poole & Tomczak, 1999; Holte & Talley, 2013).

A STMW 1 se estende quase que em sua totalidade na região tropical do Atlântico Sul com suas maiores contribuições em subsuperfície. Conforme vamos aumentamos a profundidade, a STMW 1 vai se restringindo apenas a porção oeste do Atlântico Sul, sugerindo que esta *Água Modal* afunda na direção oeste, já que é advectada pela Corrente de Benguela e por um braço da recirculação da Corrente do Brasil (Stramma & England, 1999). A distribuição da STMW 2 fora documentada primeiramente como sendo apenas na região da Confluência Brasil-Malvinas (Provost et al. 1999). A aparição de STMW 2 na região equatorial pode ser explicada devido alguma outra massa de água com propriedades semelhantes ter sido resolvida pelo OMP. Entretanto, Poole & Tomczak (1999) quando fizeram a separação das águas da termoclina do Atlântico Sul, encontraram a região equatorial com alta contribuição de WSACW a 300 dbar, enquanto que STMW 2 aparece nessa região ocupando um espaço menor e níveis de profundidade entre 100 e 500 dbar. A STMW 3, em superfície, se restringe a região próxima do vazamento das Agulhas e se espalha conforme a profundidade aumenta. O caminho dos vórtices liberados pelo vazamento das Agulhas parece ser bem marcado por esta *Água Modal*, até em profundidade, sugerindo que águas do ocean Índico desempenham um papel importante na formação das águas centrais e intermediárias do Atlântico Sul. A SAMW próxima da superfície está restrita a uma zona latitudinal próxima da SAF, ficando mais pronunciada conforme a

profundidade aumenta, desaparece no meio do giro e volta a aparecer próxima da região equatorial, devido bombeamento de Ekman.

A STMW 1 apresenta diminuição nas suas anomalias de contribuição. Conforme observado nos mapas de anomalia de contribuição, em 1993, a STMW 1 apresentava valores positivos, que vão se tornando menores e negativos com o passar dos anos. Por ser uma água que permanece muito próximo da superfície, STMW 1 pode sofrer alta variabilidade devido a forte interação ar-mar. A STMW 2 mostra o oposto, com seus valores de anomalias de contribuição ficando positivos com o passar do tempo. A STMW 3 apresenta um forte aumento em suas anomalias de contribuição, que pode ser explicado devido o aumento no número de anéis liberados pelo vazamento das Agulhas. A diminuição das anomalias de contribuição da SAMW podem estar relacionadas com as ocorrências do ENSO no oceano Pacífico, onde esta *Água Modal* se forma.

Estudos complementares, a respeito das águas centrais e intermediárias no Atlântico Sul, são incentivados. Principalmente, para responder sobre a quantificação das massas de águas provenientes do oceano Índico na contribuição da mistura com certas variedades modais no oceano Atlântico Sul (e.g. STMW3), visto que há uma forte variabilidade de mesoescala marcada nesta massa de água.

5. Referências Bibliográficas

Aoki, S., Bindoff, N. L. & Church, J. A. (2005). Interdecadal water mass changes in the Southern Ocean between 308E and 1608E. *Geophysical Research Letters*, 32, L07607, doi:10.1029/2004GL022220.

Biastoch A, Böning C.W., Schwarzkopf F.U. & Lutjeharms J. R. E. (2009). Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature*;462(7272): 495–498. doi: 10.1038/nature08519. pmid:19940923

Budillon, G., Pacciaroni, M., Cozzi, S., Rivaro, P., Catalano, G., Ianni, C. & Cantoni, C. (2003). An optimum multiparameter mixing analysis of the shelf waters in the Ross Sea. *Antarctic Science*, 15, 105-118.

Dong, S., Hautala, S. L. & Kelly, K. A. (2007). Interannual variations in upper-ocean heat content and heat transport convergence in the western North Atlantic, *Journal of Physical Oceanography*, 37(11), 2682–2697.

Garzoli, S. L. & Matano, R. (2010). The South and the Atlantic Meridional Overtuning Circulation. *Deep-Sea Research II*, 58, 1837–1847.

Gordon, A. L. (1981). South Atlantic thermocline ventilation. *Deep-Sea Research*, 28^a, 1239-1264.

Gordon, A. L. (1989) Brazil-Malvinas Confluence (1984). *Deep Sea Research, Part A*, 36, 359-384.

Gordon, A. L., Lutjeharms, J. R. & Gruendlingh M. L. (1987). Stratification and circulation at the Agulhas Retroflection, *Deep Sea Research, Part A*, 34(4), 565–599.

Hanawa, K. & Talley, L. D. (2001). Mode waters. Ocean Circulation and Climate, G. Siedler, J. Church, and J. Gould, Eds., *International Geophysical Series*, Vol. 77, Academic Press, 373–386.

Holte, J. & Talley, L. D. (2009). A new algorithm for finding mixed layer depths with applications to Argo data and Subantarctic mode water formation, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26(9), 1920–1939.

Holte, J., Gilson, J., Talley, L. D. & Roemmich, D. (2010). Argo Mixed Layers, Scripps Institution of Oceanography/University of California San Diego, San Diego, California

Holte, J.W., Talley, L. D., Chereskin, T. K. & Sloyan, B. M. (2012). The role of air-sea fluxes in Subantarctic Mode Water formation. *Journal of Geophysical Research*, 117, C03040, doi:1029/2011JC007798.

Holte, J. W., L. D. Talley, Chereskin, T. K. & Sloyan, B. M. (2013). Subantarctic mode water in the southeast Pacific: Effect of exchange across the Subantarctic Front. *Journal of Geophysical Research*, 118, doi:10.1002/jgrc.20144, 15 pp.

- Karstensen, J. & Quadfasel, D. (2002). Formation of southern hemisphere thermocline waters: Water mass conversion and subduction, *Journal of Physical Oceanography*, 32, 3020–3038.
- Leffanue, H. & Tomczak, M. (2004). Using OMP analysis to observe temporal variability in water mass distribution. *Journal of Marine Research*, 48, 3-14.
- Maamaatuaiahutapu, K., Gargon, V., Provost, C., Boulahdid, M. & Osiroff A. P. (1992). Brazil-Malvinas Confluence: Water mass composition, *Journal of Geophysical Research*, 97, 9493-9505.
- Maamaatuaiahutapu, K., Gargon, V., Provost, C., Boulahdid, M. & Bianchi, A. A. (1994). Spring and winter water mass composition in the Brazil-Malvinas Confluence. *Journal of Marine Research*, 52, 397-426.
- Maamaatuaiahutapu, K., Provost, C., Andrié, C. & Vigan, X. (1994). Origin and ages of mode waters in the Brazil-Malvinas Confluence region during austral winter, *Journal of Geophysical Research*, this issue.
- Mamayev, O.I. (1975). Temperature-Salinity Analysis of World Ocean Waters. *Elsevier Scientific Publication*, Amsterdam, 374 pp.
- Masuzawa, J. (1969). Subtropical Mode Water, *Deep Sea Research*, 16, 463-472.
- McCartney, M. S. (1977). Subantarctic mode water. A Voyage of Discovery: George Deacon 70th Anniversary Volume, M. Angel, Ed., Pergamon, 103–119.
- McCartney, M. S. (1982). The subtropical recirculation of Mode Waters, *Journal of Marine Research*, 40, suppl., 427-464.
- Naveira Garabato, Alberto C., Jullion, Loïc, Stevens, David P., Heywood, Karen J. & King, Brian A. (2009). Variability of Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water in the Drake Passage during the Late-Twentieth and Early-Twenty-First Centuries. *Journal of Climate*, 22, (13), 3661-3688. (doi: 10.1175/2009JCLI2621.1).
- Orsi, A. H., Whitworth III, T. & Nowlin Jr, W. D. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Research*, 42, 641–673.
- Peterson, R. G. & Stramma, L. (1991). Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanography*, 26, 1-73.
- Piola, A. R. & Gordon, A. (1989). Intermediate waters in the southwest South Atlantic. *Deep-Sea Research*, 36, 1–16.
- Poole, P. & Tomczak, M. (1999). Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the Atlantic Ocean thermocline. *Deep-Sea Research I*, 46, 1895-1921.

- Provost, C., Gana, S., Garçon, V., Maamaatuaiahutapu, K. & England, M. (1995). Hydrographic conditions in the Brazil-Malvinas Confluence during austral summer 1990, *Journal of Geophysical Research*, 100(C6), 10,655–10,678.
- Provost, C., Escoffier, C., Maamaatuaiahutapu, K., Kartavtseff, A., & Garçon, V. (1999). Subtropical mode waters in the South Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 104(C9), 21,033–21,049.
- Qiu, B. & Chen, S. (2006). Decadal variability in the formation of the North Pacific Subtropical Mode Water: Oceanic versus atmospheric control, *Journal of Physical Oceanography*, 36(7), 1365–1380.
- Roemmich, D. & Cornuelle, B. (1992). The subtropical mode waters of the South Pacific Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, 22(10), 1178–1187.
- Sato, O. T. & Polito, P. S. (2014). Observation of South Atlantic subtropical mode waters with Argo profiling float data, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 119, doi:10.1002/2013JC009438.
- Siedler, G., Muller, T. J., Onken, R., Arhan, M., Mercier, H., King, B. A. & Saunders, P. M. (1996). The zonal WOCE sections in the South Atlantic, in *The South Atlantic: Present and Past Circulation*, edited by G. Wefer et al., 83-104.
- Sloyan, B., Talley, L. D., Chereskin, T., Fine, R. & Holte, J. (2010). Antarctic Intermediate water and Subantarctic Mode water formation in the southeast Pacific: the role of turbulent mixing. *Journal of Physical Oceanography*, 40, 1558---1574.
- Sprintall, J. (2008). Long-term trends and interannual variability of temperature in Drake Passage. *Progress in Oceanography*, 77, 316–330.
- Stramma, L. & England, M. (1999). On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 104(C9), 20,863–20,883.
- Suga, T. & Talley, L. D. (1995). Antarctic Intermediate Water circulation in tropical and subtropical South Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 100 (7), 13,441-13,453.
- Talley, L. D. (1996). Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic. *The South Atlantic: Present and Past Circulation*, G. Wefer et al., Eds., Springer-Verlag, 219–238.
- Tomczak, M. (1981). A multi-parameter extension of temperature/salinity diagram techniques for the analysis of non-isopycnal mixing. *Progress in Oceanography*, 10, 147-171.
- Tomczak, M. (1999). Some historical, theoretical and applied aspects of quantitative water mass analysis. *Journal of Marine Research*, (57), 275-303.
- Tomczak, M. & Godfrey, J. S. (1994). *Regional Oceanography: an Introduction*. Pergamon. Oxford. 377pp.

Tomczak, M. & Large, D.G.B. (1989). Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 94, 16.141-16.149.

Tsuchiya, M., Talley, L. D. & McCartney, M. S. (1994). Water mass distributions in the western South Atlantic, A section from South Georgia Island (54°S) northward across the equator, *Journal of Marine Research*, 52, 55-81.

Venegas, S. A., Mysak, L. A. & Straub, D. N. (1996). Evidence for interannual and interdecadal climate variability in the South Atlantic, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 2673–2676.

Venegas, S. A., Mysak, L. A. & Straub, D. N. (1997). Atmosphere-ocean coupled variability in the South Atlantic, *J. Clim.*, 10, 2904–2920.

Venegas, S. A., Mysak, L. A. & Straub, D. N. (1998). An interdecadal climate cycle in the South Atlantic Ocean and its link to other ocean basins, *J. Geophys. Res.*, 103, 24,723–24,736.

Worthington, L. V. (1959). The 18 degree water in the Sargasso Sea, *Deep Sea Research*, 5(2–4), 297–305.

You, Y. (2002). Quantitative estimate of Antarctic Intermediate Water contributions from the Drake Passage and southwest Indian Ocean to the South Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, 107, 3031, doi:10.1029/2001JC000880.