

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

ANA LÍGIA FAVARO DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DOS TRANSPORTES DE VOLUME, CALOR E SAL
PELA PASSAGEM DE DRAKE E PELA RETROFLEXÃO DA
CORRENTE DAS AGULHAS NA CÉLULA DE REVOLVIMENTO
MERIDIONAL DO ATLÂNTICO SUL**

Florianópolis

2014

ANA LÍGIA FAVARO DOS SANTOS

**INFLUÊNCIA DOS TRANSPORTES DE VOLUME, CALOR E SAL
PELA PASSAGEM DE DRAKE E PELA RETROFLEXÃO DA
CORRENTE DAS AGULHAS NA CÉLULA DE REVOLVIMENTO
MERIDIONAL DO ATLÂNTICO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Santa Catarina
como exigência parcial para obtenção do
título de Bacharel em Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Härter
Fetter Filho

Florianópolis, SC

2014

ANA LÍGIA FAVARO DOS SANTOS

INFLUÊNCIA DOS TRANSPORTES DE VOLUME, CALOR E SAL PELA
PASSAGEM DE DRAKE E PELA RETROFLEXÃO DA CORRENTE DAS AGULHAS
NA CÉLULA DE REVOLVIMENTO MERIDIONAL DO ATLÂNTICO SUL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Universidade Federal de Santa Catarina
como exigência parcial para obtenção do
título de Bacharel em Oceanografia.

Aprovado em __/__/2014

BANCA EXAMINADORA

Orientador Professor Dr. Antonio Fernando Härter Fetter Filho – UFSC

Professora Dra. Regina Rodrigues Rodrigues – UFSC

Professor Dr. Felipe Mendonça Pimenta – UFSC

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Vera e Francisco, por tudo, mas principalmente por me ajudarem de toda e qualquer forma a conquistar meus objetivos. A toda minha família pelo amor e carinho sempre.

Ao Antonio Fetter pelas ajudas, explicações e orientação. Aos membros da banca Regina Rodrigues e Felipe Pimenta por terem aceitado o convite.

Aos meus amigos e colegas do curso pelas ajudas, conversas e momentos divertidos que me proporcionaram durante a graduação.

Aos meus amigos de fora do curso pela amizade, mesmo a distância.

Aos amigos que moraram, ou dormiam em casa, ou que me acolhiam em suas casas, enfim, aqueles que provam com a convivência o melhor que se pode ter de uma amizade verdadeira.

E ao Gabriel por tudo, mesmo tão distante, sempre esteve por perto.

Meu sincero muito obrigada a todos vocês.

RESUMO

A AMOC (Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico) é responsável pelo transporte de propriedades para as outras bacias oceânicas na qual está conectada através da Passagem de Drake e da Retroflexão da Corrente das Agulhas. Este estudo investiga a influência destas duas rotas na variabilidade AMOC do Atlântico Sul (SAMOC). Os resultados obtidos utilizando o sistema de reanálise do SODA (Simple Ocean Data Assimilation) mostram a descrição da circulação e massas d'águas, além da estimativa dos transportes em cada seção de entrada e na AMOC. Foram obtidas séries temporais onde as variabilidades decenal e inter-anual foram constatadas. A força AMOC apresentou tendência positiva assim como a série do transporte de calor no Sul da África, além dos mesmos modos de oscilações anuais e semi-anuais. As séries dos transportes de volume e sal de Drake e sul da África apresentaram valores muito correlacionados em todas as análises devido a influência da circulação que rege o oceano Austral. Os transportes também foram calculados ao longo de densidades neutras nas quais constataram a contribuição significativa das águas de superfície e intermediárias da seção sul da África e das águas intermediárias e profundas da seção de Drake para a variação da SAMOC. O sistema de circulação da MOC está sob influência de diversos fatores que a regem, sendo neste trabalho abordado apenas os fluxos de entrada e saída de volume, calor e sal em três seções de controle, a Passagem de Drake, 18,25°L e 34,25°S.

Palavras-chave: Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico; Oceano Austral; Passagem de Drake; Corrente das Agulhas;

ABSTRACT

The Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) is a crucial component of the oceanic inter-basin exchange, through the Drake Passage and the Agulhas Retroflexion System. This study investigates the influence of these routes on the SAMOC (South Atlantic Meridional Overturning Circulation). Results obtained from SODA (Simple Ocean Data Assimilation) reanalysis are used to describe the circulation and estimate the transports mass, salt and heat across control sections. Decadal and interannual variability were obtained through time series analyses which reveals a strengthening of AMOC and heat transport through the control section of $34,25^{\circ}\text{S}$. The mass and salt transports through the Drake Passage and 20°E show a high correlation, once the transports of those two sections are under the Southern Ocean circulation dynamics. Transports were also calculated on neutral density layers, these analyses shows a significant contribution of surface and intermediate waters, south of Africa and intermediate and deep waters, at the Drake Passage to the SAMOC variability. The AMOC circulation is affected by many factors, however, in these work only the input and output fluxes of mass, salt and heat through the Drake Passage, 18.25°E and 34.25°S are analyzed.

Keyword: Atlantic Meridional Overturning Circulation; Southern Ocean; Drake Passage; Agulhas System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Campo médio de velocidades geostróficas, médias da superfície até 381 m de profundidade.	24
Figura 2. Campo médio de velocidades geostróficas, médias de 465m a 1378m, representando as águas intermediárias.....	25
Figura 3. Seção da velocidade média meridional (m/s) no perfil de 34,25°S. As linhas indicam as isocpnais com os valores sobre elas.....	26
Figura 4. Seção sul da África (18,25°L) da temperatura potencial (°C) e as linhas representando as superfícies de densidade neutra. As águas de 13°C estão localizadas próximas aos 500 m de profundidade.....	27
Figura 5. Seção sul da África (18,25°L) da salinidade e linhas representando as superfícies de densidade neutra, onde nota-se a intrusão da AIA, a alta salinidade da Corrente das Agulhas e as massas d'águas que compõe a CCA, APCS, APCI..	28
Figura 6. Média do campo médio de velocidades geostróficas, médias de 1625 m a 3375 m, representando as águas profundas.	29
Figura 7. Localização das principais massas d'água na seção da salinidade em 65,25°O, representando a Passagem de Drake. APCS e APCI que compõe a CCA, AIA e AMS, menos densa próxima a superfície.....	30
Figura 8. Média do campo médio de velocidades geostróficas, médias de 3625 m ao fundo (5375 m), representando as águas de fundo.....	31
Figura 9. Representação gráfica dos transportes médios totais de volume, calor e sal em cada uma das seções de estudos definidas. Eixo das coordenadas estão as latitudes e das abcissas as longitudes.	40
Figura 10. Transporte de Volume integrado pelas profundidades. Linhas pontilhadas recortam a seção em três para posteriores análises da influência dos transportes pelas fronteiras oeste e leste.	42
Figura 11. Transportes de calor (a) e sal (b) integrados na vertical. Valores positivos são transportes com direção ao norte e negativos, para o sul na seção de 34,25°S.	43
Figura 12. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c) integrados zonalmente. Valores positivos tem o fluxo em direção ao norte e valores negativos, fluxos em direção ao sul na seção de 34,25°S.....	43

Figura 13. Velocidade meridional integrada nas longitudes (em vermelho) e transporte de volume acumulado da superfície ao fundo (em preto). Valores positivos tem direção norte e negativos direção sul.	45
Figura 14. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c) integrados nas latitudes na seção de 65,25°O	46
Figura 15. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c) integrados nas profundidade da seção de 65,25°O	46
Figura 16. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c), respectivamente, integrado nas profundidade da seção de 18,25°L.	47
Figura 17. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c), respectivamente, integrado nas latitudes na seção de 18,25°L.....	47
Figura 18. Série temporal referente a Força da AMOC em 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.....	48
Figura 19. Série temporal do transporte de volume total da latitude de 34,25°S. A linha vermelha representa a tendência quadrática da série.	49
Figura 20. Série temporal do transporte de calor total da latitude de 34,25°S. A linha vermelha representa a tendência quadrática da série.	50
Figura 21. Série temporal do transporte de sal total da latitude de 34,25°S. A linha vermelha representa a tendência quadrática da série.	50
Figura 22. Série temporal referente ao transporte de volume na região do contorno oeste, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.	51
Figura 23. Série temporal referente ao transporte de volume na região interior de 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.	52
Figura 24. Série temporal referente ao transporte de volume na região de contorno leste de 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.	52
Figura 25. Gráfico de dispersão que representa a correlação da força da AMOC com o transporte de calor meridional de todos os tempos.	53
Figura 26. Série temporal referente ao transporte de calor na região de contorno oeste de 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.	54
Figura 27. Série temporal referente ao transporte de calor na região interior a 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.	55

Figura 28. Série temporal referente ao transporte de calor no contorno oeste a 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série	55
Figura 29. Série temporal referente ao transporte de sal na região do contorno oeste, a 34,25°S. A linha vermelha indica a tendência quadrática da série.....	56
Figura 30. Série temporal referente ao transporte de sal na região do interior, a 34,25°S. A linha vermelha indica a tendência quadrática da série.....	57
Figura 31. Série temporal referente ao transporte de sal na região do contorno leste, a 34,25°S. A linha vermelha indica a tendência quadrática da série.....	58
Figura 32. Série temporal do transporte de Volume na Passagem de Drake em 65,25°O. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.	59
Figura 33. Série temporal do transporte de Calor na Passagem de Drake em 65,25°O. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.	59
Figura 34. Série temporal do transporte de Sal na Passagem de Drake em 65,25°O. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.	60
Figura 35. Série temporal do transporte de volume na seção ao sul da África, em 18,25°L. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.	61
Figura 36. Série temporal do transporte de calor na seção ao sul da África, em 18,25°L. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.	62
Figura 37. Série temporal do transporte de sal na seção ao sul da África, em 18,25°L. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.	62
Figura 38. Estimativa da densidade espectral da séries temporal da força da AMOC.....	65
Figura 39. Estimativa da densidade espectral da séries temporais dos transportes de volume nas seções de 34,25°S, sul da África e na Passagem de Drake.....	65
Figura 40. Estimativa da densidade espectral da séries temporais dos transportes de calor nas seções de 34,25°S, sul da África e na Passagem de Drake.....	66
Figura 41. Estimativa da densidade espectral da séries temporais dos transportes de sal nas seções de 34,25°S, sul da África e na Passagem de Drake.....	67
Figura 42. Modelo de regressão da série temporal da força da AMOC sem tendência quadrática.....	67
Figura 43. Modelo de regressão da série temporal do transporte de volume sem tendência quadrática em 34,25°S.....	68

Figura 44. Modelo de regressão da série temporal do transporte de calor sem tendência quadrática em 34,25°S.....	68
Figura 45. Modelo de regressão da série temporal do transporte de sal sem tendência quadrática em 34,25°S.....	69
Figura 46. Modelo de regressão de 1 ano da série temporal do transporte de volume sem tendência quadrática na seção da Passagem de Drake.....	69
Figura 47. Modelo de regressão de 1 ano da série temporal do transporte de calor sem tendência quadrática na seção da Passagem de Drake.....	70
Figura 48. Modelo de regressão (em vermelho) de 1 ano da série temporal do transporte de sal sem tendência quadrática (em preto) na seção da Passagem de Drake.....	70
Figura 49. Modelo de regressão pra 1 ano da série temporal do transporte de volume sem tendência quadrática na seção ao sul da Africa.....	71
Figura 50. Modelo de regressão pra 1 ano da série temporal do transporte de calor sem tendência quadrática na seção ao sul da África.....	71
Figura 51. Modelo de regressão pra 1 ano da série temporal do transporte de sal sem tendência quadrática na seção ao sul da África.....	72
Figura 52. Transporte de volume médio em 34,25°S, somado em cada superfície de mesma densidade média correspondente.....	75
Figura 53. Transporte de volume médio em 65,25°O, somado em cada superfície de mesma densidade média correnpondente.....	76
Figura 54. Transporte de volume médio em 18,25°L, somado em cada superfície de mesma densidade média correspondente.....	77
Figura 55. Transporte de calor médio em 18,25°L, somado em cada superfície de mesma densidade média correspondente.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Níveis verticais do sistema SODA e suas respectivas profundidades.	34
Tabela 2. Coordenadas de cada seção.	35
Tabela 3. Correlações entre os transportes de volume (a), calor (b) e sal (c) em cada seção. Os valores em azul apresentam significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos.	64
Tabela 4. Resultados obtidos a partir do modelo de regressão harmônica. ...	72
Tabela 5. Correlação dos transportes de volume totais em cada intervalo de densidade neutra pré-definida. Os valores em azul apresentaram significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos.	79
Tabela 6. Correlação dos transportes de calor somados em cada intervalo de densidade neutra pré-definida. Os valores em azul apresentaram significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos.	79
Tabela 7. Correlação dos transportes de sal somados em cada intervalo de densidade neutra pré-definida. Os valores em azul apresentaram significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos.	79

LISTA DE ABREVIações

20Crv2	20th Century Atmospheric Reanalysis Product
AAF	Água de Fundo Antártica
ACAS	Água Central do Atlântico Sul
AIA	Água Intermediária Antártica
AMOC	Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico
AMS	Águas Modais Subtropicais
APAN	Água Profunda do Atlântico Norte
APC	Água Profunda Circumpolar
APCI	Água Profunda Circumpolar Inferior
APCS	Água Profunda Circumpolar Superior
APRDC	Ásia-Pacific Data Research Center
AT	Água Tropical
CA	Corrente das Agulhas
CB	Corrente do Brasil
Cbe	Corrente da Benguela
CBM	Confluência Brasil-Malvinas
CCA	Corrente Circumpolar Antártica
CTD	Conductivity-Temperature-Depth
FP	Frente Polar
GW	Giro de Weddel
MOC	Célula de Revolvimento Meridional

OCCAM	Ocean Circulation and Climate Advanced Model
POCM	Parallel Ocean Circulation Model
POP	Parallel Ocean Program
SACCF	Frente Circumpolar Antártica Sul
SAF	Frente Subantártica
SAM	Southern Annular Mode
SAMOC	South Atlantic Meridional Overturning Circulation
SODA	Simple Ocean Data Assimilation
STF	Frente Subtropical
TCM	Transporte de Calor Meridional
VA	Vazamento das Agulhas
WOCE	World Ocean Circulation Experiment
XBT	Batitermógrafo Descartável

LISTA DE SÍMBOLOS

A	amplitude
an	anual
C	Celsius
cos	cosseno
Cp	calor específico
f	frequência
γ'	densidade neutra
J	Joule
Kg	quilograma
m	metros
P	período
PSU	Practical Salinity Units
PW	petawatts ($=10^{15}$ Watt)
s	segundo
sa	semi-anual
sen	seno
Sv	Sverdrups ($=10^6$ m ³ /s)
T	temperatura
t	tempo
tan	tangente
Ton	tonelada

v	velocidade
z	profundidade
ρ	densidade
θ	deslocamento da fase

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO.....	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIACÕES.....	12
LISTA DE SÍMBOLOS.....	14
1. INTRODUÇÃO	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1. Circulação Oceânica e Massas d'águas no Atlântico Sul.....	23
2.2. Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico	31
3. OBJETIVOS	33
3.1. Objetivo Geral.....	33
3.2. Objetivos específicos.....	33
4. METODOLOGIA	34
4.1. SODA	34
4.2. Cálculo dos Transportes.....	35
4.3. Força da AMOC.....	36
4.4. Densidade Neutra.....	37
4.5. Análise das Séries Temporais.....	37
4.5.1. Regressão Linear.....	37
4.5.1.1. Modelos Harmônicos.....	38
4.5.2. Densidade Espectral.....	39
4.5.3. Técnica de Correlação.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40

5.1. Média Temporal.....	40
5.1.1. Transportes Totais	40
5.1.2 Transportes Integrados	42
5.2. Séries Temporais.....	48
5.2.1. Seção 34,25°S	48
5.2.2. Passagem de Drake.....	58
5.2.3. Sul da África.....	60
5.3. Densidade Espectral.....	64
5.4. Modelos de Regressão Linear	67
5.4.1. 34,25°S	67
5.4.2. Passagem de Drake.....	69
5.4.3. Sul da África.....	70
5.5. Superfícies de Densidade Neutra.....	74
5.5.1. Média Temporal	74
5.5.2. Séries Temporais	78
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

1. INTRODUÇÃO

A Célula de Revolvimento Meridional (MOC) é uma importante componente da circulação oceânica global. Massas d'água são geralmente formadas nas latitudes mais altas, onde há grande perda de calor do oceano para a atmosfera e seguem na direção do equador através da célula de circulação profunda. De forma compensatória, a célula de circulação superficial torna-se responsável por transportar o calor da região equatorial em direção aos polos. A MOC é a composição destas duas células de circulação.

A MOC é dividida para estudos mais específicos em cada oceano, sendo a do Atlântico Sul (SAMOC) diferenciada devido a sua importância para o balanço de energia dos oceanos. O oceano Atlântico Sul possui um padrão de circulação único, onde águas quentes fluem no sentido norte enquanto águas frias fluem em direção aos polos, resultando em um fluxo de calor no sentido do Equador (GARZOLI; MATANO, 2011). Além disso, esta bacia oceânica está ligada a todas as demais, não sendo apenas um meio de comunicação, mas sim uma bacia ativa que transporta e troca massa e propriedades com os oceanos adjacentes.

No Atlântico, a circulação intensa profunda é feita pela Água Profunda do Atlântico Norte que carrega águas frias e salinas do Atlântico Norte até o oceano Austral. Duas rotas principais de retorno destas águas para o Atlântico Sul são formadas através das conexões entre os oceanos: águas frias intermediárias e modais pela Passagem de Drake (rota fria) e águas quentes da termoclina através da retroflexão da Corrente das Agulhas (rota quente) (GORDON, 1986).

Ainda é discutido o quanto das águas transportadas para o norte tem origem no Pacífico Sul pela Passagem de Drake e no Oceano Índico pela Região da retroflexão da Agulhas e influenciam na circulação da AMOC (DONG; GARZOLI; BARINGER, 2011), sendo que a segunda tem sido mais estudada nos últimos anos (BIASTOCH; LUTJEHARMS, 2008; BEAL et al., 2011; BIASTOCH; BÖNING, 2013). A retroflexão da Corrente das Agulhas faz com que parte das águas desta corrente entre no Oceano Atlântico, é o chamado Vazamento das Agulhas (VA).

Projeções em modelos climáticos para o século 21, preveem o aumento deste vazamento devido a mudança no cisalhamento dos ventos de oeste na região austral ocasionando a migração da Frente Subtropical para o sul. Uma maior entrada de águas pelo vazamento das Agulhas faz com que a circulação no Atlântico Sul se intensifique ocasionando a aceleração do degelo no Atlântico Norte e, conseqüentemente, o enfraquecimento da circulação local (BEAL et al., 2011). Portanto, as conseqüências não são apenas para a circulação regional em volta da África, mas também para a circulação adjacente entre as bacias e conseqüentemente para o clima global (BIASTOCH; BÖNING, 2013).

Desta forma, a AMOC vem sendo monitorada por diversos grupos de estudos, entre eles o programa internacional SAMOC (*South Atlantic Meridonal Overturning Circulation* http://www.aoml.noaa.gov/phod/SAMOC_international/index.php), o U.S. AMOC, programa com o mesmo intuito do Estados Unidos (<http://www.usclivar.org/amoc>) e o primeiro deles no Atlântico Norte RAPID-MOC (<http://www.rapid.ac.uk/rapidmoc/>). No entanto nenhum registro observacional é longo o suficiente para examinar a variabilidade na AMOC e seus fluxos e transportes em escala de tempo decadal ou maiores.

Além disso, modelos tem sido utilizados para o melhor entendimento do comportamento da MOC como CMIP3 (DRIJFHOUT; WEBER; SWALUW, 2010) e o POCM-4C (Parallel Ocean Circulation Model) por Garzoli e Matano (2011). Estes estudos estabelecem previsões do comportamento da AMOC e preveem mudanças significativas a partir do cenário atual (BEAL et al., 2011). Mesmo com os modelos sendo eficientes para simular a AMOC, é necessário manter medições e cálculos de transportes de toda a coluna d'água e de todas as bacias oceânicas para que haja uma melhora destes modelos e uma análise espaço-temporal maior.

Para reconstruir as mudanças físicas no clima dos oceanos, uma outra forma de obtenção de dados é a reanálise dos modelos de circulação oceânica. Este é um objeto aplicado para a melhoria e complementação destes modelos em estudos. Esta análise consiste em uma estimativa sequencial em que um modelo numérico regido por dados observacionais de forçantes na superfície dos oceanos, são usados para fornecer uma primeira estimativa do estado do oceano. Posteriormente, são corrigidos por dados observacionais (CARTON; GIESE, 2008). Por utilizar bases de

dados hidrográficos desde os mais antigos até os mais recentes, estes dados possuem uma extensa cobertura temporal que permite uma melhor análise das mudanças que ocorrem na MOC.

Para saber o que controla a longo prazo a variabilidade da AMOC, além de investigar os transportes de volume, calor e sal, é preciso estudo detalhado das massas d'água para quantificar o transporte que vem dos oceanos Pacífico e Índico. As trocas de propriedades entre bacias devem ser feitas a partir de densidades pré-determinadas para que seja feita a análise da transformação das massas de água que entram no oceano Atlântico, sendo possível saber a influência destas na variabilidade da AMOC (DONG, GARZOLI, BARINGER, 2011).

A dinâmica da MOC é observada a partir da análise de séries longas, decenais, onde é possível notar mecanismos responsáveis pela sua variabilidade natural ou de respostas a forçantes (WUNSCH; HEIMBACH, 2013). Sua evolução permite entender futuras mudanças e impactos, que hoje são motivos de preocupação de toda comunidade científica (SROKOSZ et al., 2012). Porém, nenhum dado observacional nos dias de hoje é longo o suficiente para analisar a variação da AMOC e seus transportes associados em escalas de tempo longas (DONG, GARZOLI, BARINGER, 2011).

Contudo, dados do sistema de monitoramento RAPID-MOC, constataram variações interanuais significativas: sazonais, mensais e até semanais (MCCARTHY; FRAJKA-WILLIAMS, 2012; SEND; LANKHORST; KANZOW, 2011). Como não era esperada, esta variabilidade mais detalhada na AMOC do Atlântico Sul começou a ser estudada apenas mais recentemente (ANSORGE et al., 2014; MEINEN et al., 2013).

A maior parte dos estudos referentes à MOC está focado no Atlântico Norte, o que torna difícil o entendimento da célula de recirculação do Atlântico Sul, mesmo que esta seja região de trocas de propriedades, mistura e redistribuição pelos outros oceanos (DONG et al., 2009). As trocas entre os oceanos, assim como as variações nos transportes e fluxos da interação oceano-atmosfera irão reger as mudanças na MOC (SROKOSZ et al., 2012). Diante deste contexto, estudos no Atlântico Sul são necessários, principalmente a respeito do comportamento da AMOC pois são importantes para o entendimento e solução de questões globais.

O presente trabalho irá analisar os transportes de volume, calor e sal na AMOC, Passagem de Drake e no Sul da África utilizando os dados do sistema de reanálise SODA. Através destes transportes, irá investigar a existência de variações decenais e intranuais além de verificar os transportes ao longo de cada camada de densidade neutra. Com isso, será possível identificar as massas d'água que atuam nestas seções relacionando as propriedades trocadas no Atlântico Sul, a fim de analisar as variações da AMOC ao longo dos anos. A seção 2 é composta pelo referencial teórico das principais feições da área abordada; a seção 3 explicará os objetivos do estudo; a 4 a base de dados utilizada e a metodologia; na seção 5 os resultados são apresentados e discutidos. Por fim, na seção 6 estão as considerações finais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As águas dos oceanos movem-se continuamente carregando consigo grandes quantidades de calor, água doce e carbono, trocando essas propriedades com a atmosfera. Estas águas são movidas principalmente pela energia do Sol que move a circulação atmosférica, regida por ventos, por sua vez o balanço de calor e massa na superfície oceânica causa variações na temperatura e salinidade da água do mar.

A dinâmica deste sistema é movida pela diferença da insolação que chega na Terra, que faz com que as baixas latitudes percam energia para as altas latitudes, transferindo o calor através do movimento das águas, sempre buscando o equilíbrio termodinâmico. A habilidade dos oceanos de armazenar grandes quantidades de calor é explicada pela grande capacidade da água do mar, quando comparada com ar, além dos oceanos conectarem estas águas superficiais ao seu interior.

A energia da tensão de cisalhamento do vento é capaz de mudar a densidade superficial da água do mar. Os fluxos de calor trocados no limite entre oceano e atmosfera levam a mudanças nas temperaturas e salinidades dos oceanos. Este balanço é derivado da entrada e saída de água de acordo com o balanço evaporação-precipitação, além do derretimento ou congelamento de gelo nos polos. Se a camada superior torna-se mais densa que a camada abaixo desta, a instabilidade desta situação faz com que estas camadas superficiais afundem, gerando mistura. A circulação vertical regida por estas diferenças de densidades, causadas pelo resfriamento ou aquecimento, perda ou ganho de sal, regem a Circulação Termohalina.

Os termos Circulação Termohalina e Célula de Revolvimento Meridional (MOC) algumas vezes são usados como sinônimos, mas eles tem diferentes significados. A MOC é um termo mais descritivo e geográfico: é uma circulação simples nos planos meridional-vertical, explicado como uma função corrente de revolvimento (*overturning*). Este termo não se refere a nenhum mecanismo de direcionamento. Já a circulação termohalina é definida como um fluxo com mecanismos de direcionamento sendo eles três: (1) momentum transferido pelos

ventos de superfície, (2) aceleração da água por forçantes de maré e (3) forçante termohalina (KUHLBRODT; GRIESEL, 2007).

2.1. Circulação Oceânica e Massas d'águas no Atlântico Sul

Para o entendimento da célula de revolvimento bem como a estrutura da AMOC, campos médios das velocidades geostróficas no Atlântico Sul e Austral são apresentados a seguir. A velocidade geostrófica é uma importante componente que rege o movimento das propriedades nos oceanos (DONG; GARZOLI; BARINGER, 2011), mas é importante ressaltar que mesmo transportando as massas d'águas, elas não se alinham em uma profundidade geopotencial, nem a temperaturas, salinidades e pressão, mas sim em superfícies de densidade neutra (YOU, 2006). Uma explicação mais detalhada sobre densidade neutra pode ser encontrada na Seção 4.4.

O SODA permite uma boa visualização das principais correntes superficiais que regem a circulação local como mostra a Figura 1. É possível observar as águas do Pacífico atravessando a Passagem de Drake através da Corrente Circumpolar Antártica (CCA). Parte destas águas seguem pelo oceano Austral e circulam por toda região amostrada até o sul da África e seguem em torno de todo globo.

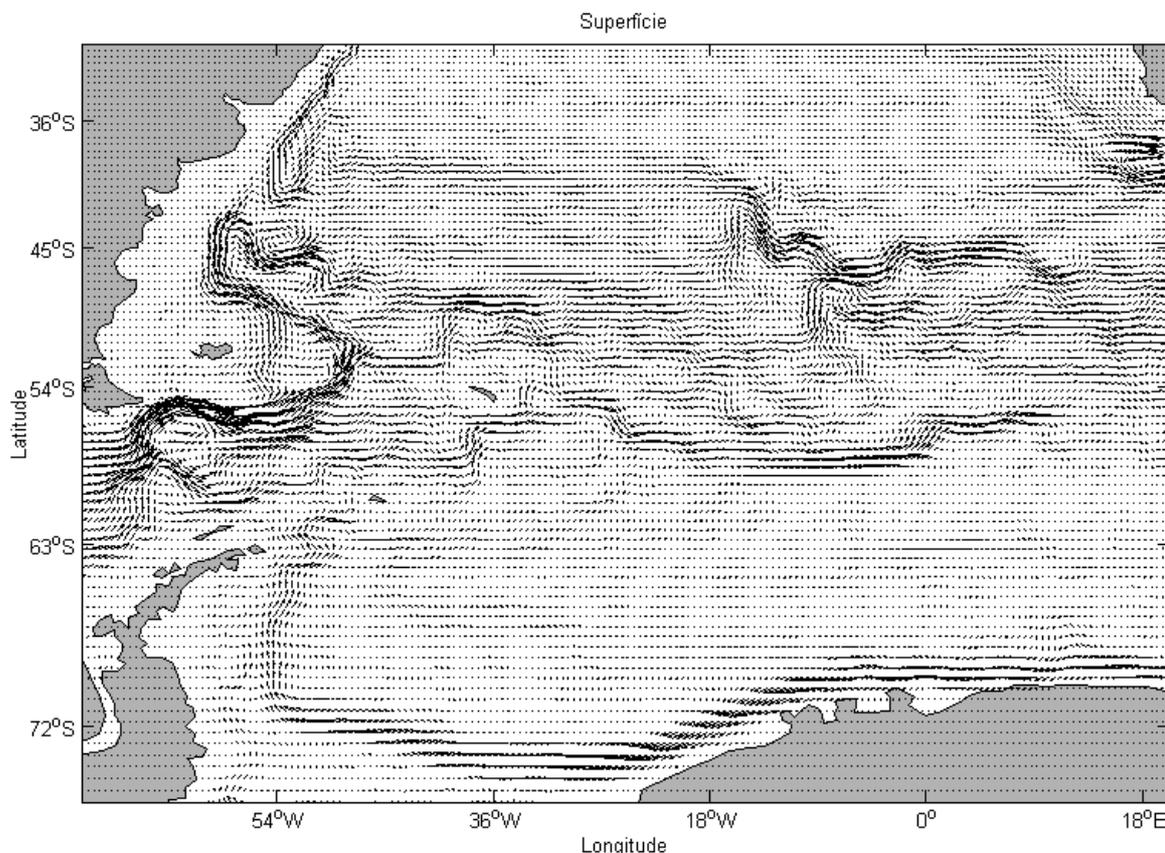


Figura 1. Campo médio de velocidades geostroficas, médias da superfície até 381 m de profundidade.

Outra porção segue sentido norte e chega próximo à Costa da América do Sul onde encontra a Confluência Brasil-Malvinas (CBM). Esta situa-se perto de 38°S, posição média do encontro da Corrente do Brasil (CB), também bem identificada na Figura 1, e é tida como a região chave onde há transferência de águas intermediárias subantárticas para as subtropicais (JULLION et al., 2010).

Na região leste as correntes da superfície representam bem a entrada destas águas oriundas da Corrente das Agulhas, do Oceano Índico, seguindo a costa do Sul da África para oeste. Este é o chamado Vazamento das Agulhas (VA) e flui logo acima da Retroflexão da Corrente das Agulhas, também representada nas Figuras 1 e 2, respectivamente, as águas superficiais e intermediárias, próximo à latitude de 38°S. A Corrente da Benguela (CBe) é a corrente de contorno leste do giro subtropical do Atlântico Sul e segue sentido norte, feições encontradas e descritas também por Stramma e England (1999).

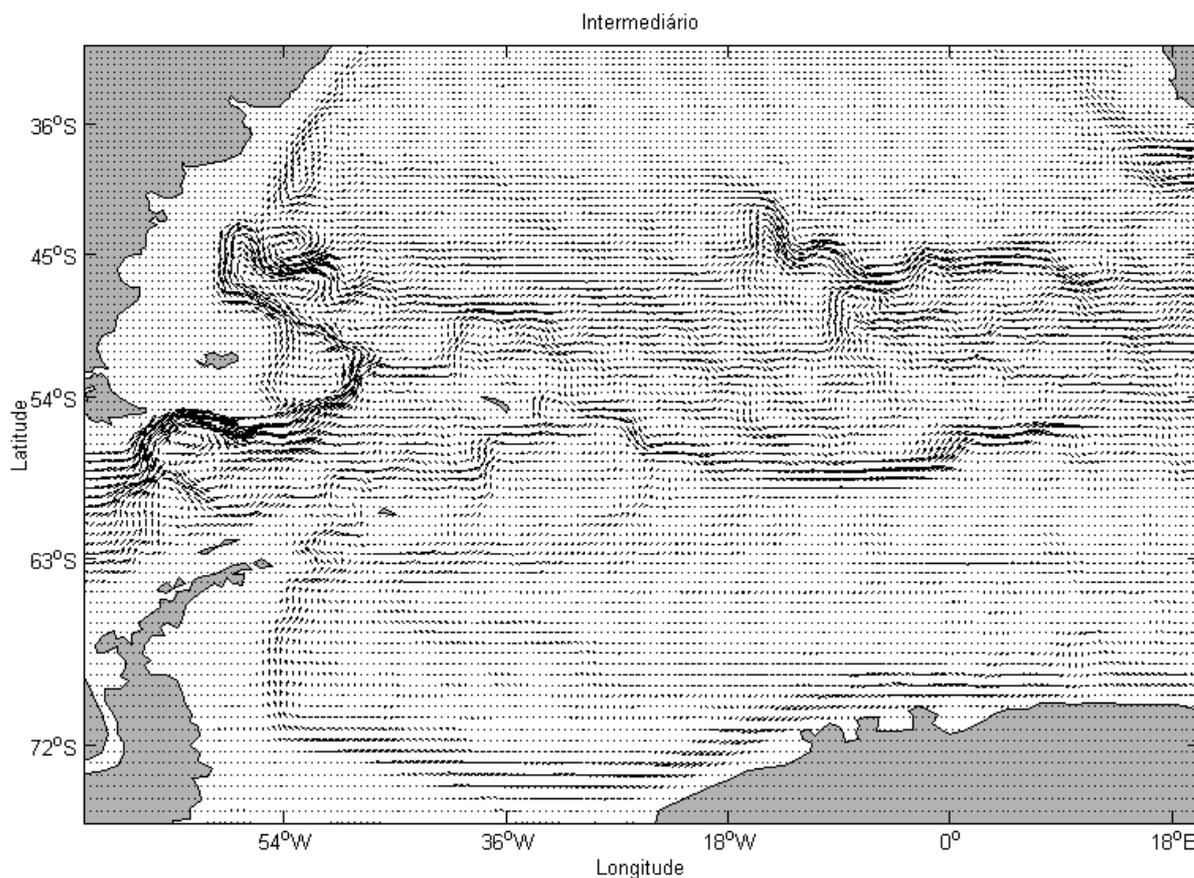


Figura 2. Campo médio de velocidades geostróficas, médias de 465m a 1378m, representando as águas intermediárias.

Para uma melhor visualização destas correntes, o perfil vertical da média temporal das velocidades meridionais segue na Figura 3, sobreposto a ele estão as camadas de densidade neutra, com os valores destacados em cada isopicnal. Em azul estão representadas as velocidades negativas representado pela Corrente do Brasil. Logo abaixo dela a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) é detectada nas maiores profundidades.

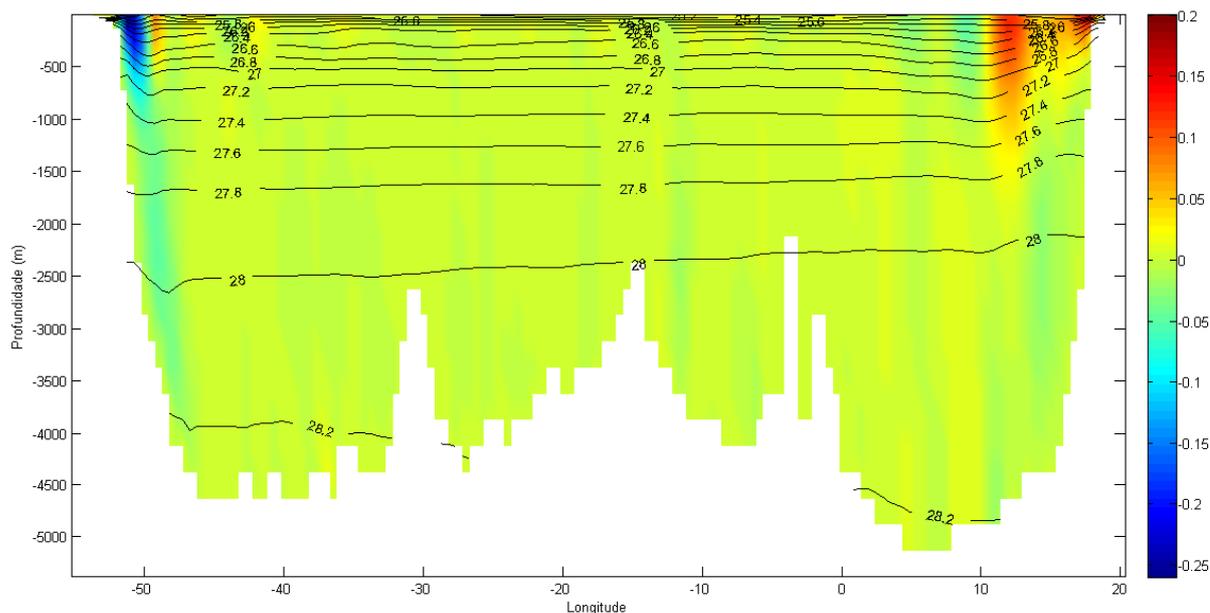


Figura 3. Seção da velocidade média meridional (m/s) no perfil de 34,25°S. As linhas indicam as isocpnais com os valores sobre elas.

Na região leste, as velocidades em vermelho indicam a entrada das águas do VA no Atlântico Sul, sendo a célula de entrada mais intensa a corrente da Benguela. Abaixo são as águas profundas de retorno em direção sul a 16°E, nas quais fecham a circulação meridional como um fluxo compensatório das águas superficiais que formam o ramo superior da célula de circulação meridional.

Partes destas águas centrais tem origem das Águas Centrais do Oceano Índico, trazidas pelos anéis do VA, são as conhecidas águas de 13°C, já reconhecidas e encontradas no Atlântico Sul (STRAMMA, LOTHAR ENGLAND, 1999) (Figura 4). Estas águas centrais são águas que sofrem subducção na termoclina e são denominadas Águas Modais Subtropicais (AMS) do Atlântico Sul que dão origem a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e estão representadas pelos campos de velocidades superficiais na Figura 1.

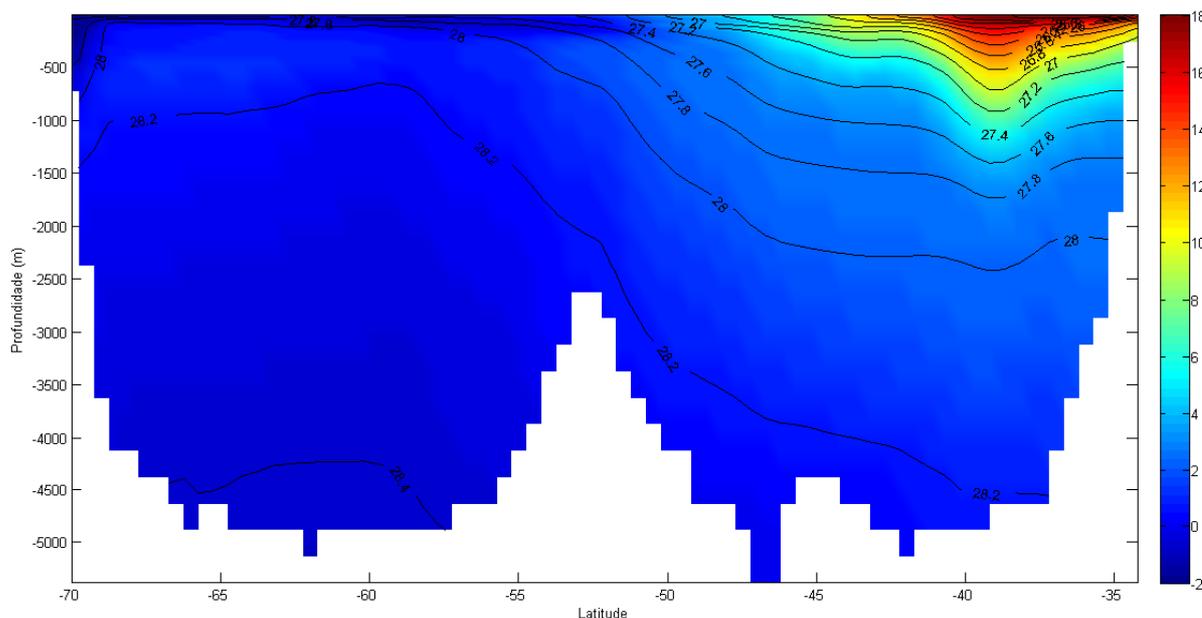


Figura 4. Seção sul da África ($18,25^{\circ}\text{L}$) da temperatura potencial ($^{\circ}\text{C}$) e as linhas representando as superfícies de densidade neutra. As águas de 13°C estão localizadas próximas aos 500 m de profundidade.

A ACAS tem sua formação a partir da AMS ao longo da CCA, onde parte das águas intermediárias são aquecidas e convertidas em ACAS na CBM, responsável pela alta variabilidade da sua salinidade (DONNERS; DRIJFHOUT, 2004). Estas águas então seguem para o norte e passam pela Bacia da Argentina até a CBM e parte delas se direciona para porção sul do giro subtropical, representado na Figura 1. Esta é uma parte da ACAS segue com a Corrente do Atlântico Sul perto dos 40°S onde outra segue sentido Oceano Índico e outra contribui diretamente para a Corrente da Benguela perto de 10°L .

Nas águas intermediárias, as velocidades da região amostrada continuam como as velocidades superficiais, ressaltando as regiões de formação da AIA: ao sudoeste do Atlântico e ao sudeste no Pacífico, que entra no Atlântico Sul através da Passagem de Drake (SLOYAN et al., 2010). Ao leste, a AIA também contribui para as águas intermediárias do Atlântico através do VA, pela CBe. A AIA é reconhecida pelo seu mínimo de salinidade (STRAMMA, LOTHAR ENGLAND, 1999) como mostra a Figura 5.

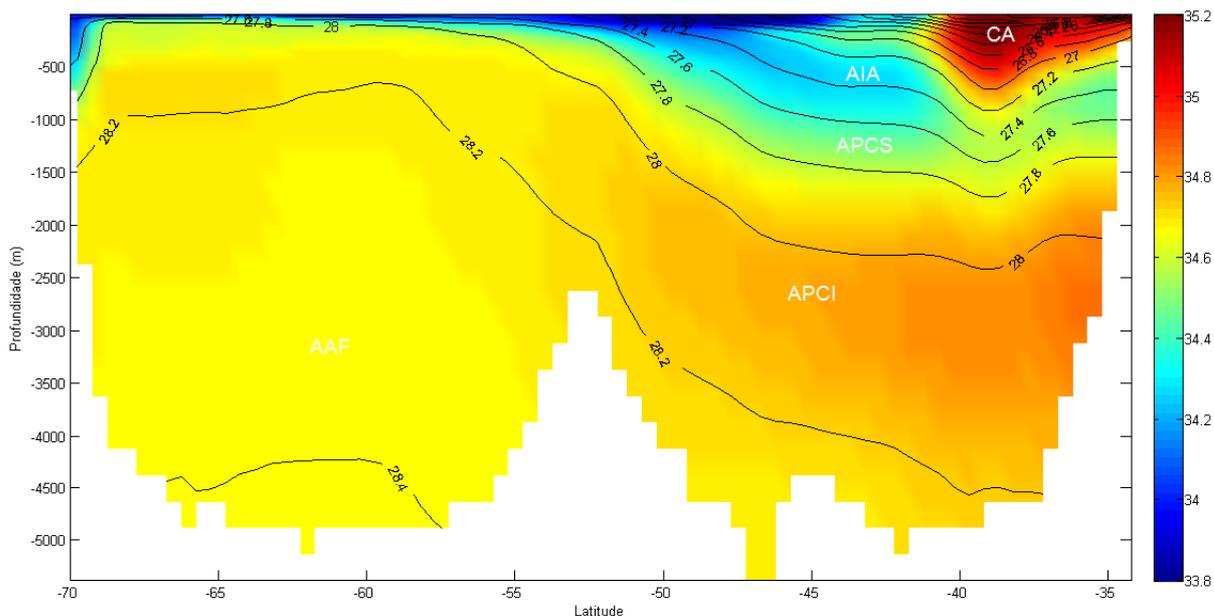


Figura 5. Seção sul da África (18,25°L) da salinidade e linhas representando as superfícies de densidade neutra, onde nota-se a intrusão da AIA, a alta salinidade da Corrente das Agulhas e as massas d'águas que compõe a CCA, APCS, APCI.

Nas águas profundas, a corrente de fronteira oeste flui ao longo da plataforma continental da América do Sul segue seu fluxo representado pela APAN, como é possível ver na Figura 3 em azul perto dos 52°O. Parte da APAN segue seu fluxo em direção ao leste, perto dos 40°S, onde flui pelas maiores profundidades para o Oceano Índico (Figura 6).

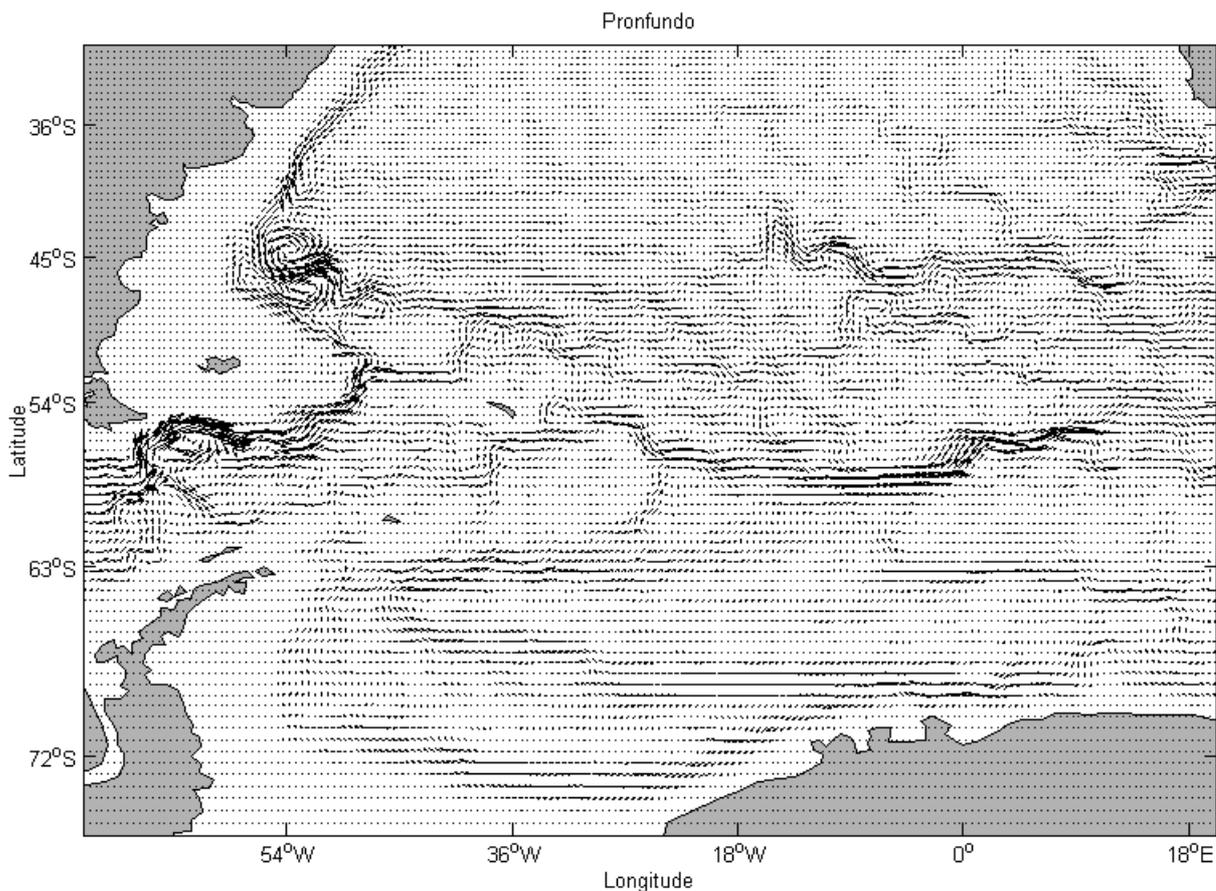


Figura 6. Média do campo médio de velocidades geostróficas, médias de 1625 m a 3375 m, representando as águas profundas.

Águas Profundas Circumpolares (APC) também estão destacadas neste mapa. A CCA transporta representantes desta profundidade: a Água Profunda Circumpolar Superior (APCS), encontrada na região equatorial do Atlântico Sul nos estudos de Reid (1989) e a Água Profunda Circumpolar Inferior (APCI) (Figura 7).

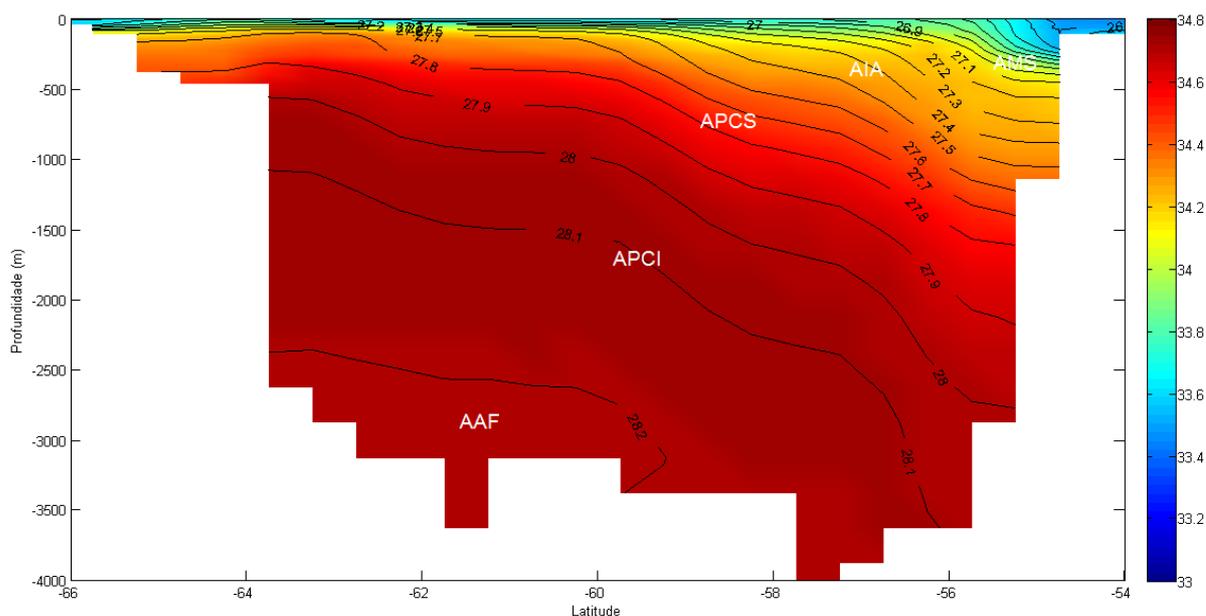


Figura 7. Localização das principais massas d'água na seção da salinidade em 65,25°O, representando a Passagem de Drake. APCS e APCI que compõe a CCA, AIA e AMS, menos densa próxima a superfície.

Ambas constituem de águas de baixa salinidade e oxigênio e ricas em nutrientes em relação a APAN. São formadas na região da Passagem de Drake e na Bacia da Argentina quando a APAN entra em contato com estas águas, resulta na divisão da ACP em APCS e APCI. A APCS flui logo abaixo AIA em direção ao norte do Atlântico Sul.

É possível também ver o sistema de circulação ciclônico do Giro de Weddell (GW), que é governado na superfície pelo vento e pelo gradiente de densidade nas regiões profundas, este está bem representado em todos níveis de profundidade. O GW é considerado uma das principais fontes de formação da Água de Fundo Antártica (AAF), massa de água mais densa que compõe o fundo de todas bacias oceânicas (ORSI; JOHNSON; BULLISTER, 1999).

No mapa da Figura 8, é possível observar a região onde a transferência dessa massa é feita para o Atlântico, na denominada Fossa Sandwich do Sul (próximo a 20°O e 60°S), suficientemente profunda para a exportação dessa massa para o Mar da Scotia e para o Atlântico Sul, como é mostrada nos estudos de (NAVEIRA GARABATO et al., 2002). A topografia local é que rege toda a circulação pelo Mar de Weddel, mesmo que ocorra este escape, ela força essas águas de fundo a recircular pelo giro.

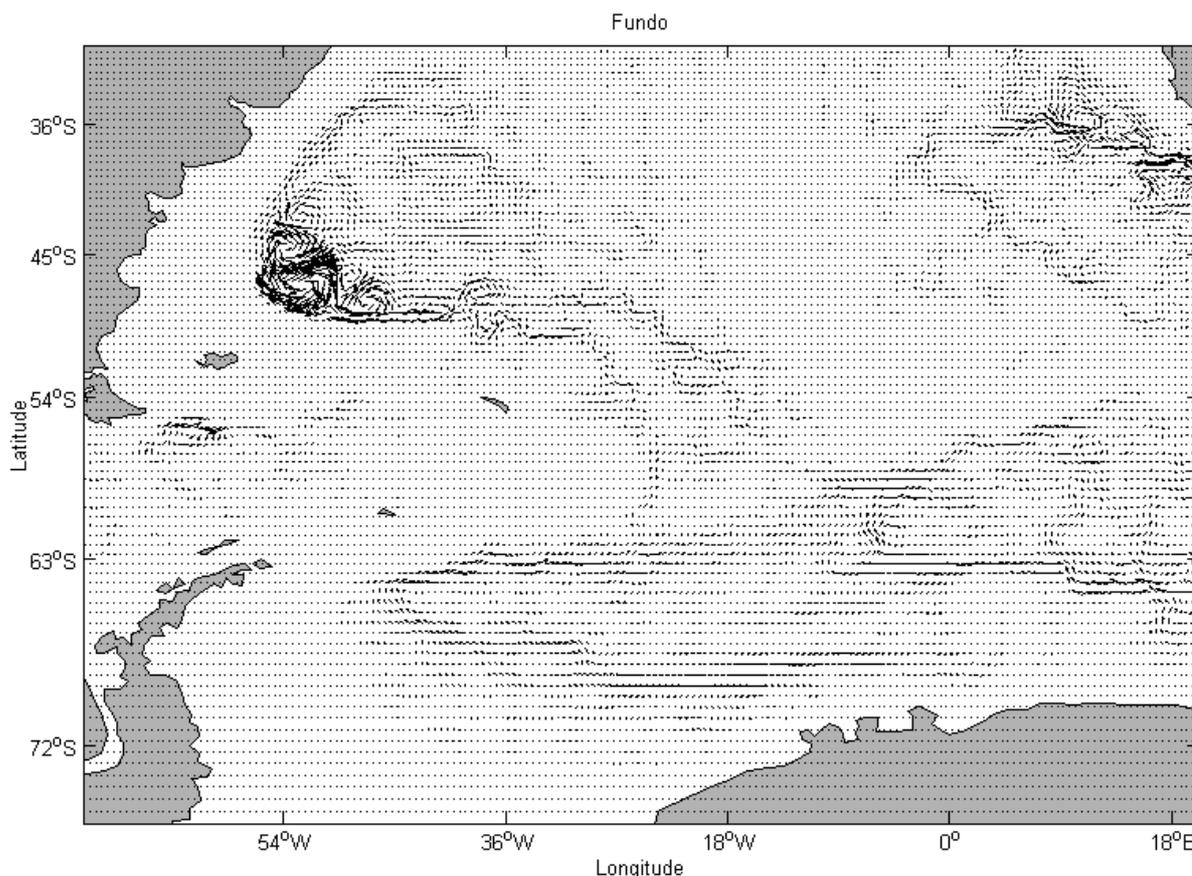


Figura 8. Média do campo médio de velocidades geostroficadas, médias de 3625 m ao fundo (5375 m), representando as águas de fundo.

Além disso, é possível notar um fluxo intenso de recirculação destas águas na bacia da Argentina, podendo ser explicado pela topografia amena onde é possível que estas águas densas consigam fluir. Na região sudeste no Atlântico Sul, um fluxo de entrada e sua recirculação também podem ser vistos, região sem obstáculos da topografia, além do fluxo de retorno de águas frias e profundas, que podem ser vistas perto de 10°L , como já comentado.

2.2. Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico

A AMOC é formada principalmente por duas células de recirculação meridional, uma formada por um fluxo quente de águas de superfície em direção norte e a outra com um fluxo frio que retorna pelas maiores profundidades em direção ao sul (CUNNINGHAM; MARSH, 2010). A perda de calor para a atmosfera nas altas latitudes no Atlântico Norte faz com que essas águas de superfície que chegam ao norte tornem-se densas e afundem para constituir a água profunda de

retorno (SROKOSZ et al., 2012). Estas águas dão origem a APAN transportada intensamente através do contorno oeste no Atlântico Sul.

Do Atlântico Sul, a APAN chega ao Oceano Austral onde segue seu fluxo no sentido leste através da CCA e conecta a região polar do Hemisfério Sul com os demais oceanos. Da região polar, um fluxo mais profundo compensatório da APAN flui para o norte formando a AAF que tem direção norte e a medida que chega a latitudes mais baixas aflora na APAN, retornando para o sul.

A CCA é responsável por transportar e distribuir propriedades, além de ser a maior corrente em termos de volume e transporte de massa. Ao chegar a Passagem de Drake, a CCA sofre um estreitamento, sendo este o melhor local para quantificar seu volume e propriedades transportadas (MEREDITH, 2004). De Drake, parte da CCA retorna ao Atlântico Sul, constituindo parte das massas d'água que estão presentes na fronteira oeste e na formação da Corrente das Malvinas, que influencia a AMOC (JULLION et al., 2010).

Outra fonte de entrada de águas no Oceano Atlântico Sul é através da Retroflexão da Corrente das Agulhas no sul da África, onde águas quentes e salinas provenientes do Oceano Índico escapam neste retorno de águas e entram na forma de águas intermediárias e vórtices. Estas águas formam o importante Vazamento das Agulhas que alimenta ramo norte da AMOC (SPEICH; BLANKE; CAI, 2007).

A estrutura física da AMOC e seu eficiente controle como regulador climático são afetados pela natureza e pela existência das trocas de propriedades que influenciam as massas de água envolvidas, estas trocas determinam o caminho de retorno das propriedades das águas associadas que entram e pelo seu efeito no balanço de calor e sal do Atlântico (FRIOCOURT; DRIJFHOUT, 2005).

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Analisar e identificar as variações temporais da Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico Sul e relacioná-las com a variabilidade dos fluxos de entrada através de três seções: 34,25°S, na Passagem de Drake e na Retroflexão da Corrente das Agulhas.

3.2. Objetivos específicos

- Verificar as velocidades meridionais/zonais e calcular os transportes de volume, de calor, sal e a força da AMOC (34,25°S);
- Calcular a média temporal do dados e caracterizar a área de estudo.
- Calcular séries temporais de cada transporte para uma análise decenal e intra-anual;
- Calcular superfícies de densidade neutra, definir massas d'águas e analisar suas transformações temporais;
- Correlacionar os resultados obtidos entre as seções definidas.

4. METODOLOGIA

4.1. SODA

Para este trabalho foi utilizado o produto de reanálise do Simple Ocean Data Assimilation (SODA), versão 2.2.4. O SODA fornece um aperfeiçoamento do estado dos oceanos baseados em observações diretas e simulações numéricas. A ideia é que estas observações corrijam erros em modelos com o objetivo de melhorar reanálises das variáveis dos oceanos (CARTON & GIESE, 2008).

O sistema SODA possui domínio global e resolução espacial de $1/2^\circ$ de latitude e longitude, e a profundidade é dividida em 40 níveis da superfície até 5000 m como mostra a Tabela 1. Os dados estão ordenados em médias mensais do período de 1871 a 2010, das variáveis: temperatura, salinidade, velocidade total zonal, velocidade total meridional, tensão superficial do vento zonal e meridional e elevação da superfície do mar.

Tabela 1. Níveis verticais do sistema SODA e suas respectivas profundidades.

Níveis	Profundidade (m)		
1	5,01	21	729,35
2	15,07	22	918,37
3	25,28	23	1139,15
4	35,76	24	1378,57
5	46,61	25	1625,7
6	57,98	26	1875,11
7	70,02	27	2125,01
8	82,92	28	2375
9	96,92	29	2625
10	112,32	30	2875
11	129,49	31	3125
12	148,96	32	3375
13	171,4	33	3625
14	197,79	34	3875
15	229,48	35	4125
16	268,46	36	4375
17	317,65	37	4625
18	381,39	38	4875
19	465,91	39	5125
20	579,31	40	5375

Existem várias versões do SODA que dependem das configurações iniciais utilizadas nas reanálises. Esta versão 2.2.4 representa a primeira assimilação rodada por 100 anos e utiliza o produto de reanálise atmosférica 20Crv2 (20th Century Atmospheric Reanalysis product). O modelo oceânico no qual os dados são

baseados é o POP (Parallel Ocean Program) com 40 níveis de profundidade e resolução espacial de grade $0,4^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ (CARTON; SEIDEL; GIESE, 2012).

As correções foram realizadas continuamente a partir de dados observacionais que têm como fonte “The World Ocean Atlas” de 2004 que contém temperaturas e salinidades dos oceanos a partir de batitermógrafos, batitermógrafos expansíveis (XBT) e CTD (conductivity-temperature-depth). Além destes, os dados também foram retirados de alguns programas como o TOGA-TAO com termistores, programa tropical “Sovietc Sections”, satélites de altimetria do Geosat, ERS/1 e TOPEX/Poseidon (CARTON; GIESE, 2008).

Os dados foram obtidos através do OPENDAP da URL http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/SODA/soda_pop2.2.4, pertencente a APRDC (Ásia-Pacific Data Research Center) da Universidade do Hawaii, cuja a fonte é <http://sodaserver.tamu.edu>, do Texas A&M University.

4.2. Cálculo dos Transportes

A aquisição foi feita para todo oceano Atlântico Sul. Seções foram definidas para uma melhor análise do comportamento da circulação e estrutura vertical da AMOC, da Passagem de Drake e Sul da África (Retroflexão da Corrente das Agulhas). As coordenadas (Tabela 2) foram definidas de acordo com bibliografias (ANSORGE et al., 2014; DONG; GARZOLI; BARINGER, 2011; GARZOLI; MATANO, 2011; PEREZ et al., 2011) de forma a fechar um volume de controle composto pelo Atlântico Sul e o Oceano Austral.

Tabela 2. Coordenadas de cada seção.

Seção	Coordenadas
AMOC	34,25°S, 53,25°O-18,75°L
Passagem de Drake	65,25°O, 54,75°S-66,25°S
Sul da África	18,25°L, 34,25°S-70,25°S

A latitude de $34,5^{\circ}\text{S}$ é hoje considerada crucial para o estudo da AMOC (ANSORGE et al., 2014). Por estar na “boca” da bacia do Atlântico é a latitude ideal para capturar a variabilidade da AMOC, além de ser um local mais distante do Equador, garantindo cálculos mais estáveis das propriedades da AMOC. A latitude mais próxima desta na resolução do SODA é $34,25^{\circ}\text{S}$.

A seção de 34,25°S foi dividida em três regiões: contorno oeste, região interior e de contorno leste, para que seja melhor avaliada a influência das águas que entram no Atlântico Sul em cada região específica da AMOC, dada sua grande variabilidade diante da extensão desta seção.

Para a análise das propriedades que chegam e que circulam na AMOC do Atlântico Sul foram calculados os transportes de volume, calor e sal em cada seção. As variáveis $V(x,y,z,t)$ estão em função da longitude, latitude, profundidade e tempo e os valores de transportes foram separados na latitude 34,25°S (seção Atlântico Sul) e nas longitudes 65,25°O e 18,25°L (seções Drake e África, respectivamente) de costa a costa. Os transportes integrados na profundidade de volume (1), de calor (2) e de sal (3) foram calculados a partir das seguintes equações:

$$V = \iint v \, dx \, dz \quad [Sv = 10^6 \cdot m^3 \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

$$C = \iint \rho \, v \, Cp \, T \, dx \, dz \quad [PW = 10^{15} \cdot W] \quad (2)$$

$$S = \iint \rho \, v \, S \, dx \, dz \quad [Ton \cdot s^{-1} = 10^3 \cdot Kg \cdot s^{-1}] \quad (3)$$

Onde v é a velocidade meridional em $m \cdot s^{-1}$, x é a distância latitudinal/longitudinal em m, z é a profundidade em m, ρ é a densidade em $kg \cdot m^{-3}$ (calculada a partir dos valores de salinidade e temperatura), Cp é o calor específico da água do mar em $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$, T a temperatura em $^\circ C$ e S a salinidade em PSU.

Dos transportes, foram obtidos resultados destes integrados e acumulados nas longitudes (AMOC) e latitudes (Oceano Austral). Os transportes totais foram calculados através da média de todos os tempos e a soma total de todo o transporte em todas as profundidades de cada seção. O transporte total em cada seção foi calculado para cada média mensal do dados para a obtenção das séries temporais.

4.3. Força da AMOC

A força da AMOC em 34,25°S foi calculada segundo DONG et al. (2009), que a define como o máximo de transporte de volume acumulado da célula de circulação meridional superior que compõe a MOC. Ou seja, o transporte de volume integrado da superfície até a profundidade com máximo valor de transporte, que passa a diminuir conforme a profundidade aumenta. Esta profundidade indica onde o transporte meridional inverte sua direção de norte nas camadas superiores para sul

nas inferiores. Este valor foi obtido para cada média mensal para a análise da série temporal da força da AMOC.

4.4. Densidade Neutra

Para uma melhor análise das massas d'água e da circulação através delas, foram calculadas camadas de mesma densidade, isopicnais, através do método descrito por Jackett e McDougall (1997) denominado de densidade neutra. A densidade neutra é uma função de cinco variáveis: temperatura, salinidade, pressão, latitude e longitude. Os níveis de superfícies neutras são denominados γ^n e são descritos pela menor difusividade vertical e processos de mistura de pequena escala que ocorre entre elas. A densidade neutra é definida por uma continuação análoga das superfícies de densidade potencial discretamente definidas e são atualmente as melhores superfícies isopicnais.

A dependência espacial das densidades neutras está conformada pela ligação de γ^n com a base de dados hidrográficos climatológicos dos oceanos. Jackett e McDougall (1997) descreveram detalhadamente a metodologia e criaram o software para o cálculo da densidade neutra para quaisquer dados hidrográficos onde são encontradas as posições específicas das superfícies de γ^n ao longo da coluna d'água. O código foi desenvolvido para Matlab e está disponível em http://www.teos-10.org/preteos10_software/neutral_density.html.

A cada camada de densidade neutra foi somado o transporte correspondente a ela, sendo assim os valores dos transportes em cada densidade definem a quantidade de propriedades que cada camada transporta, ou seja, que cada massa d'água carrega. Para a definição dos intervalos de γ^n das massas d'água foram analisadas as velocidades, transportes, salinidade e temperatura de cada seção para a caracterização destas para o dados do SODA. Séries temporais dos transportes também foram calculadas para a correlação das mesmas entre Drake e África com a seção de 34,25°S e a força da AMOC.

4.5. Análise das Séries Temporais

4.5.1. Regressão Linear

As séries temporais calculadas são longas, o que dificulta a análise da dinâmica dos transportes em cada seção. Para uma melhor análise, foram calculadas linhas de tendência, que é dada pela mudança de longo termo do nível

médio dos dados analisados. Para a remoção dos valores médios e das tendências linear e quadrática foi utilizado o modelo descrito pela Equação 4:

$$f(t) = f_{medio} + a.t + b.t^2 \quad (4)$$

Onde f_{medio} é o valor médio da série, e a e b são os coeficientes dos termos linear e quadrático calculados através da regressão que é baseada na Decomposição QR pelo Método dos Mínimos Quadrados.

4.5.1.1. Modelos Harmônicos

Os modelos de regressão descritos nesta seção foram ajustados através do Método dos Mínimos Quadrados também. Os sinais anuais e semi-anuais de cada série foram determinados através do modelo de regressão linear dado pela Equação 4:

$$f(t) = A_{an} \cdot \cos(2\pi ft - \theta_{an}) + A_{sa} \cdot \cos(4\pi ft - \theta_{sa}) \quad (5)$$

Onde o índice 'an' refere-se ao ciclo anual, e o índice 'sn' refere-se ao ciclo semi-anual; A é a amplitude, f é a frequência, definida como $1/T$ e $T = 1$ ano, θ é a fase e t é o tempo em anos. A Equação 4 pode ser escrita da forma da Equação 5:

$$f(t) = a_{an} \cos(2\pi ft) + b_{an} \sin(2\pi ft) + a_{sa} \cos(4\pi ft) + b_{sa} \sin(4\pi ft) \quad (6)$$

Que foi obtida através da identidade trigonométrica das Equação 6 e 7:

$$A \cos(2\pi ft - \theta) = A \cos(\theta) \cos(2\pi ft) + A \sin(\theta) \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

$$A \cos(2\pi ft - \theta) = a \cos(2\pi ft) + b \sin(2\pi ft) \quad (8)$$

A amplitude A , θ e os coeficientes a e b estão relacionados pelas Equações 8 e 9:

$$A^2 = a^2 + b^2 \quad (9)$$

$$\tan \theta = \frac{b}{a} \quad (10)$$

Em cada ciclo anual, foram calculados os sinais de variação deste período, ou seja, os picos que representam os sinais anuais e semi anuais. A amplitude destes picos e o valor de θ , referente ao deslocamento da amplitude, resultam no valor máximo do transporte bem como o tempo em que estes picos anuais e semi-aneais ocorrem.

4.5.2. Densidade Espectral

Para uma solução mais acurada do comportamento dos transportes em cada seção através das séries temporais, foram extraídos das séries de cada um dos transportes nas três seções de controle, a variação anual dos transportes para outra análise: a da densidade espectral com o intuito de obter a potência espectral estimada para uma frequência anual dos dados.

As séries foram recortadas em 10 séries menores para diminuir os ruídos. Como as séries são compostas por médias mensais, o intervalo amostral utilizado foi 1/12, representando o período de um ano. As 10 séries foram extraídas aplicando o método janela de Hanning (Hanning window) e suas médias foram retiradas, reduzindo os efeitos de borda. Para melhorar a significância estatística deste produto, ou seja, aumentar o número dos graus de liberdade, elas foram sobrepostas em 50%. O espectro ainda foi normalizado para que a variância total das séries fossem preservadas.

4.5.3. Técnica de Correlação

A correlação entre as séries foi calculada através do coeficiente de correlação linear de Pearson ($R(i,j)$), onde $C(i,j)$ representa a covariância da série e o denominador os desvios-padrão como mostra a Equação 11:

$$R(i,j) = \frac{C(i,j)}{\sqrt{C(i,i)C(j,j)}} \quad (11)$$

Para determinar se as correlações são confiáveis, foi aplicado o teste t-student para os valores-p que possuem grau de confiança superior ou igual a 95%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Média Temporal

5.1.1. Transportes Totais

Com esta região de estudo definida, a média temporal e o transporte total que entra e sai do volume de controle determinado estão esquematizado na Figura 9. O volume total do transporte através da seção $34,25^{\circ}\text{S}$ é de $0,63\text{ Sv}$ com desvio padrão de $0,74\text{ Sv}$, condizente com o encontrado na bibliografia por Dong, Garzoli, & Baringer (2011), $0,6 \pm 1,7\text{ Sv}$.

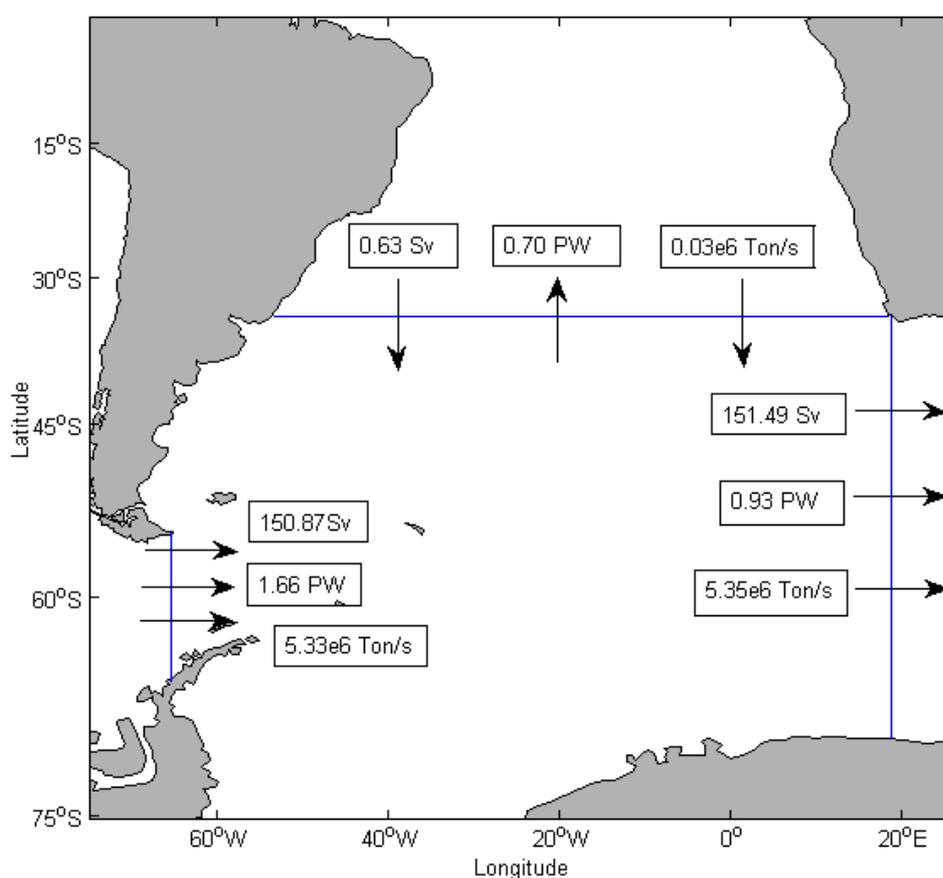


Figura 9. Representação gráfica dos transportes médios totais de volume, calor e sal em cada uma das seções de estudos definidas. Eixo das coordenadas estão as latitudes e das abcissas as longitudes.

O transporte total em Drake foi $150,87 \pm 5,41\text{ Sv}$, valor um pouco mais elevado que já calculado em outros trabalhos, como de 129 Sv (LUMPKIN; SPEER, 2007), 137 Sv em Ruijter et al (2003), com dados do WOCE, mas um volume muito próximo de $150,5\text{ Sv}$ do modelo ORCA2 e 160 Sv do OCCAM (FRIOCOURT;

DRIJFHOUT, 2005). Ao Sul da África, $151,49 \pm 5,47$ Sv também é um transporte total de maior valor que a bibliografia 144 Sv em Dong, Garzoli e Baringer (2011). Estas seções tem a CCA dominando os transportes e por isso estes valores altos. Dentro do esperado, o volume de controle composto pelas três seções está convergindo em 0,01 Sv.

Na seção da AMOC, o valor positivo de $0,7 \pm 0,24$ PW para o transporte de calor meridional integrado pela profundidade e longitude era esperado, comprovando a peculiaridade do Atlântico Sul transportar o calor dos polos para o norte, diferentemente dos demais oceanos como mostrados por Ganachaud e Wunsch (2003). Porém, os valores já investigados são menores como o encontrado por Garzoli e Matano (2011), de 0,6 PW com o modelo POCM e 0,62 PW por Lumpkin e Speer (2007) em 32°S ambos dados obtidos a partir de seções hidrográficas do WOCE.

Os transportes de calor em Drake e ao sul da África obtidos também mostram-se coerentes ao já obtidos. Da África um pouco menor por perder calor para os anéis das Agulhas que carrega águas quentes e mais salinas do Oceano Índico para o Atlântico. Em Drake o fluxo de calor calculado foi de $1,66 \pm 0,08$ PW, maior que o encontrado por Lumpkin e Speer (2007), de 1,36 PW. O valor de $0,93 \pm 0,25$ PW é menor que o da bibliografia de 1,26 PW (DONG; GARZOLI; BARINGER, 2011) mas compensado pelo maior transporte de calor em $34,25^\circ\text{S}$ e também próximo ao valor de 0,88 PW encontrado por Lumpkin e Speer (2007).

O transporte de sal a $34,25^\circ\text{S}$ foi de $-0,031 \times 10^6 \pm 2,68 \times 10^4$ Ton/s valor encontrado para 30°S do WOCE por Holfort e Siedler (2001) foi -26,75 Gg/s ($= 0,029 \times 10^6$ Ton/s). A média temporal do transporte de sal total nas seções apresentou valores coerentes onde quase o total que entra pela Passagem de Drake sai pelo Sul da África. Assim como o transporte de calor, um pouco do transporte de sal é perdido para a Corrente das Agulhas. Os valores encontrados para a seção de Drake e África foram $5,33 \times 10^6 \pm 1,92 \times 10^5$ Ton/s e $5,35 \pm 1,95 \times 10^5 \pm \times 10^6$ Ton/s respectivamente, um pouco maiores que os de Lumpkin e Speer (2007), $4,61 \times 10^6$ Ton/s e $4,67 \times 10^6$.

5.1.2 Transportes Integrados

5.1.2.1. 34,25°S

A Figura 10 mostra a média de todos os tempos do transporte de volume verticalmente integrado e é possível notar o comportamento inverso das fronteiras leste e oeste na seção de 34,25°S. A APAN é notada perto dos 52°O e ou outro ramo de velocidade negativa máxima de -8,16 Sv pode ser interpretado como a CB. A região interior aparentemente é mais homogênea, com a soma de suas velocidade perto de zero. No contorno leste, nota-se valores positivos e ruídos que podem explicar a presença do vazamento das agulhas entrando no Atlântico Sul.

Existe a dificuldade de obter uma estrutura bem definida e detalhada da região de 34,25°S que é considerada de difícil análise precisa (MEINEN et al., 2013). A presença de campos intensos de velocidade dos transportes da CB, APAN, VA e Corrente da Benguela faz da estrutura vertical nesta seção ser crítica, por isso as regiões de contorno próximos ao continentes apresentam ruídos neste gráfico.

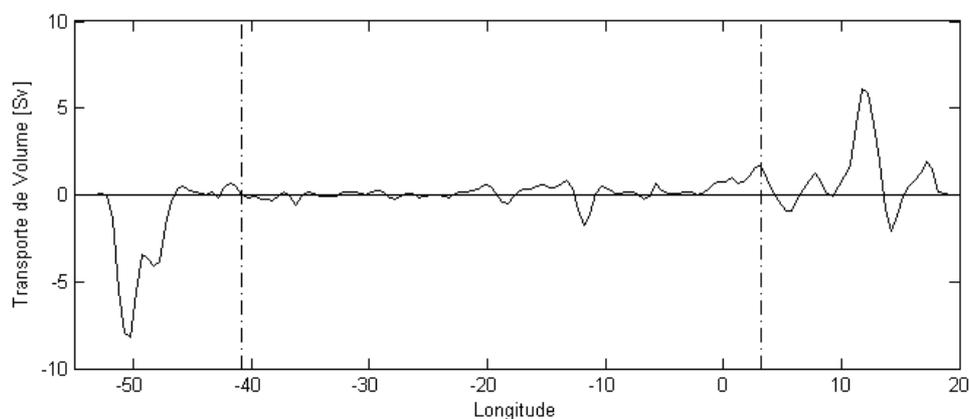


Figura 10. Transporte de Volume integrado pelas profundidades. Linhas pontilhadas recortam a seção em três para posteriores análises da influência dos transportes pelas fronteiras oeste e leste.

O mesmo padrão é visto nos transportes de calor e sal nesta seção de controle da AMOC. O valor máximo de transporte de calor encontrado foi de -0,42 PW com direção sul. O máximo valor positivo foi de 0,25 PW, perto de 11°L, região de influência das águas quentes e salinas da CBe. Os valores dos transportes de salinidade mostram um comportamento equivalente com o de volume, atendendo os mesmo padrões da circulação (Figura 11).

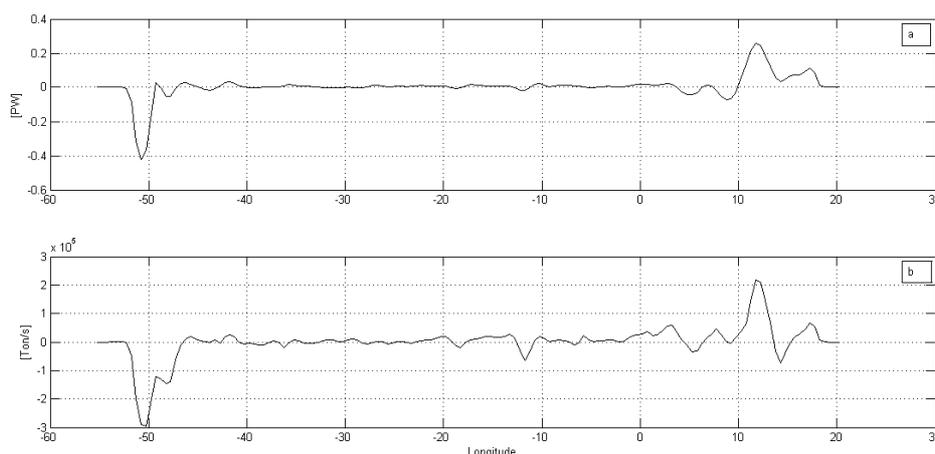


Figura 11. Transportes de calor (a) e sal (b) integrados na vertical. Valores positivos são transportes com direção ao norte e negativos, para o sul na seção de 34,25°S.

Os transportes integrados zonalmente (Figura 12) atendem o mesmo padrão também, sendo o de volume e sal equivalentes, mais uma vez. É possível ver um transporte mais fraco das águas de superfície, que segundo Stramma, Lothar England (1999) é definido da superfície até 500 m, no transporte das três propriedades sentido norte. Assim como das águas intermediárias de 500 a 1500 m mostrando um transporte mais intenso sentido norte, que de fato representam a Água Intermediária Antártica (AIA) que vem de sul, portanto positivas também.

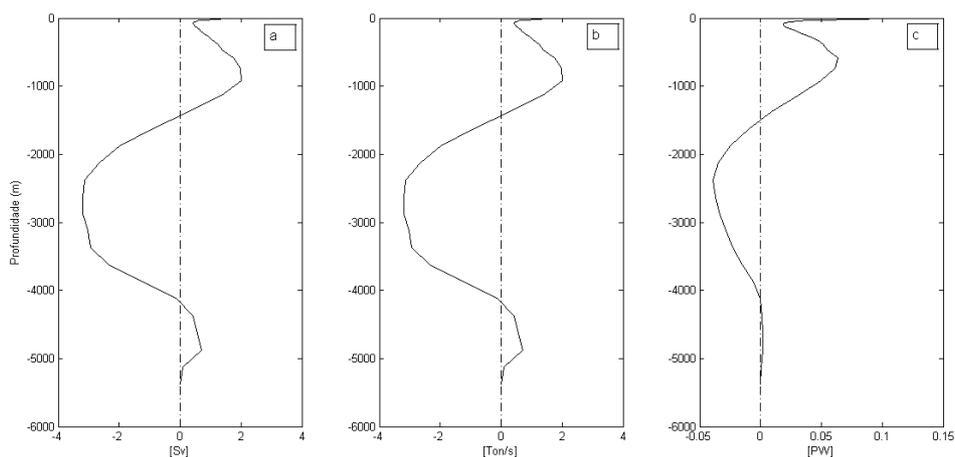


Figura 12. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c) integrados zonalmente. Valores positivos tem o fluxo em direção ao norte e valores negativos, fluxos em direção ao sul na seção de 34,25°S.

O transporte da APAN nas regiões profundas (1500-4000 m) mais intensas está representado, onde o sinal de transporte negativo começa perto de 1600 m e

vai até 4125 m de profundidade. Os transportes positivos de fundo mostram que AAF, que tem origem polar fazendo parte das massas d'água constituintes do Atlântico Sul. A partir destes gráficos nota-se as duas células que compõe a SAMOC. A célula de maior força composta pela APAN e pelo retorno da AAF e a célula de transporte para o norte, composta pelas águas de superfície, centrais e intermediárias, resultando no fluxo compensatório de retorno da APAN. A força da AMOC é dada a partir da soma acumulada desta primeira célula superficial de transporte para o norte, esperando então um fluxo de retorno tão intenso quanto da força AMOC.

No gráfico da Figura 13, a média da velocidade na vertical (em vermelho) mostra um fluxo que tem direção norte até 1378 m de profundidade e depois uma fluxo sentido sul nas camadas inferiores de profundidade. O transporte de volume acumulado da superfície até o fundo (em preto) tem seus valores da superfície até 1378 m aumentados proporcionalmente com a profundidade, atingindo seu máximo. Segundo DONG et al. (2009), a profundidade de transporte de volume máximo indica onde o transporte meridional inverte sua direção de norte (nas camadas superiores) para sul (nas inferiores), comumente este valor varia de 1000-1400 m de profundidade (dados obtidos a partir de medições com XBTs). Além disso, este máximo de transporte acumulado define a força da AMOC como já descrito.

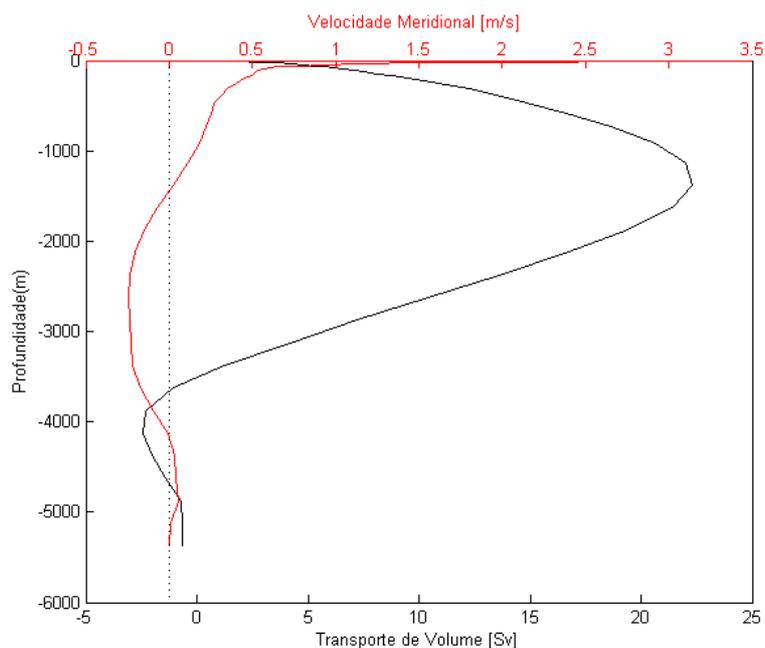


Figura 13. Velocidade meridional integrada nas longitudes (em vermelho) e transporte de volume acumulado da superfície ao fundo (em preto). Valores positivos tem direção norte e negativos direção sul.

5.1.2.2. Passagem de Drake

Os gráficos dos transportes de volume, sal e calor integrados na profundidade na seção amostrada da Passagem de Drake (65°O) estão representados na Figura 14. O fluxo intenso da CCA está presente por quase toda coluna d'água e na Figura 15 é possível ver as três frentes zonais que regem seu transporte. São elas: a Frente Circumpolar Antártica Sul (SACCF) perto de 62°S menos intensa, chega a 6,7 Sv; a Frente Polar (FP) chegando ao 17 Sv e aos 59°S , no meio e logo abaixo do continente sul-americano a Frente Subantártica (SAF), perto de $56,5^{\circ}\text{S}$, onde o transporte é mais intenso, assim como a frente, chegando a 40 Sv, latitudes próximas as descritas por St. Laurent et al. (2012). A CCA portanto, domina os transportes na Passagem de Drake.

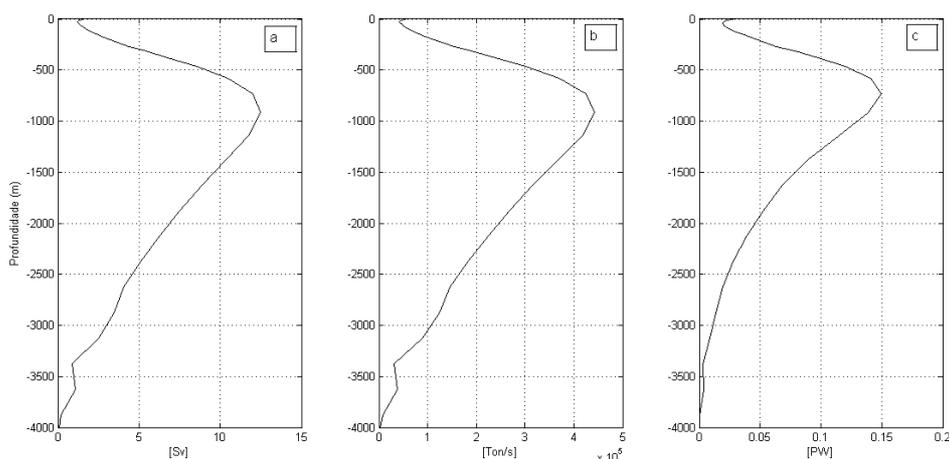


Figura 14. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c) integrados nas latitudes na seção de 65,25°O

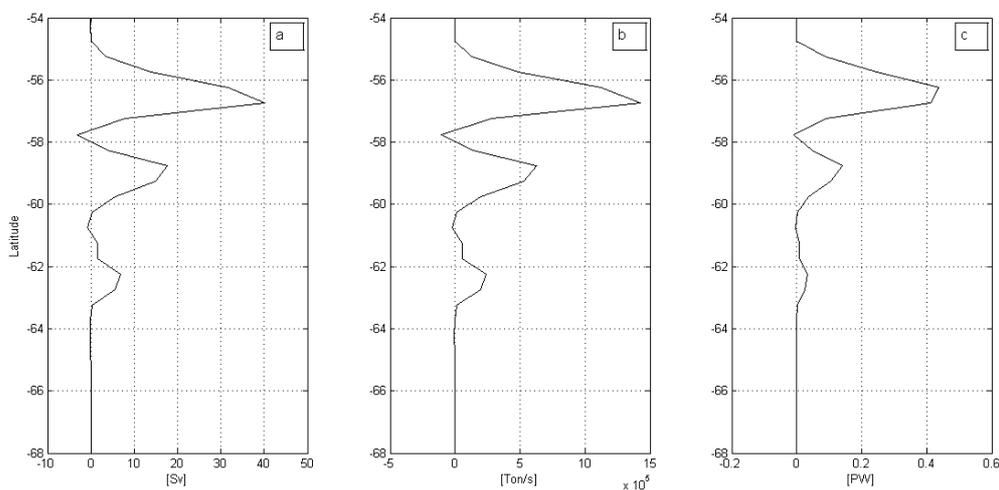


Figura 15. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c) integrados nas profundidade da seção de 65,25°O

5.1.2.3. Sul da África

Na seção ao sul da África, definida a 20°L, os três transportes calculados nos gráficos dos transportes integrados na profundidade (Figura 16) mostram as três frentes que regem os transporte da CCA também nesta região como mostra os estudo de (DOMINGUES; GONI, 2014). A SAF está localizada perto dos 47°S, não está tão restrita quanto na Passagem de Drake. Os valores dos transportes são próximos ao de Drake, com exceção do transporte de calor, que resultaram em menores valores para esta seção, mostrados anteriormente.

O transporte da CA está representado pelos valores negativos, sentido oeste, e positivos em direção leste. Este sinal intenso de velocidade em direção à bacia do

Atlântico Sul é a CA e sentido oeste sua corrente de retorno da sua retroflexão. Estes dois membros da circulação local dominam o transporte de calor na seção. Os valores positivos nas latitudes mais altas ao sul representam a corrente polar que segue sentido oeste entorno do continente Antártico.

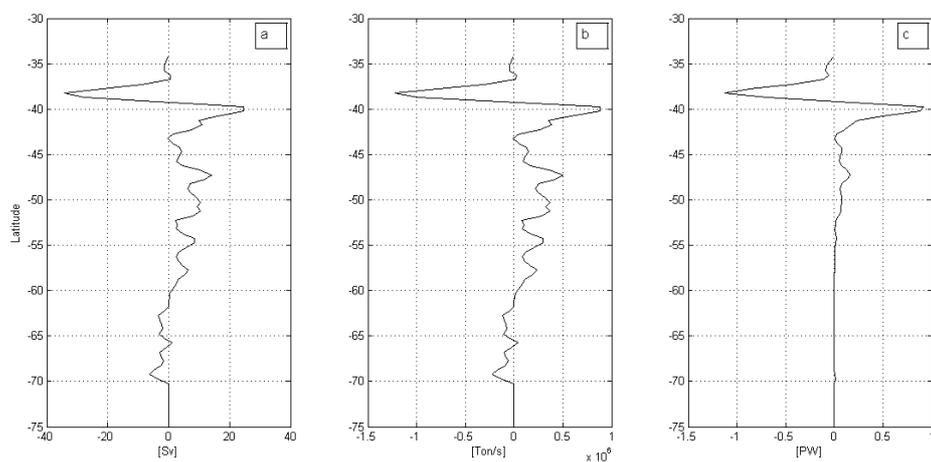


Figura 16. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c), respectivamente, integrado nas profundidade da seção de 18,25°L.

Os transporte integrados nas profundidades, já tiveram uma influência maior das águas superficiais e profundas que a região leva para leste (positivo), o valor do transporte chega a 13 Sv, assim como o valor em Drake, porém o transporte de calor é 0,10 PW menor, evidenciando a força da CA neste transporte (Figura 17).

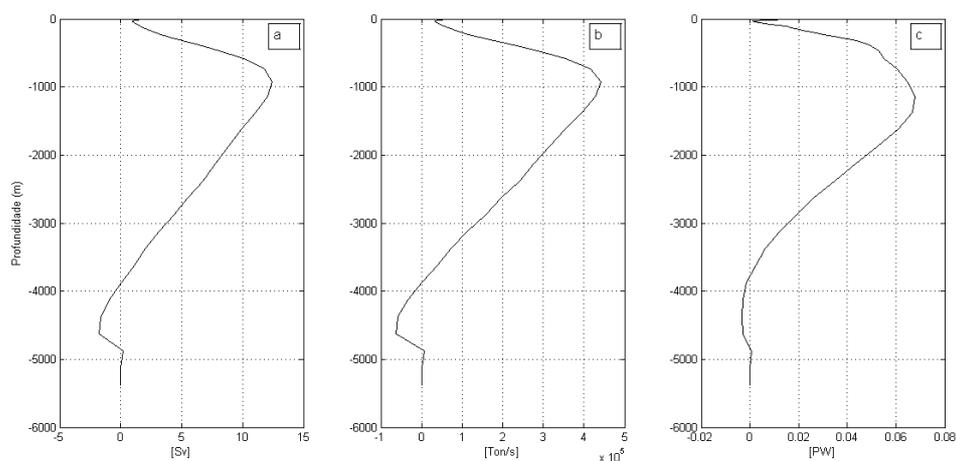


Figura 17. Transportes de volume (a), sal (b) e calor (c), respectivamente, integrado nas latitudes na seção de 18,25°L.

5.2. Séries Temporais

5.2.1. Seção 34,25°S

A série temporal da força da AMOC está representada na Figura 18, onde as variações dos valores foram maiores que as encontradas nas bibliografias. A intensidade variou 13,01 Sv a 35,60 Sv, enquanto que em Dong, Garzoli e Baringer (2011) que variou de 10,7 a 18,5 Sv nos dados do modelo OFES utilizado neste estudo, que segundo autores tem a força da AMOC e o transporte de calor meridional prejudicados pelo transporte geostrofico baixo que o modelo apresenta.

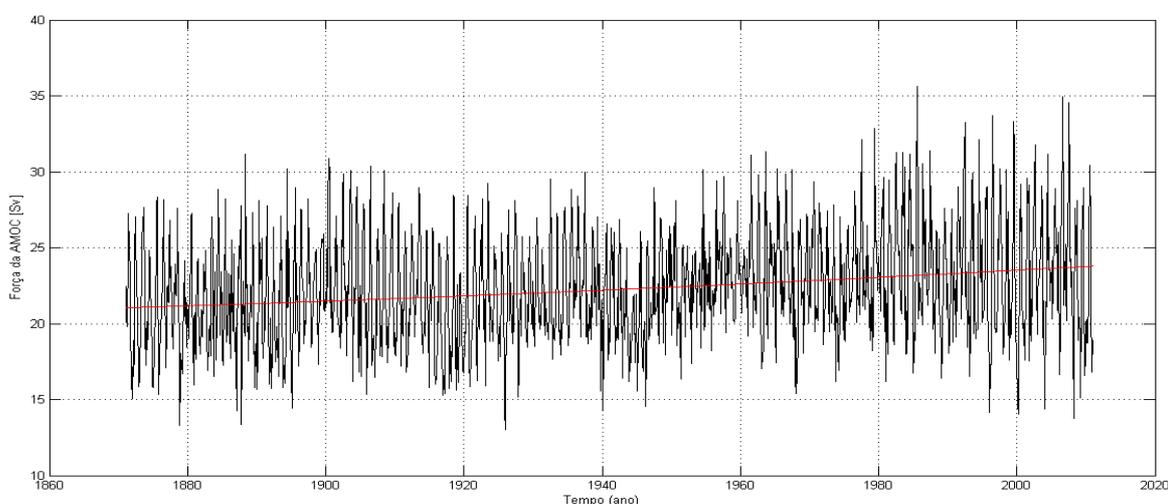


Figura 18. Série temporal referente a Força da AMOC em 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

A tendência quadrática em vermelho mostra que houve aumento de $0,0197 \text{ Sv}\cdot\text{ano}^{-1}$ da força da AMOC ao longo dos todos os anos. Mas é possível notar que houve um decréscimo entre os anos 40 e 50. A intensidade máxima da tendência encontrada está no último ano, de 23,79 Sv. No total a variação máxima dos dados da força da AMOC resultou em 2,75 Sv em 140 anos de dados.

Estudos a respeito da série temporal da força da AMOC do Atlântico Sul são poucos atualmente, a maior parte das séries temporais apresentadas são referentes a força da AMOC em 26°N (CLIVAR), as quais são mais curtas, dando ênfase ao ciclo sazonal que a AMOC apresenta (SROKOSZ et al., 2012). Uma tendência positiva da intensidade da AMOC foi encontrada nos estudos de Dong, Garzoli e Baringer (2011) até o ano de 1993, quando passou a diminuir de forma mais suave.

Nenhuma série temporal destas apresentadas é longa como as apresentadas neste trabalho, o que torna difícil a comparação dos resultados.

Na série do transporte de volume total os valores aumentaram até metade da década de 30, onde o valor máximo atingido foi de $-0,57$ Sv no sentido sul. A partir desta data o transporte de volume passou a diminuir em $-0,003$ Sv.ano⁻¹ (Figura 19).

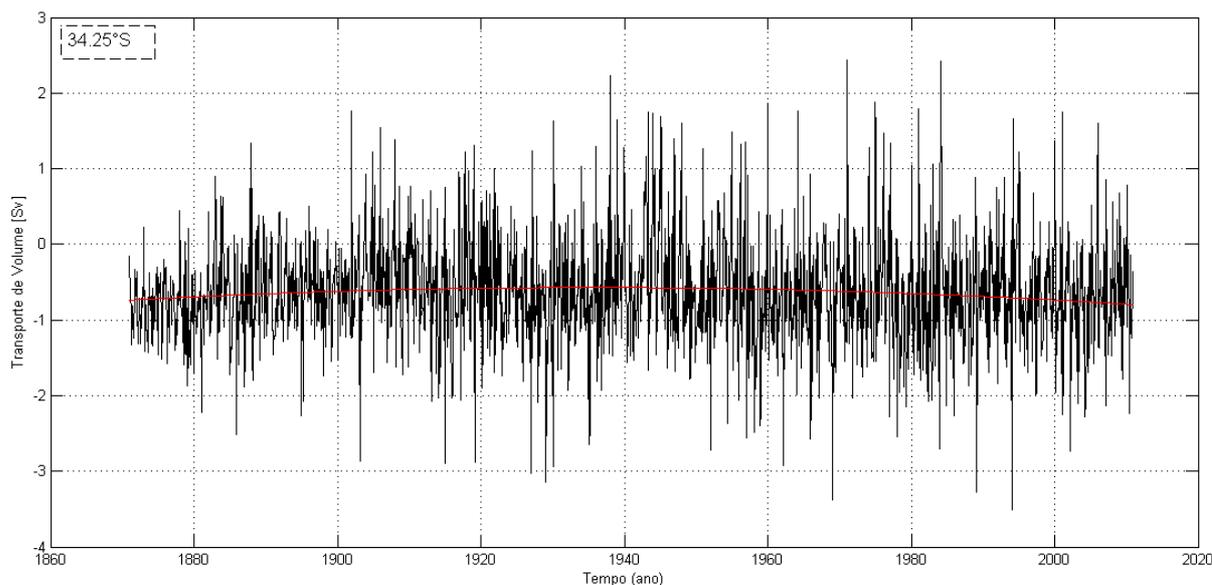


Figura 19. Série temporal do transporte de volume total da latitude de $34,25^{\circ}\text{S}$. A linha vermelha representa a tendência quadrática da série.

Já o transporte de calor teve o início do decaimento ao longo dos anos na metade do século 20, 10 anos antes que o de volume (Figura 20). O valor máximo atingido nesta época foi de $0,72$ PW e depois a diminuição anual destes valores foi de $0,001$ PW.

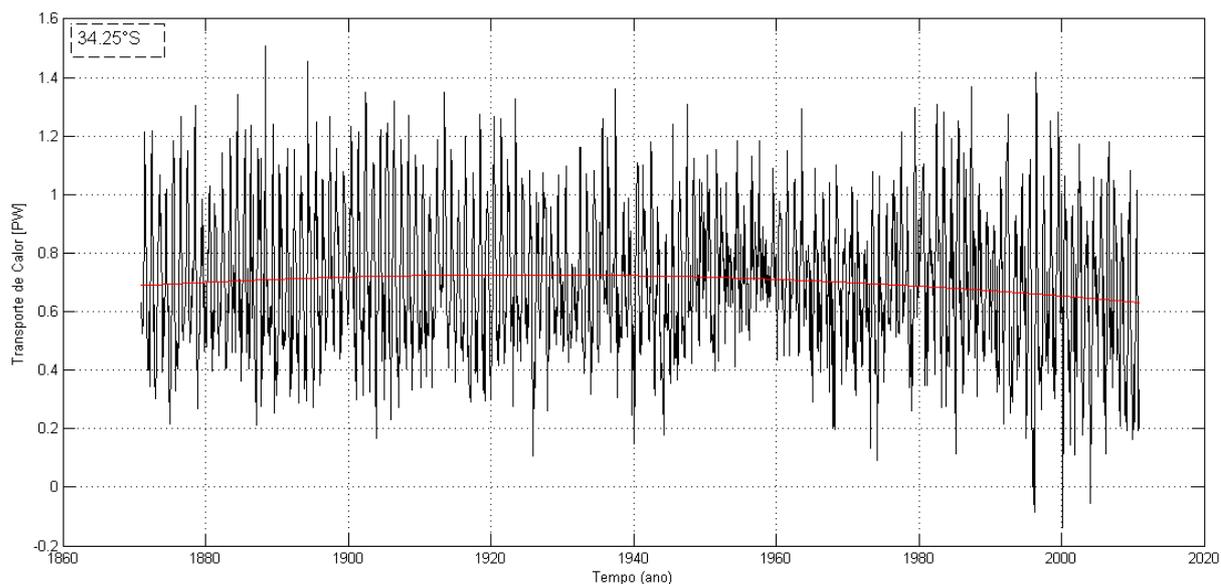


Figura 20. Série temporal do transporte de calor total da latitude de 34,25°S. A linha vermelha representa a tendência quadrática da série.

O mesmo comportamento foi notado na série de transporte de sal total nesta seção, aumentou até o início da década de 30 e depois passou a diminuir seu transporte ao longo dos anos (Figura 21). O valor máximo atingido foi de $2,7 \times 10^4$ $\text{Ton}\cdot\text{s}^{-1}$ e posteriormente uma diminuição do transporte de $144,24 \text{ Ton}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

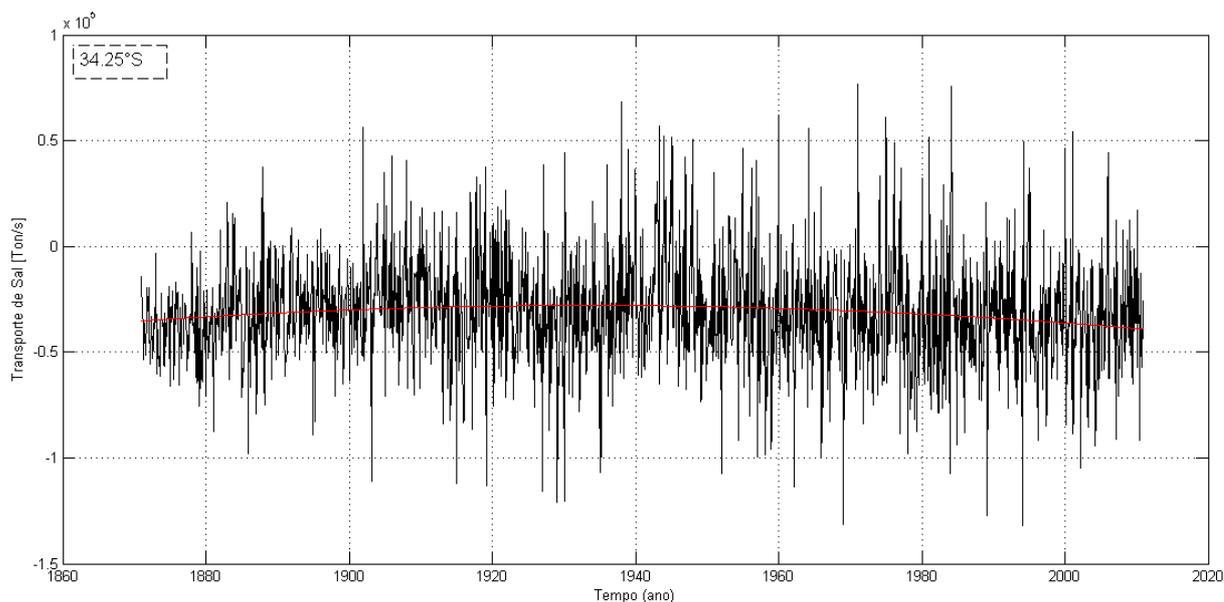


Figura 21. Série temporal do transporte de sal total da latitude de 34,25°S. A linha vermelha representa a tendência quadrática da série.

A fim de indentificar melhor a origem da variabilidade da AMOC, bem como demonstrar as mudanças das correntes das fronteiras oeste e leste e região interior,

a seção de latitude $34,25^{\circ}\text{S}$ foi dividida em três partes por possuir comportamentos muito diferentes zonalmente como mostrado na Figura 10. O contorno oeste foi definido da costa da América do Sul até $40,75^{\circ}\text{O}$ (transporte negativo/sul), a região interior até $3,25^{\circ}\text{L}$ e a da fronteira leste, até a costa da África (transporte positivo/norte).

A região de contorno oeste é composta principalmente por correntes que tem sentido sul, por isso a intensidade de seus transportes é representada por valores negativos (Figura 22). Nesta região, tendência do transporte de volume teve o seu valor máximo no início da série de $-40,82\text{ Sv}$, ou seja, houve um aumento na intensidade deste transporte ao longo dos anos e depois uma pequena diminuição. É possível notar um aumento do transporte relevante na década de 50, quando chegou a $-43,54\text{ Sv}$, por volta de uma década depois da diminuição da força da AMOC.

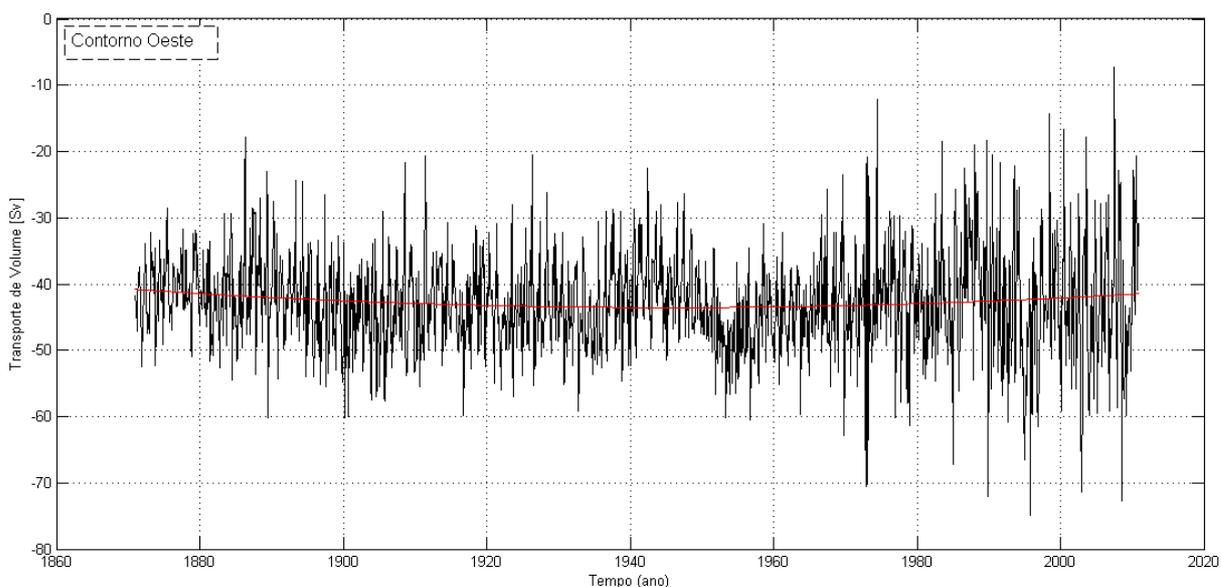


Figura 22. Série temporal referente ao transporte de volume na região do contorno oeste, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

A APAN é a corrente mais representativa da célula que rege a circulação meridional de fundo, enquanto a força da AMOC, a célula meridional da região superior. Os comportamentos opostos destas duas séries são observados, portanto. O aumento da intensidade da AMOC leva a intensificação da sua célula de circulação inferior, que é basicamente composta pela APAN e correntes de contorno oeste de sentido sul.

Na região interior houve uma diminuição muito pequena da intensidade total do transporte, mas um máximo de 12,01 Sv foi encontrado em meados da década de 30. Esta série mostrou comportamento parecido com o transporte de volume total da seção de 34,25°S (Figura 23)

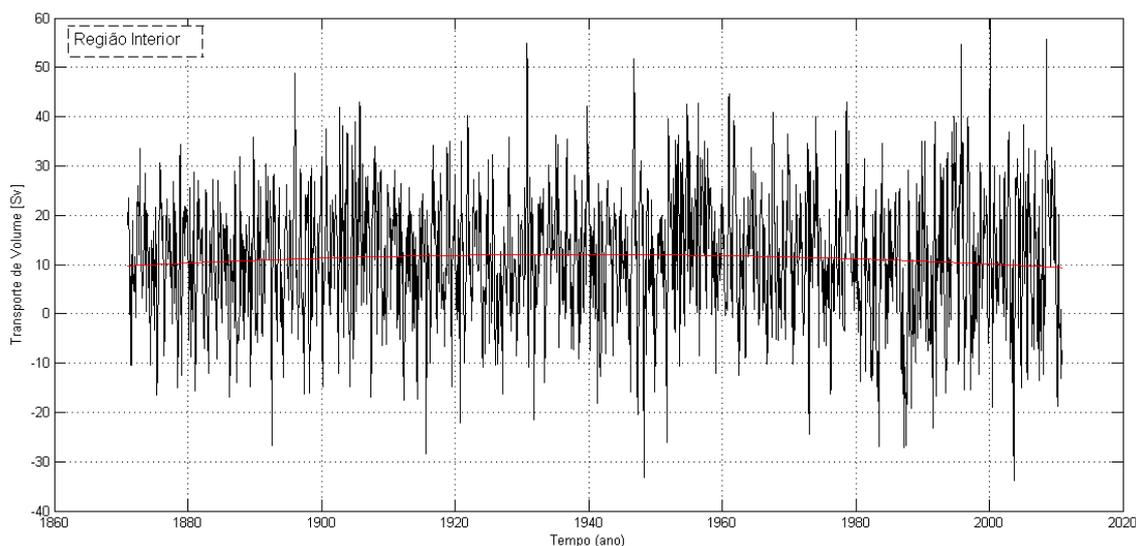


Figura 23. Série temporal referente ao transporte de volume na região interior de 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

Já a região do contorno leste apresentou um aumento muito pequeno ao longo dos 140 anos, uma variação máxima de 0,94 Sv na tendência, sendo seu valor máximo de 31,21 Sv, encontrado no final da série (Figura 24).

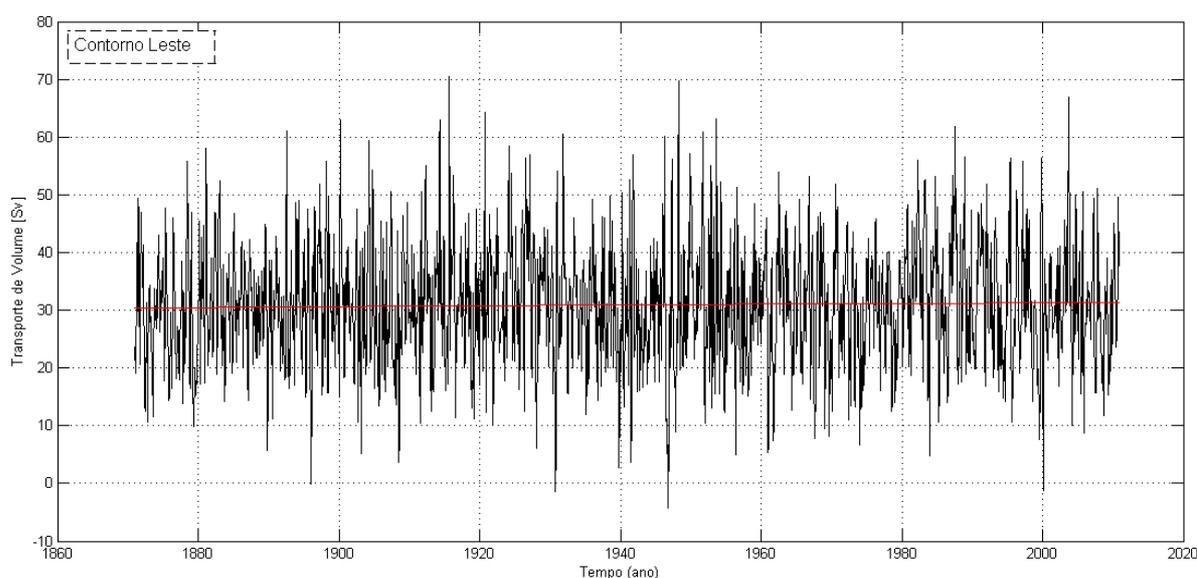


Figura 24. Série temporal referente ao transporte de volume na região de contorno leste de 34,25°S, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

As correlações entre as séries temporais de cada região com a força da AMOC não chegaram a valores significativos. A região interior resultou em correlação negativa forte com a região de contorno leste, onde 64% de sua variação pode explicar uma variação contrária a de contorno leste. E uma correlação menor positiva de 33% de sua variação relacionada a da região oeste. Estas relações foram feitas e analisadas por Dong, Garzoli e Baringer (2011). Não foram muito significativas também, mas a correlação maior foi entre a força da AMOC a região interior de 0,34. A região interior, apesar de não apresentar as importantes correntes que compõem a circulação meridional, exerce papel importante na variação das mesmas.

O transporte de calor meridional (TCM) também foi calculado pois estudos mostram que variações do transporte de calor estão correlacionadas com variações da força da AMOC (DONG; GARZOLI; BARINGER, 2011; GARZOLI; BARINGER, 2007). O SODA também apresentou correlação forte entre estas duas séries temporais, como representa a Figura 25. Análises estatísticas mostram que as variáveis apresentam uma correlação positiva 0.87, 76% de variância de ambas estão correlacionadas. Além disso, 1 Sv na força da AMOC leva ao aumento de 0,037 PW na TCM em 34,25°S, relação próxima a encontrada por Dong, Garzoli e Baringer (2011), de 1 Sv – 0,054 PW.

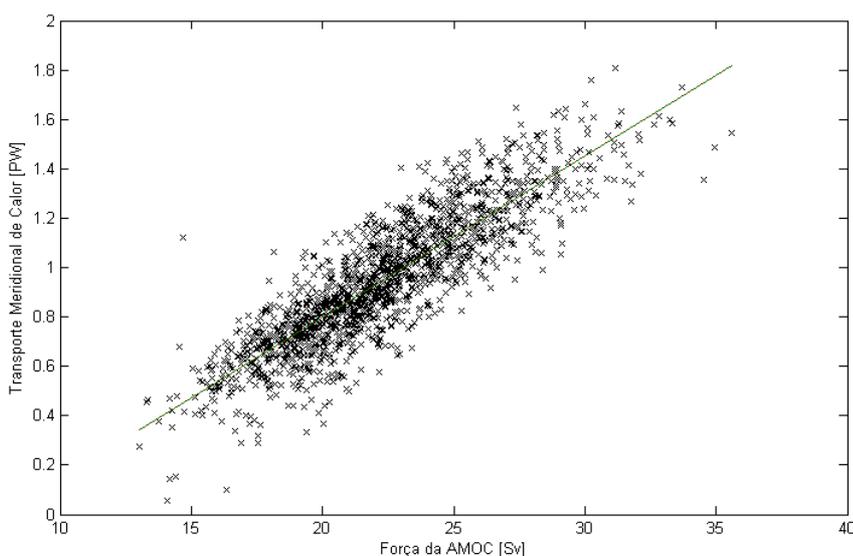


Figura 25. Gráfico de dispersão que representa a correlação da força da AMOC com o transporte de calor meridional de todos os tempos.

O transporte de calor em cada uma das regiões mostra uma variação maior ao longo do tempo e aumento médio anual muito fraco para todas as regiões divididas. A região oeste apresentou um valor de máximo de transporte de calor para o sul $-1,25$ PW correspondente ao início da série que apresentou uma diminuição deste transporte ao longo dos anos. É interessante notar o aumento do transporte no início da década de 60, chegando a $-1,31$ PW, mesma época em que houve o aumento do transporte de volume nesta região, e uma década depois que o aumento da intensidade da AMOC (Figura 26).

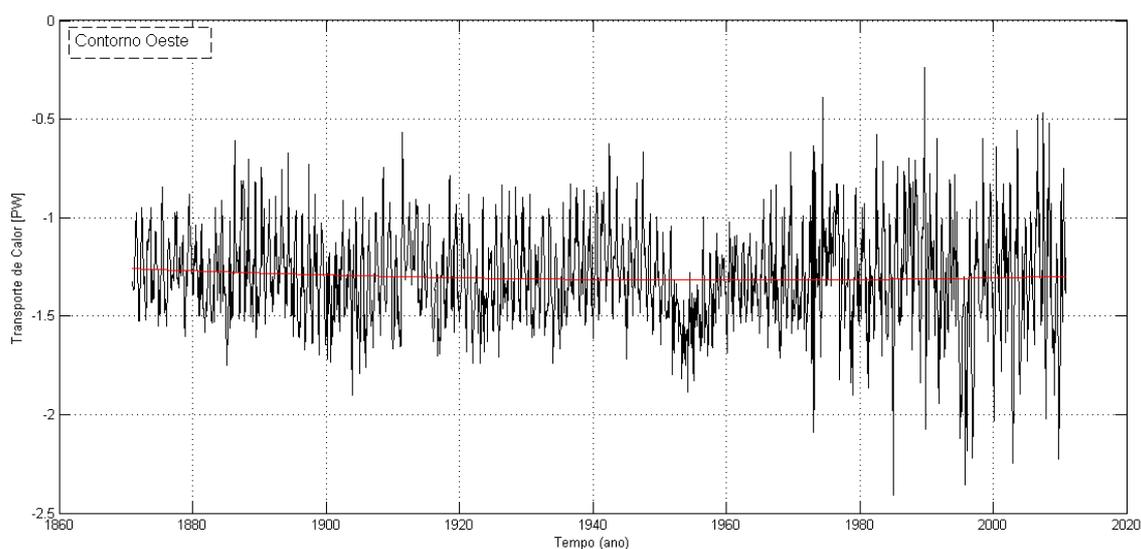


Figura 26. Série temporal referente ao transporte de calor na região de contorno oeste de $34,25^{\circ}\text{S}$, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

Na região interior o transporte de calor aumentou, sendo a tendência máxima o último valor da série que é de $0,54$ PW. Ressalta-se também, o aumento deste calor na década de 50, assim como resultado obtido para a região oeste. Houve uma redução também significativa neste transporte no final dos anos 80 (Figura 27).

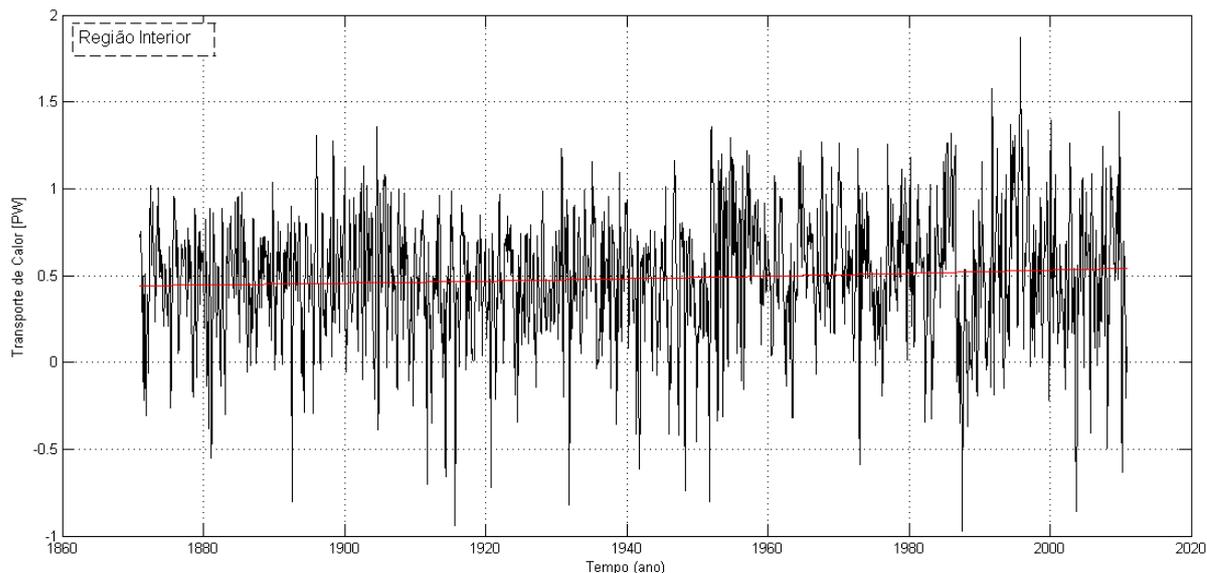


Figura 27. Série temporal referente ao transporte de calor na região interior a $34,25^{\circ}\text{S}$, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

Na região leste, o transporte de calor que atingiu seu máximo no início da década de 20 com 1,5 PW e a partir de então teve seu transporte diminuindo em 0,0002 PW ao ano, até os menores valores encontrados em 2010 (Figura 28). Porém na década de 50 é possível ver uma diminuição drástica e um aumento na década de 80, comportamento inverso dos transportes de calor encontrados na região interior.

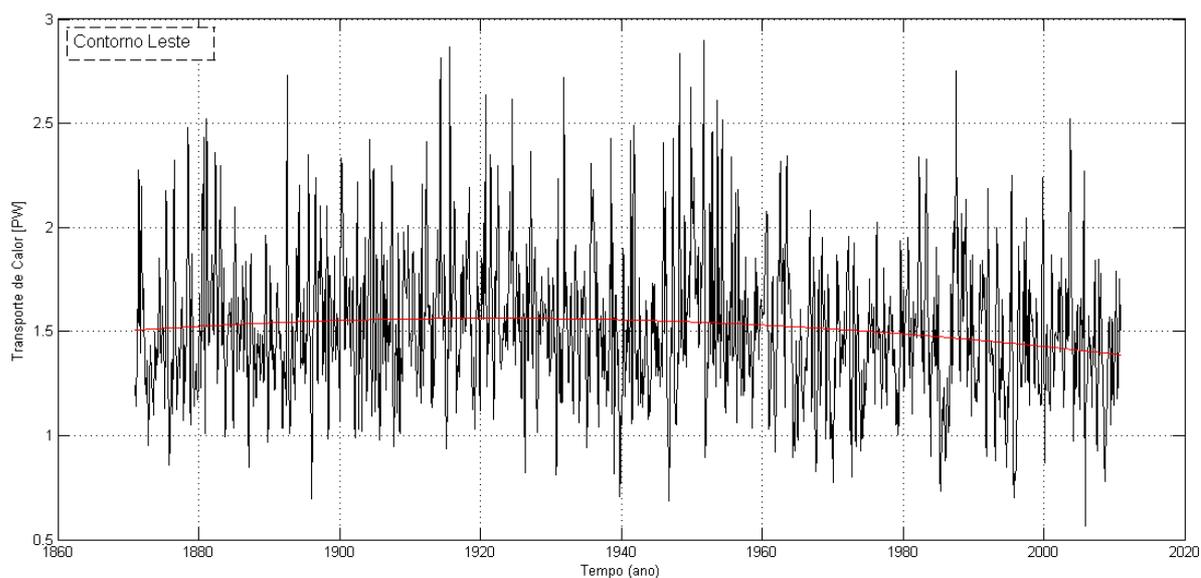


Figura 28. Série temporal referente ao transporte de calor no contorno oeste a $34,25^{\circ}\text{S}$, a linha vermelha indica a tendência quadrática da série

Os coeficientes de correlação para o transporte de calor, mostraram que a região de contorno oeste explica 33% da variação da intensidade da AMOC, ressaltando a importância da APAN e da CB como correntes chaves para o transporte de calor, no caso águas frias pela APAN e quentes da CB, na circulação meridional. Estas e as outras correlações das análises temporais estão organizadas na Tabela 3, no final desta seção.

O transporte de calor na região do contorno oeste tem seu intervalo de variação mais intensificado a partir dos anos 70 acompanhando então a maior variação deste transporte nas outras duas regiões. A região interior e a de contorno leste tem suas séries temporais de amplitudes opostas com a correlação negativa e os gráficos comprovaram. O transporte positivo de uma é compensada pelo transporte negativo da outra, sempre buscando o equilíbrio.

As séries temporais do transporte de sal para cada região da seção de $34,25^{\circ}\text{S}$ apresentaram comportamento parecido com os transportes de volume. Na região do contorno oeste o transporte de sal tem direção sul (valores negativos), diminui ao longo de todos os anos, obtendo valor máximo da tendência de $-1,4 \times 10^6 \text{ Ton}\cdot\text{s}^{-1}$ no início da série (Figura 29).

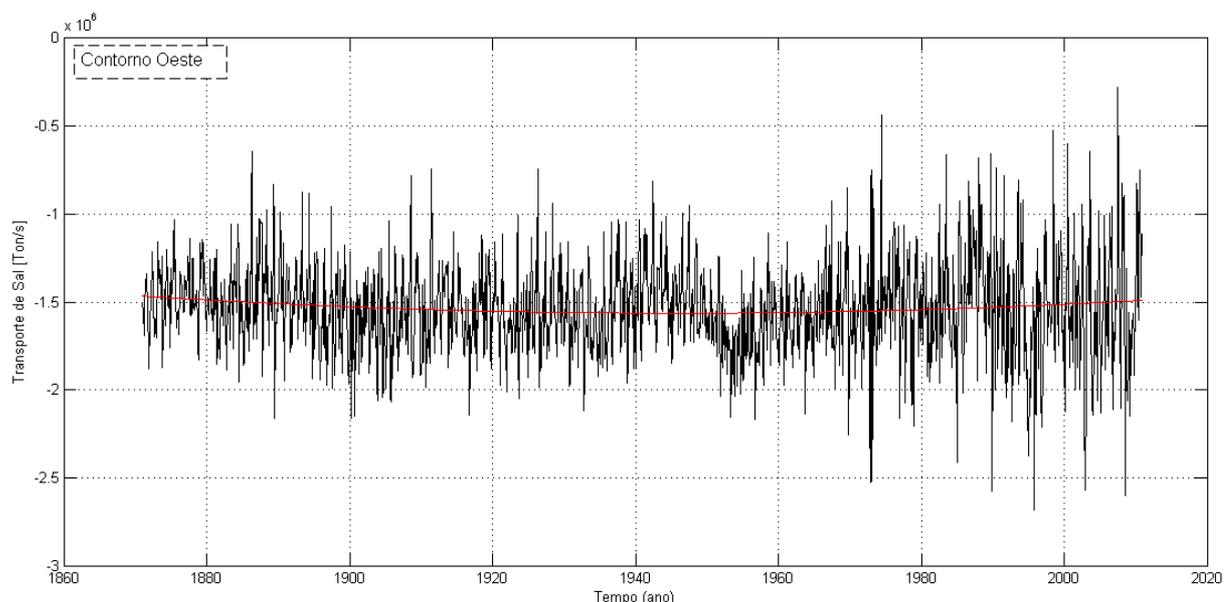


Figura 29. Série temporal referente ao transporte de sal na região do contorno oeste, a $34,25^{\circ}\text{S}$. A linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

Na região interior, assim como no transporte de volume, o de sal aumentou no final da década de 30, com o valor máximo de $0,42 \times 10^6 \text{ Ton.s}^{-1}$. A partir de então a tendência quadrática mostra uma diminuição nos valores da série (Figura 30). Na região leste o transporte de sal é mais intenso que o da região interior devido a influência da Corrente da Benguela que traz águas salinas do VA. Nesta série, houve o aumento de $4.573 \text{ Ton.s}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, sendo o valor máximo o $1,12 \times 10^6 \text{ Ton.s}^{-1}$ obtido no final da série (Figura 31).

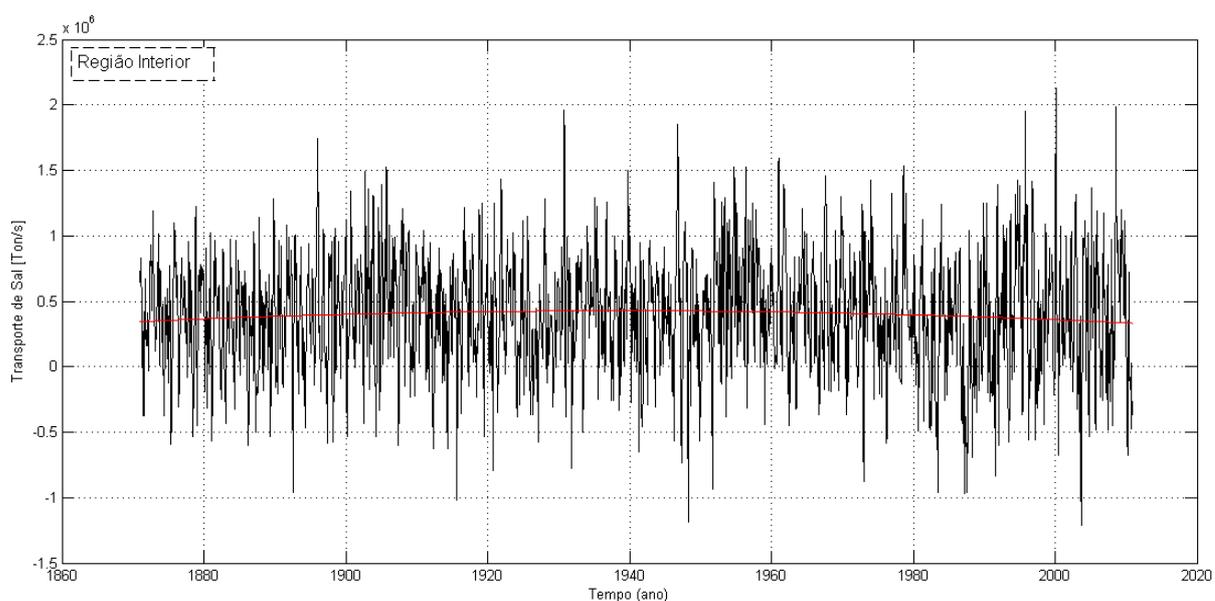


Figura 30. Série temporal referente ao transporte de sal na região do interior, a $34,25^{\circ}\text{S}$. A linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

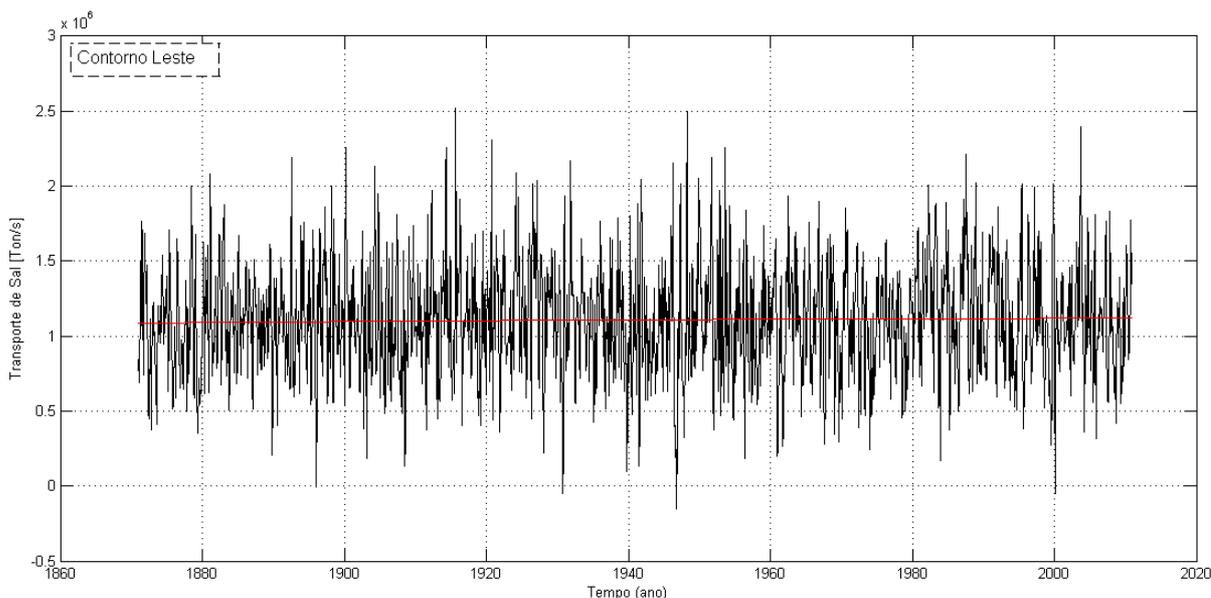


Figura 31. Série temporal referente ao transporte de sal na região do contorno leste, a 34,25°S. A linha vermelha indica a tendência quadrática da série.

É importante o monitoramento das três regiões para conseguir entender e explicar a variabilidade da AMOC. A região interior parece menos importante por não carregar as principais correntes do Atlântico Sul, mas está significativamente correlacionada as entradas de propriedades e a composição das principais águas que elas carregam em seu interior.

5.2.2. Passagem de Drake

As séries temporais referentes a longitude 65,25°O resultaram em variações menos uniformes e com mais oscilações decadais. De maneira geral, o transporte de volume aumentou ao longo dos 140 anos, e obteve um valor máximo na década de 80 e mínimo na década de 30, resultando em uma variação de 8,69 Sv (Figura 32). O aumento médio obtido por meio da tendência quadrática foi de 0,062 Sv.ano⁻¹.

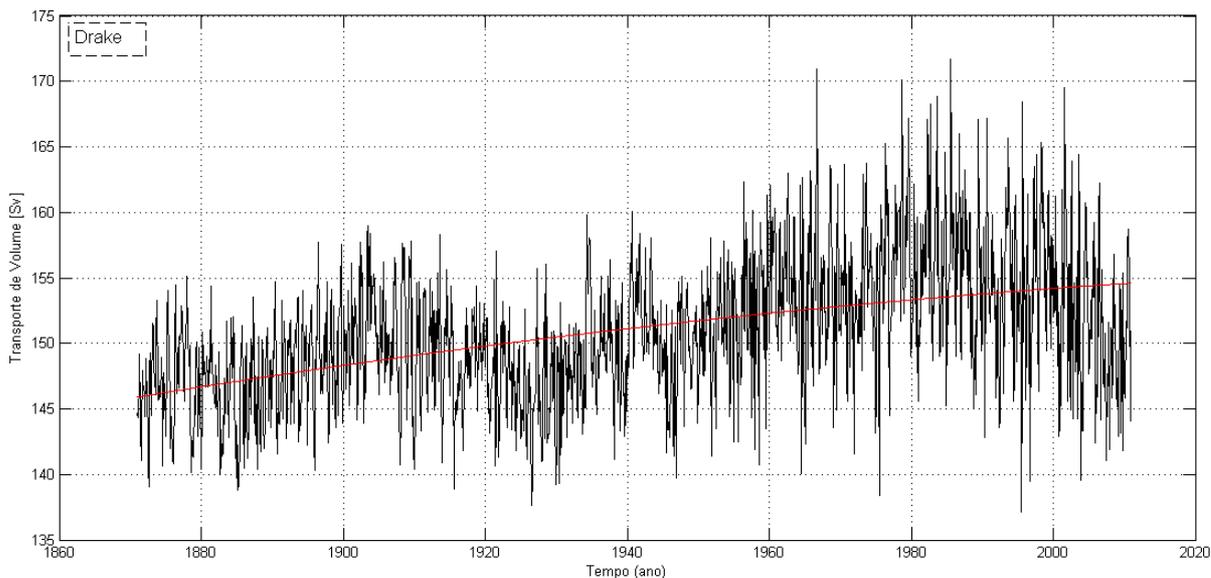


Figura 32. Série temporal do transporte de Volume na Passagem de Drake em 65,25°O. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.

O transporte de calor nesta seção (Figura 33), resultou em uma série com menos variabilidade e ainda com oscilações como a do transporte de volume. A tendência quadrática mostra uma diminuição de 0,0002 PW ao ano, com um valor máximo no início da série, 1,71 PW. Destaca-se a variação mínima que a série apresentou no final da década de 50 e que a partir dali o transporte de calor passou a aumentar 0,0005 PW.ano⁻¹.

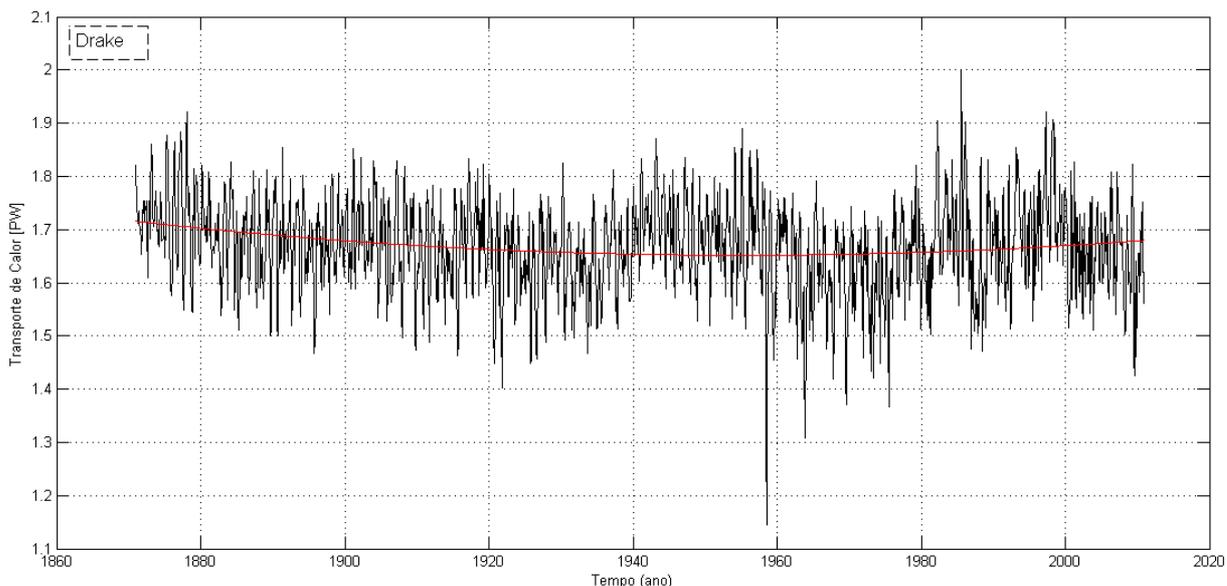


Figura 33. Série temporal do transporte de Calor na Passagem de Drake em 65,25°O. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.

A série temporal do transporte de sal de Drake mostrou comportamento muito parecido com o transporte de volume nesta seção. O aumento médio anual foi de $2,221 \text{ Ton.s}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e a variação total deste transporte foi de $3,09 \times 10^6 \text{ Ton.s}^{-1}$ (Figura 34).

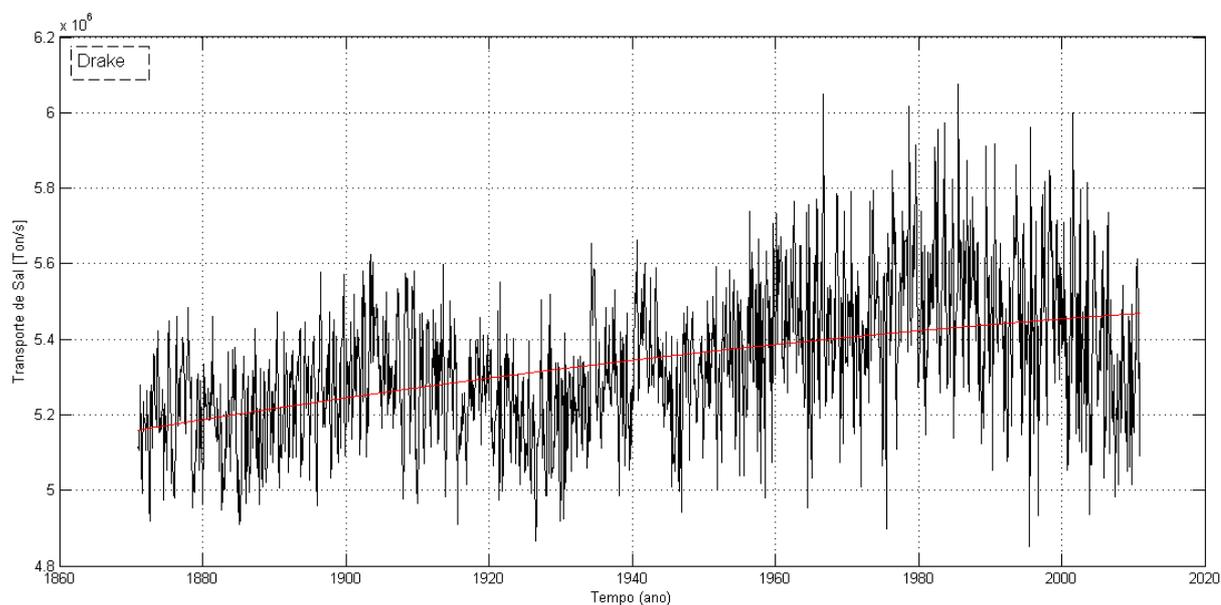


Figura 34. Série temporal do transporte de Sal na Passagem de Drake em $65,25^\circ\text{O}$. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.

5.2.3. Sul da África

As séries temporais de volume (Figura 35) e de sal (Figura 37) da seção Sul da África apresentaram comportamento similar a estas séries da seção referente a Passagem de Drake. A correlação entre estas séries resultou em 0,99 como mostra a Tabela 3 no final desta seção. A tendência do transporte de volume nesta seção mostra uma variação de $0,0622 \text{ Sv.ano}^{-1}$, com um aumento total de 8,69 Sv nos 140 anos.

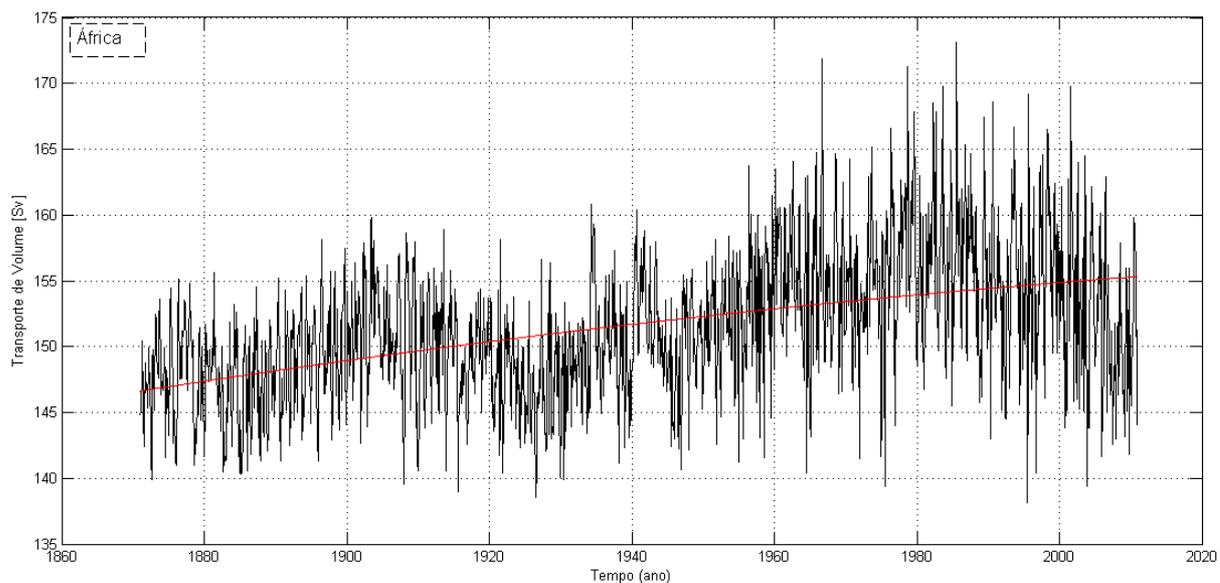


Figura 35. Série temporal do transporte de volume na seção ao sul da África, em 18,25°L. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.

Na série temporal do transporte de calor na seção de 18,25°L é possível notar um decréscimo até a década de 30, e a partir de então o aumento em uma taxa de $0,0029 \text{ PW.ano}^{-1}$ (Figura 36). O máximo do transporte da tendência é 1,11 PW como mostra o último dado da série. O interessante é que esta série possui um valor mínimo de seu transporte quando outras apresentam os valores máximos e que a partir deste passam a diminuir. Isso ocorreu com os transportes de volume e sal referentes a Passagem de Drake, transporte de sal em 34,25°S e transporte de calor da região de contorno leste.

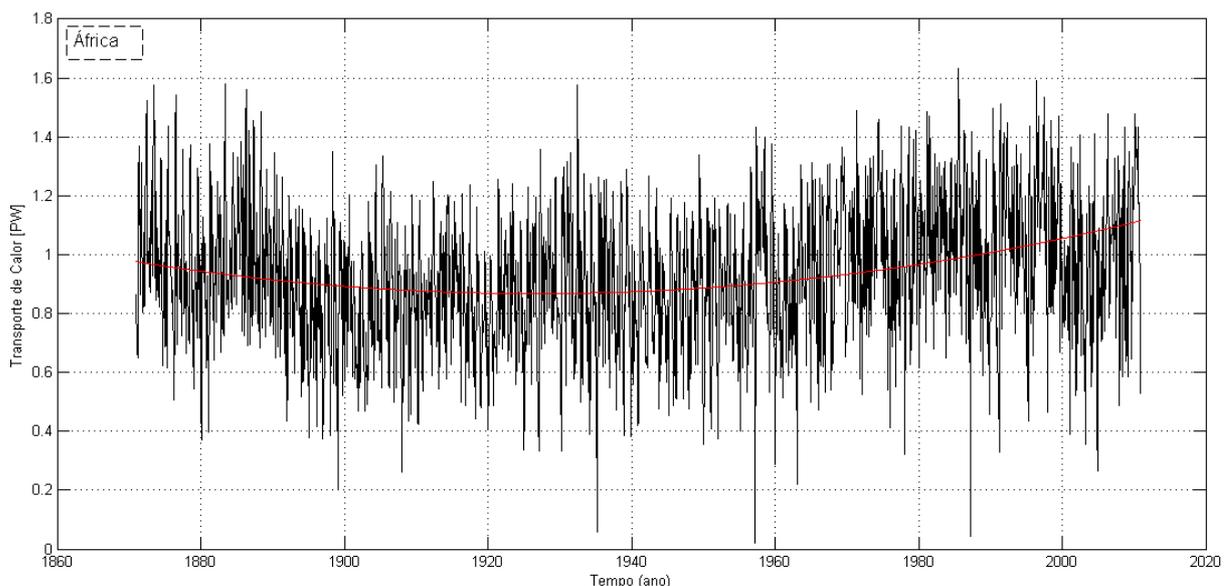


Figura 36. Série temporal do transporte de calor na seção ao sul da África, em 18,25°L. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.

O transporte de sal, como em todas as seções, obteve comportamento similar com os transportes de volume nas respectivas seções. Para a seção do sul da África, representada na Figura 37, o mesmo ocorre além da série apresentar mesmo comportamento que em Drake. O aumento anual obtido da análise da tendência quadrática foi de $2,242 \text{ Ton}\cdot\text{s}^{-1}$, muito próximo do valor obtido em Drake.

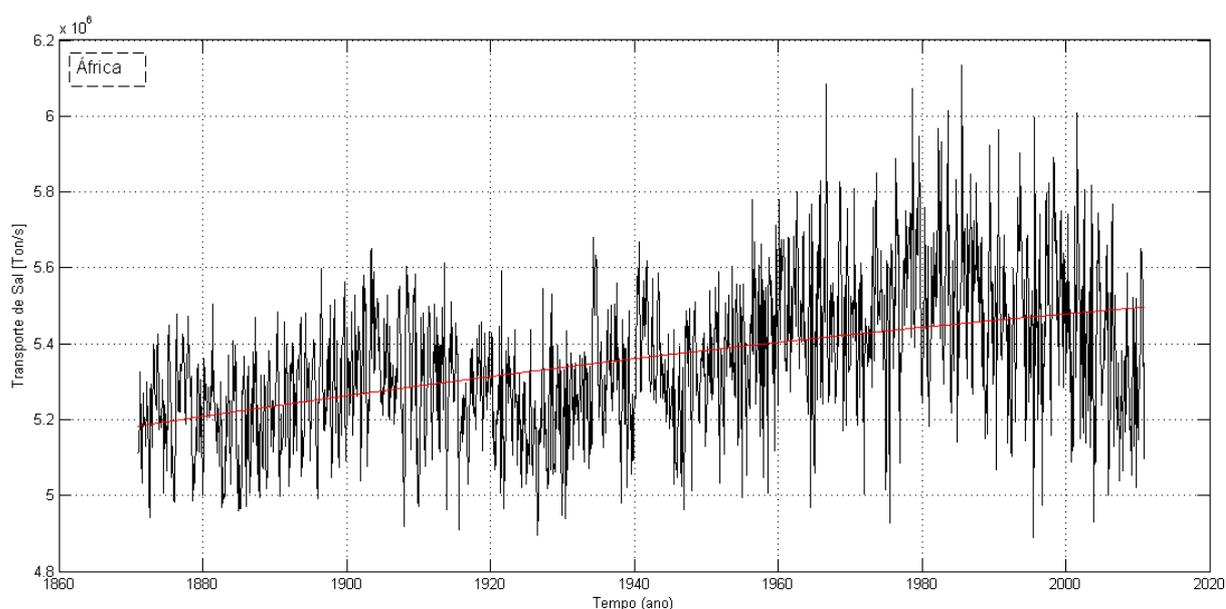


Figura 37. Série temporal do transporte de sal na seção ao sul da África, em 18,25°L. A tendência quadrática da série está representada em vermelho.

A região oeste mostrou ser uma componente muito importante para a força da AMOC e para a seção $34,25^{\circ}\text{S}$, principalmente o transporte de calor com correlação de 0,61 em relação a força da AMOC, transporte esse provado mais uma vez reger as variações desta célula de circulação. Já a região interior obteve correlações significantes provando que ela é região chave de transferência de energia das regiões de contorno.

A região de Drake e do Sul da África tiveram seus transportes significativamente correlacionados com a Força da AMOC, provando a relação das duas seções de entrada com a célula de revolvimento meridional do Atlântico Sul. Drake contribui no transporte de volume e sal e do sul da África com o transporte de calor. Todas as correlações obtidas estão organizadas na Tabela 3 que segue abaixo.

Tabela 3. Correlações entre os transportes de volume (a), calor (b) e sal (c) em cada seção. Os valores em azul apresentam significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos.

(a) T. de Volume	34.25°S	Oeste	Interior	Leste	Drake	África	F. AMOC
34.25°S	1,0000	-0,0319	0,0551	0,0251	-0,0252	-0,1467	-0,0647
Oeste	-0,0319	1,0000	-0,5761	-0,0168	0,0916	0,0996	0,3309
Interior	0,0551	-0,5761	1,0000	-0,8056	-0,1160	-0,1243	-0,1946
Leste	0,0251	-0,0168	-0,8056	1,0000	0,0744	0,0704	-0,0420
Drake	-0,0252	0,0916	-0,1160	0,0744	1,0000	0,9923	0,2775
África	-0,1467	0,0996	-0,1243	0,0704	0,9923	1,0000	0,2908
Força da AMOC	-0,0647	0,3309	-0,1946	-0,0420	0,2775	0,2908	1,0000
(b) T. de Calor							
34.25°S	1,0000	0,6167	0,0140	0,2626	0,0244	0,3259	0,8505
Oeste	0,6167	1,0000	-0,3373	0,0726	0,0314	0,2079	0,5754
Interior	0,0140	-0,3373	1,0000	-0,8071	-0,0507	0,0393	0,0955
Leste	0,2626	0,0726	-0,8071	1,0000	0,0488	0,0435	0,0965
Drake	0,0244	0,0314	-0,0507	0,0488	1,0000	0,0020	0,0043
África	0,3259	0,2079	0,0393	0,0435	0,0020	1,0000	0,3307
Força da AMOC	0,8505	0,5754	0,0955	0,0965	0,0043	0,3307	1,0000
(c) T. de Sal							
34.25°S	1,0000	-0,0128	0,0396	0,0309	-0,0186	-0,1407	-0,0206
Oeste	-0,0128	1,0000	-0,5757	-0,0168	0,0913	0,1009	0,3326
Interior	0,0396	-0,5757	1,0000	-0,8059	-0,1158	-0,1260	-0,1941
Leste	0,0309	-0,0168	-0,8059	1,0000	0,0747	0,0033	-0,0034
Drake	-0,0186	0,0913	-0,1158	0,0747	1,0000	0,9915	0,2787
África	-0,1407	0,1009	-0,1260	0,0033	0,9915	1,0000	0,2967
Força da AMOC	-0,0206	0,3326	-0,1941	-0,0034	0,2787	0,2967	1,0000

5.3. Densidade Espectral

A análise do espectro de potência foi feita para as séries temporais que representam a força da AMOC e os transportes de volume, calor e sal em cada uma das seções para reconhecer o comportamento anual destas séries. A densidade de espectro para a força da AMOC, assim como em quase todas as séries mostrou claramente sinais energéticos em dois picos, um maior representando ciclo anual e outro menor, o semi-anual, como mostra a Figura 38.

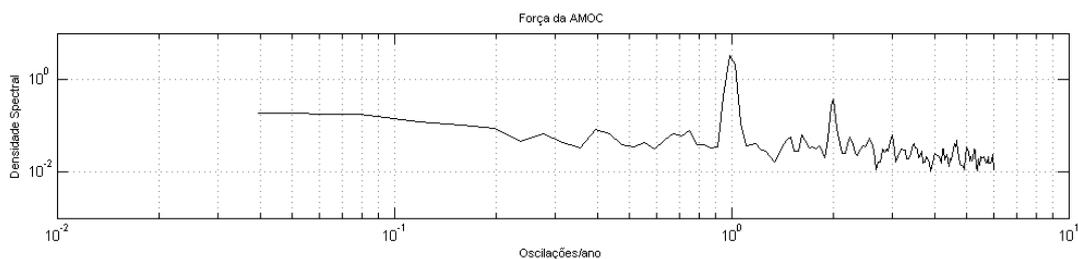


Figura 38. Estimativa da densidade espectral da séries temporal da força da AMOC.

O transporte de volume (Figura 39) em 34,25°S apresentou pico anual significativo, mas não tão intenso quanto os demais e o semi-anual não está presente, apenas os sazonais que chegam a um pico mais energético. É uma região bastante complexa, como já ressaltado nos resultados apresentados, onde existem vários módulos de variação para o transporte total da seção.

Em Drake e ao sul da África, o semi-anual está bem representado e ambos se comportam na mesma intensidade espectral. O Oceano Austral é regido pelas três frentes polares definidas anteriormente, que possuem um módulo de variação específico de acordo com a variabilidade da tensão de cisalhamento do vento em todo oceano circumpolar (DOMINGUES; GONI, 2014; ST. LAURENT et al., 2012).

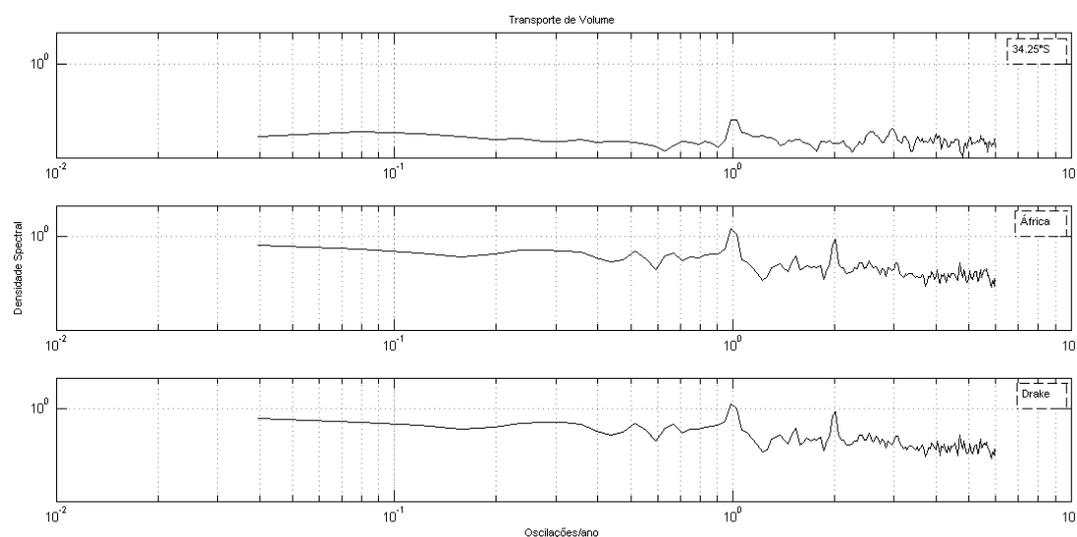


Figura 39. Estimativa da densidade espectral da séries temporais dos transportes de volume nas seções de 34,25°S, sul da África e na Passagem de Drake.

Já o transporte de calor (Figura 40) apresentou comportamentos diferentes onde o pico semi-anual está significativamente presente apenas na seção de 34,25°S. É possível notar picos sazonais nesta seção e na do sul da África, sendo

esta última mais energética, quase tão intensa quanto o ciclo anual. A região do Sul da África ($18,25^{\circ}\text{E}$), como já mostrado, tem a importante Corrente das Agulhas no seu transporte de calor, e portando a entrada do VA no Atlântico Sul. Este vazamento carrega consigo os anéis das Agulhas, altamente energéticos e responsáveis pelo transporte de calor nesta região. Estes anéis possuem uma frequência de até 9 ocorrências por ano, constatado por Lutjeharms (2006), isto pode explicar essa variação sazonal do transporte de calor nesta região.

Em Drake, nenhum ciclo intra-anual significativo foi encontrado para o transporte de calor local, que não teve muita ligação com os demais transportes de calor. Todos os transporte em $65,25^{\circ}\text{S}$ acabam limitados as variações e modulações apenas da CCA, que tem papel importante na formação de águas que atingem o Atlântico Sul, mas não sendo perceptíveis nesta seção do estudo.

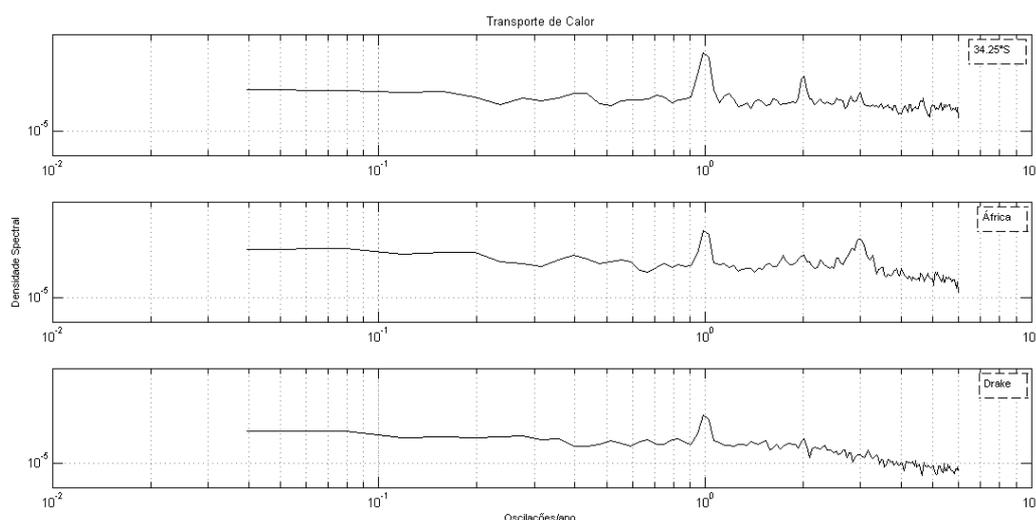


Figura 40. Estimativa da densidade espectral da séries temporais dos transportes de calor nas seções de $34,25^{\circ}\text{S}$, sul da África e na Passagem de Drake.

Na Figura 41, o espectro de potência é referente ao transporte de sal em cada uma das seções. Mais uma vez o do sul da África e de Drake possuem comportamento muito parecido, com ciclo anual e semi-anual muito visíveis. Ambos ciclos também são visíveis na latitude de $34,25^{\circ}\text{S}$, que possui espectro de potência muito similar ao que representa a força da AMOC (Figura 38).

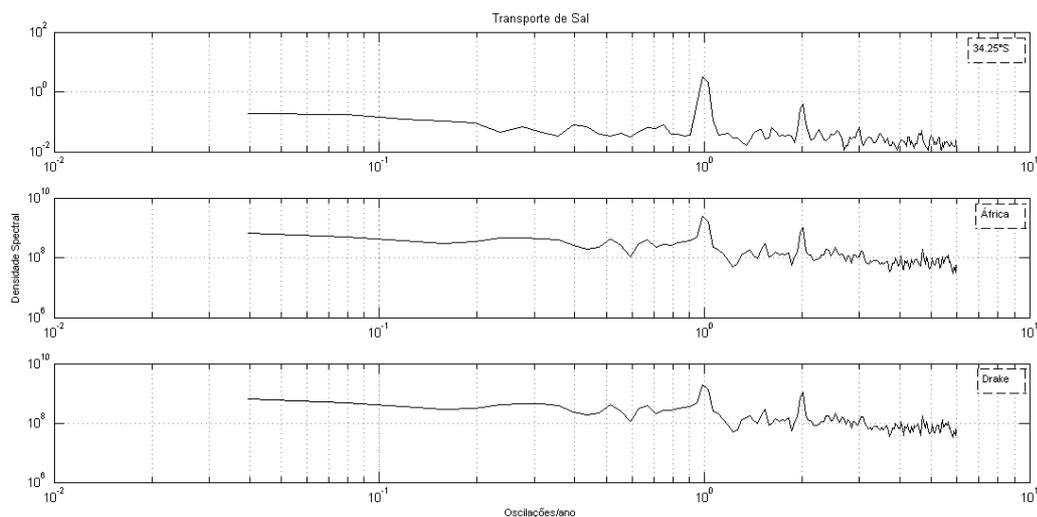


Figura 41. Estimativa da densidade espectral da séries temporais dos transportes de sal nas seções de 34,25°S, sul da África e na Passagem de Drake.

5.4. Modelos de Regressão Linear

Sabendo da presença de ciclos sazonais que as séries apresentaram na análise da densidade espectral, os modelos harmônicos nos darão uma estimativa de quando eles ocorrem e a amplitude destes picos, nos dando a intensidade do transporte. O ciclo anual será mostrado nas seções a seguir, os resíduos da série foram retirados para melhor tratamento da modelagem da tendência.

5.4.1. 34,25°S

Na análise da sazonalidade, referente a um ciclo anual da força da AMOC dois sinais foram detectados dentro de um ano de série, um anual com amplitude de 3,24 Sv que se dá por volta de junho e um semi-anual com pico de 1,09 Sv no final de dezembro (Figura 42).

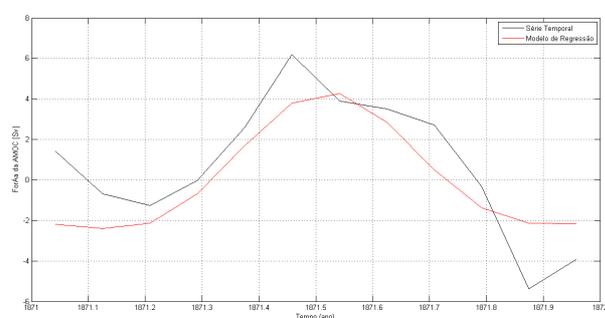


Figura 42. Modelo de regressão da série temporal da força da AMOC sem tendência quadrática.

A Figura 43 mostra a análise do modelo intra-anual da série temporal do transporte de volume nesta seção, onde foi encontrado ciclo anual com o valor máximo de 0,2 Sv em fevereiro e uma semi-anual em novembro, com uma amplitude de -0,03 Sv.

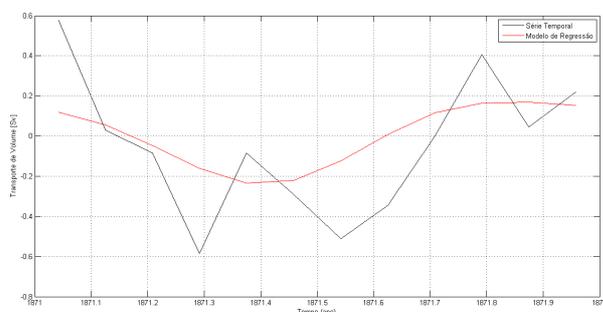


Figura 43. Modelo de regressão da série temporal do transporte de volume sem tendência quadrática em 34,25°S.

Na análise da sazonalidade da série do transporte de calor, encontrou uma variação próxima a da intensidade da AMOC (Figura 44). Um pico anual próximo a junho com uma amplitude 0,2 PW e uma semi-anual em janeiro com amplitude de 0,07 PW, próximo ao ciclo anual da força da AMOC.

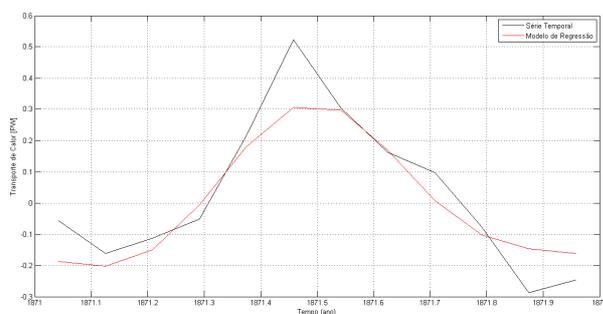


Figura 44. Modelo de regressão da série temporal do transporte de calor sem tendência quadrática em 34,25°S.

Assim como no do transporte de volume, o do transporte de sal, o pico anual próximo ao mês de fevereiro com uma variação máxima de 6,626 Ton.s⁻¹ e um semi-anual em novembro, com amplitude de 1,024 Ton.s⁻¹, como mostra a Figura 45.

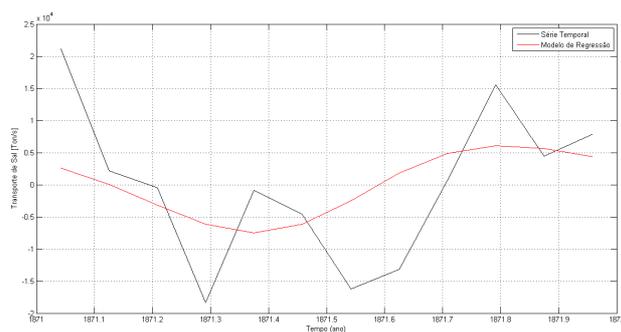


Figura 45. Modelo de regressão da série temporal do transporte de sal sem tendência quadrática em $34,25^{\circ}\text{S}$.

5.4.2. Passagem de Drake

Na análise do modelos de regressão, o sinal anual ocorre, assim como a força da AMOC, em junho e amplitude deste pico é de 1,8 Sv. O sinal semi-anual é intenso tanto quanto o anual, chegando a 1,5 Sv de amplitude ocorre perto de outubro como mostra a Figura 46.

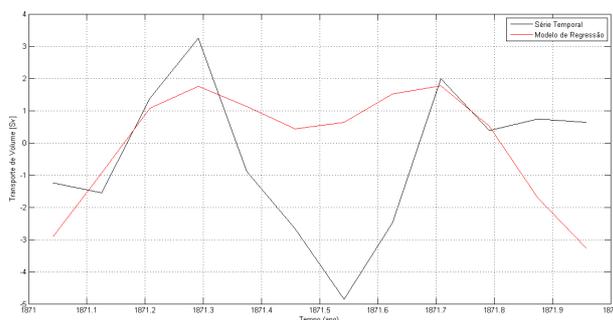


Figura 46. Modelo de regressão de 1 ano da série temporal do transporte de volume sem tendência quadrática na seção da Passagem de Drake.

Para o transporte de calor a análise do modelo de regressão mostra a ocorrência de um pico anual que ocorre em abril com a amplitude de 0,05 PW e outra em novembro com uma amplitude menor de 0,0096 PW, como mostra o gráfico da Figura 47.

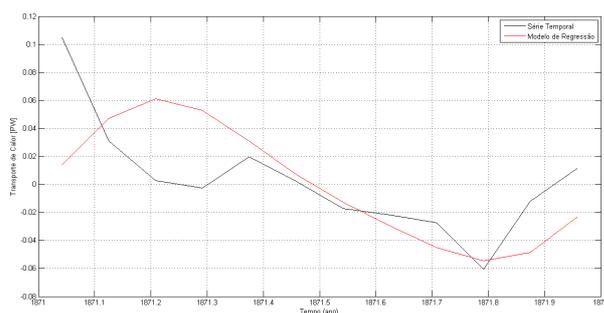


Figura 47. Modelo de regressão de 1 ano da série temporal do transporte de calor sem tendência quadrática na seção da Passagem de Drake.

O modelo de regressão para o transporte de sal também apresentou dois picos anuais e semi-anuais com amplitudes parecidas de $67,019 \text{ Ton.s}^{-1}$ e $53,293 \text{ Ton.s}^{-1}$, respectivamente nos mesmos meses que o transporte de volume (Figura 48).

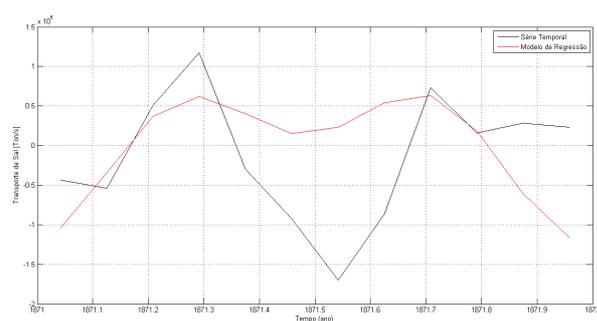


Figura 48. Modelo de regressão (em vermelho) de 1 ano da série temporal do transporte de sal sem tendência quadrática (em preto) na seção da Passagem de Drake.

5.4.3. Sul da África

A variação intra-anual para o transporte de volume na seção sul da África apresentou pico anual de $2,12 \text{ Sv}$ em junho e um pico semi-anual de amplitude $1,47 \text{ Sv}$ em outubro, assim como os transportes de volume e sal da seção em Drake.

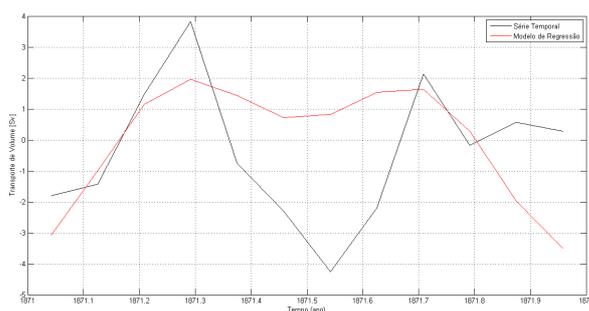


Figura 49. Modelo de regressão pra 1 ano da série temporal do transporte de volume sem tendência quadrática na seção ao sul da Africa.

O modelo harmônico do transporte de calor resultou em picos anuais de amplitude 0,14 PW e de 0,02 PW nos semi-anuais. Ambos os picos ocorrendo no mesmo período resultante do transporte de calor em 34,25°S e da força da AMOC (Figura 50).

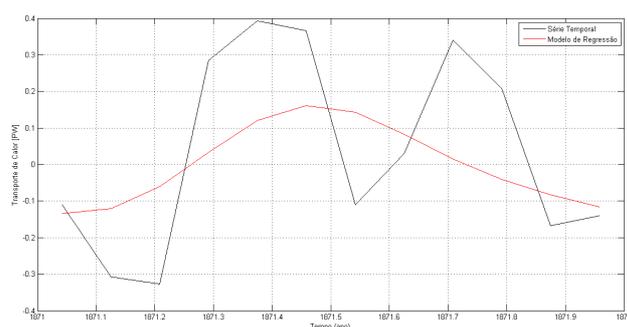


Figura 50. Modelo de regressão pra 1 ano da série temporal do transporte de calor sem tendência quadrática na seção ao sul da África.

A análise harmônica modelada resultou em um sinal anual de amplitude 77,615 $\text{Ton}\cdot\text{s}^{-1}$ e semi-anual de 52,696 $\text{Ton}\cdot\text{s}^{-1}$, nos mesmo períodos de tempo das séries dos transportes de volume e sal de Drake e volume desta seção (Figura 51).

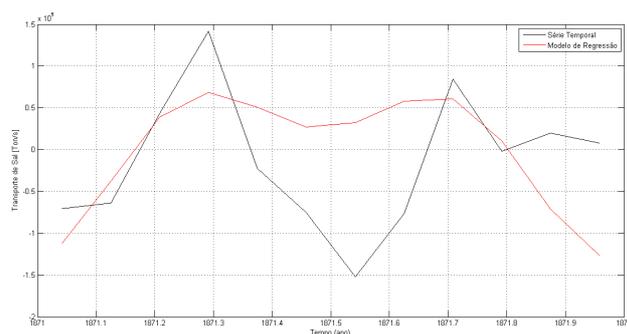


Figura 51. Modelo de regressão pra 1 ano da série temporal do transporte de sal sem tendência quadrática na seção ao sul da África.

Os valores obtidos pela análise do modelo harmônico de regressão estão na Tabela 4. De uma modo geral, a variação as séries temporais do transporte de volume e sal na Passagem de Drake a ao Sul da África apresentaram variação anual e semi-anual muito parecidas. Ambas regiões são regidas principalmente pelas mesmas forçantes que regem a intensa circulação da CCA, componente principal do Oceano Austral e responsável pelas oscilações e variabilidades temporais nas seções. Este modo de variação está ligado as oscilações que regem o oceano Austral como já comentado na análise da densidade espectral.

Tabela 4. Resultados obtidos a partir do modelo de regressão harmônica.

Transportes	Seções	Variação Anual	Anual		Semi-anual	
			Amplitude	Phi (meses)	Amplitude	Phi (meses)
Força AMOC	[Sv]	0,0197	3,2496	-5,7051	1,0914	0,1981
	34,25°S	-0,1264	0,2035	-1,2799	-0,0387	2,0386
Volume	Drake	0,0622	1,8761	5,8575	1,5000	2,8159
	África	0,0621	2,1210	5,7261	1,4758	2,8232
Calor	34,25°S	-0,0011	0,2467	-5,8779	0,0751	-0,2178
	Drake	-0,0002	0,0553	3,0314	0,0096	1,9282
	África	0,0029	0,1436	-5,9974	0,0243	-0,8290
Sal	34,25°S	-5262,9	6626,2	-1,7528	1024	1,9487
	Drake	2211	67019	5,8748	53293	2,8197
	África	2242	77615	5,7684	52696	2,8842

Porém, os transportes de calor na Passagem de Drake e no sul da África apresentaram comportamentos diferentes. O transporte de calor na África está aumentando em uma intensidade maior que a diminuição nas outras regiões. Como já foi constatado em estudos (BEAL et al., 2011; BIASTOCH; BÖNING, 2009) o transporte de calor em $18,25^{\circ}\text{L}$ tem como principal forçante a CA, portanto o aumento nesta intensidade está ligada a esta corrente, principalmente porque em Drake, a série ou ciclo anual não estão correlacionados. Além disso, este transporte tem seus sinais anuais próximos ao da força da AMOC e do transporte de calor na seção de $34,25^{\circ}\text{S}$.

A AMOC está aumentando sua intensidade assim como o transporte de calor na seção sul da África e os transportes de volume e sal desta seção. Modelos preveem o fortalecimento da AMOC devido a uma maior entrada de calor pelo VA devido a mudança na SAF (BEAL et al., 2011; BIASTOCH; BÖNING, 2013), mas nenhum dado real até hoje chegou a estimativas dos transportes de volume e calor meridionais conclusivas no Atlântico Sul, estão sempre associados a incertezas quanto a sua variabilidade. Além disso, estes estudos são mais recentes para o Atlântico Sul e possuem escala temporal pequena, apenas dos últimos anos.

Os transportes de calor de $34,25^{\circ}\text{S}$ e Drake estão diminuindo assim como os transportes de sal e volume na seção de controle da AMOC. Como já foi constatado, a força da AMOC tem sua variância explicada 72% pelo transporte de calor na seção de $34,25^{\circ}\text{S}$, então mesmo que os transportes de volume e sal não estejam aumentando juntos a intensidade da AMOC, é o transporte de calor que está contribuindo para suas mudanças.

Dos ciclos semi-anuais, como já visto nas estimativas obtidas pela análise espectral, o ciclo semi-anual dos transportes de calor da seção sul da África e de Drake, assim como o de volume na seção de $34,25^{\circ}\text{S}$ não se relacionaram com as demais além de apresentarem amplitudes muito pequenas. Interessante notar que o ciclo semi-anual do transporte de calor de Drake ocorre ao mesmo tempo que os dos transportes de sal e volume que na seção de $34,25^{\circ}\text{S}$ e são estas séries que apresentaram tendência negativas de suas séries. Mas é difícil comparar tais resultados pois os sinais energéticos de $34,25^{\circ}\text{S}$ estão sob influências das regiões

de contorno, além de ser região de entrada de movimentos de meso-escala, nos quais suas ocorrências são obtidas em intervalos de tempo menores.

5.5. Superfícies de Densidade Neutra

O cálculo dos transportes em cada isopicnal, linhas de mesma densidade, é a melhor forma de quantificar a contribuição das massas d'água em cada seção observada. Para isso, as linhas de densidade neutra foram definidas em intervalos de acordo com a bibliografia (BADIN; WILLIAMS, 2013; DONNERS; DRIJFHOUT, 2004; KUHLEBRODT; GRIESEL, 2007) e por meio da observação dos dados como os de temperatura (Figura 4), salinidade (Figuras 5 e 7) e velocidades (Figura 3) a fim de identificar as massas d'água em cada seção. A Tabela 5 mostra a definição das densidades neutras para este trabalho.

Tabela 5. Massas d'água definidas em cada seção.

Massas d'água			
34,25°S	Drake	África	σ_n
AT + ACAS	AMS	AMS	23,5 – 27,0
AIA	AIA	AIA	27,1 – 27,4
APAN	APC	APC	27,5 – 28,2
AAF	AAF	AAF	28,3 – 28,5

Ressalta-se que existem outras massas d'água definidas em cada umas dessas camadas. A definição abordada neste trabalho tem como premissa a contribuição de camadas com mesmas densidades na AMOC. As densidades neutras de McDougall e Jacket são utilizadas mais em bibliografias onde o foco do estudo são águas profundas e de fundo, nas quais não há ressurgência das mesmas e qualquer interferência com fluxos entre oceano e atmosfera (YOU, 2006).

5.5.1. Média Temporal

O gráfico da Figura 52, mostra a soma de todos os transportes referentes a cada densidade neutra para a seção de 34,25°S. A Água Tropical é encontrada nas águas de superfície, mais leves e tem seu transporte nas primeiras camadas positivo de 1,6 Sv. Assim como no gráfico do transporte integrado na profundidade, este também exibiu ruídos, que podem ser explicados pela região estar sujeita a

transportes intensos em ambas as fronteiras, além de transportes de norte e sul na sua região interior.

Contudo, o gráfico apresenta feições esperadas como o transporte para o norte das ACAS de 12,94 Sv, que tem áreas de formação no oceano Austral e Índico. A AIA, com dois picos positivos, significando a sua entrada no Atlântico das regiões polares resultou em 6,08 Sv. A APAN está muito bem representada, com seu transporte intenso para o sul de -21,36 Sv e o transporte menos intenso de 0,0911 Sv da AAF, entrando na Bacia do Atlântico sentido norte (positivo) pelas regiões mais fundas, onde a topografia permite este transporte.

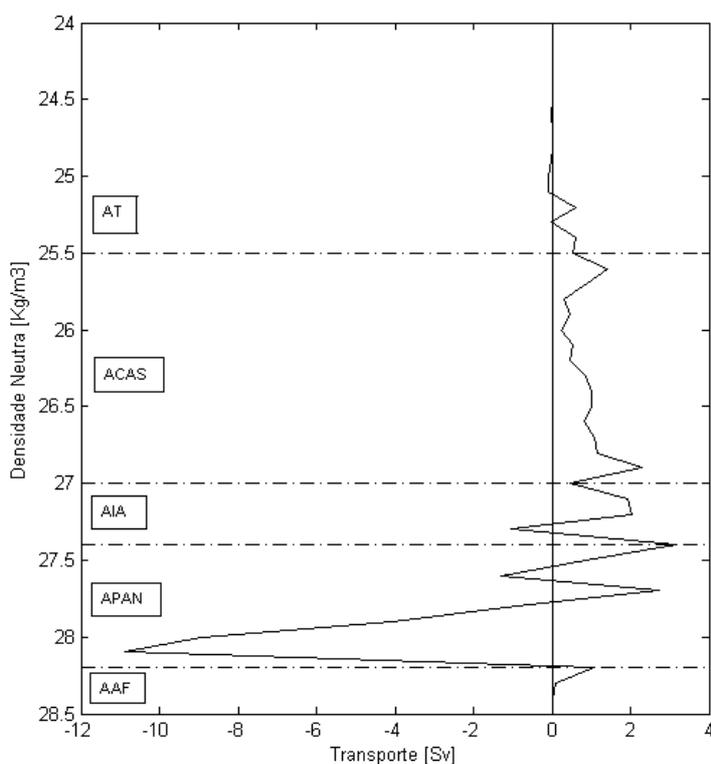


Figura 52. Transporte de volume médio em 34,25°S, somado em cada superfície de mesma densidade média correspondente.

Na seção de Drake, o transporte está bem definido, pois é regido pelas correntes circumpolares primordialmente, 108,85 Sv. O transporte em cada de densidade neutra é basicamente positivo, ou seja, sentido leste, e o volume maior é através das APCs, com a contribuição das AMS de 12,41 Sv e uma maior da AIA com 3,15 Sv, como mostra a Figura 53.

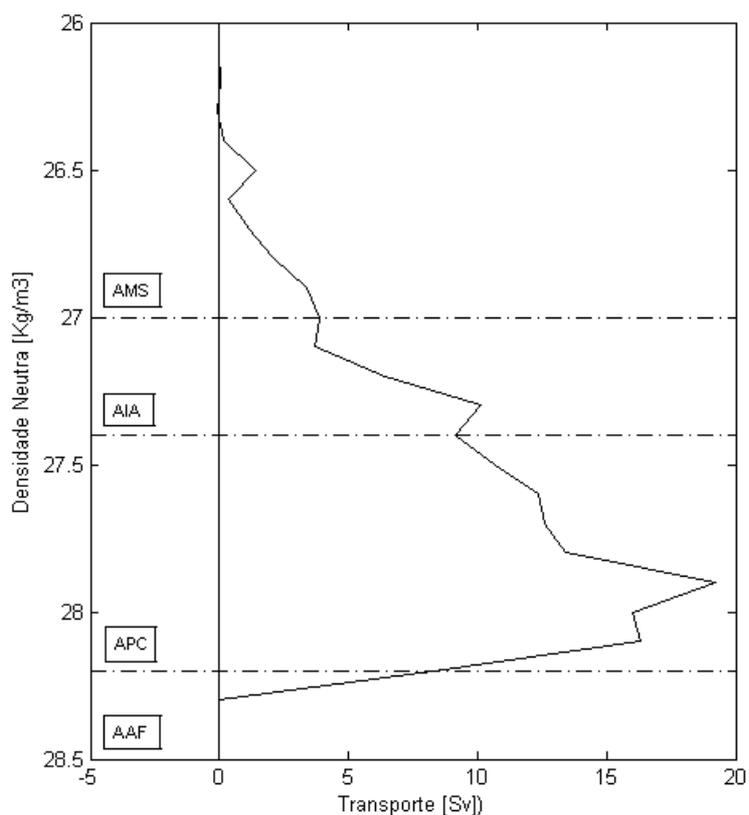


Figura 53. Transporte de volume médio em 65,25°O, somado em cada superfície de mesma densidade média correspondente.

Na seção do Sul da África (Figura 54), a APC domina o transporte com 124,16 Sv, assim como em Drake, corroborando os resultados dos transportes na seção, que é dominado por estas correntes intensas em direção leste. A AIA tem seu transporte com 17,11 Sv, mas com um pico mais fraco e difuso nesta região, pois parte dela também é transportada para leste (positivo) pela retroflexão da CA.

A AMS também teve seu comportamento difuso de apenas 2,63 Sv totais e também pode ser explicado pelos transportes que ocorrem na CCA, regidos pela tensão de cisalhamento do vento local, no entanto, águas mais leves apresentaram seu transporte positivo. A água de fundo local teve seu transporte positivo de 21,58 Sv junto ao transporte da APC.

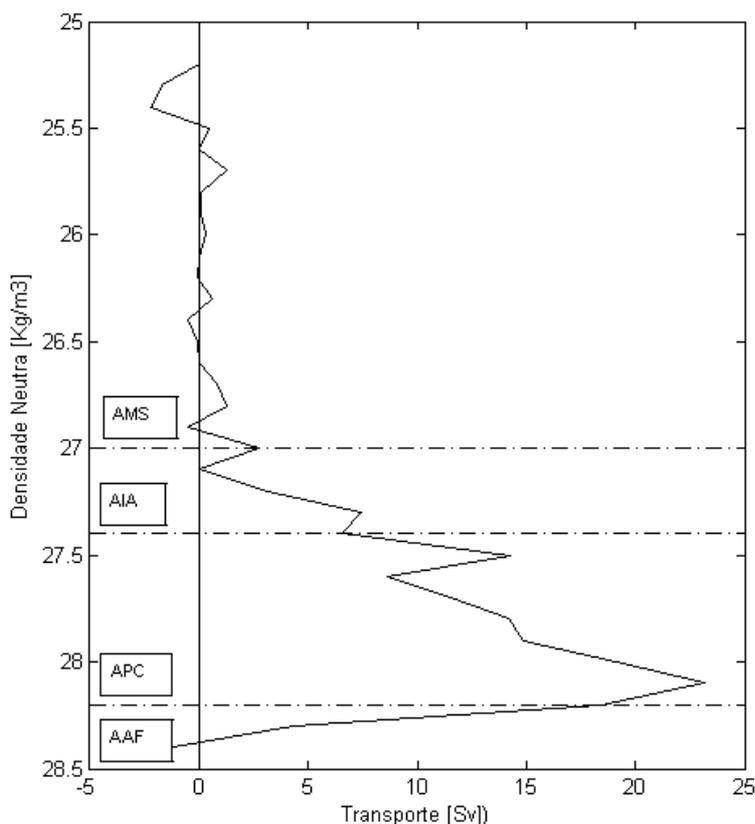


Figura 54. Transporte de volume médio em 18,25°L, somado em cada superfície de mesma densidade média correspondente.

A fim de entender a complexidade desta seção e mostrar também a contribuição do transporte de calor, o gráfico dos transportes de calor na seção de 18,25°O também foi calculado (Figura 55). Como já foi comentado, a CA está bem definida com sua contribuição de calor no sentido oeste de -0,25 PW, mas o gráfico ainda mostra a complexidade do local. A AIA teve seu transporte em 0,17 PW, mesmo contribui na CA, mas devido a sua retroflexão bem como os transportes regidos pelas frentes polares, apresenta sinal positivo com seu transporte para o oeste. Os transportes para das águas profundas já era esperado positivos e intensos com 0,96 PW e de fundo, menos intenso, com 0,04 PW.

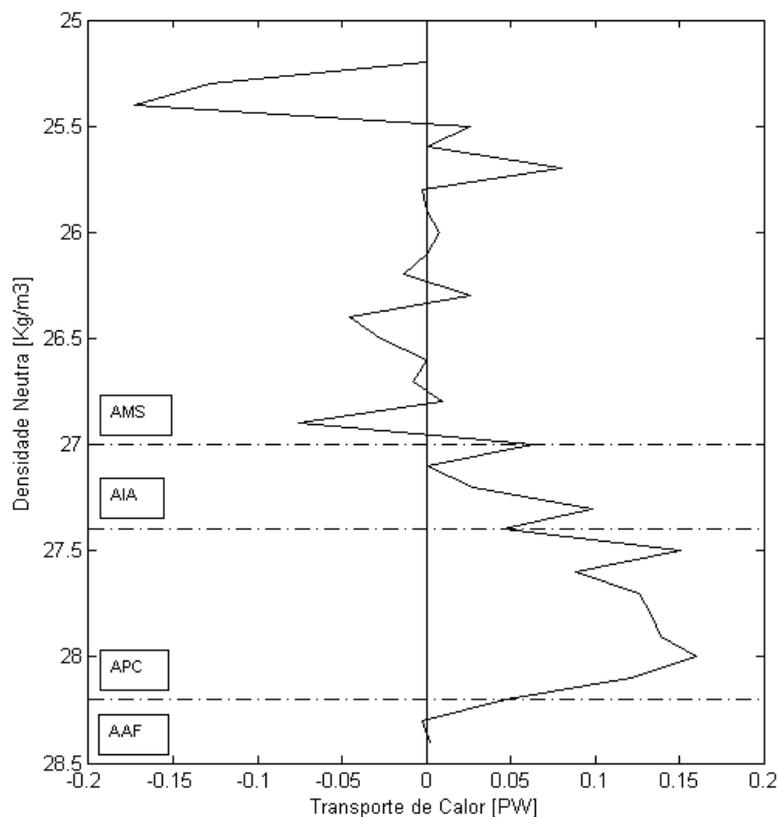


Figura 55. Transporte de calor médio em 18,25°L, somado em cada superfície de mesma densidade média correspondente.

5.5.2. Séries Temporais

Em cada camada definida, foram somados todos os transportes dentro dos intervalos definidos ao longo dos 140 anos. Com isso, as transformações das massas d'água ao longo do tempo foram estimadas, além saber qual foi a contribuição delas partindo de Drake e do sul da África na seção de 34,25°S. As Tabelas 5, 6 e 7 são os valores das correlações destas séries temporais, onde em azul os transportes são significativos em 95% e em rosa não significativos.

Tabela 5. Correlação dos transportes de volume totais em cada intervalo de densidade neutra pré-definida. Os valores em azul apresentaram significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos

Transporte de Volume	Força da AMOC	34.25°S				Drake				África				
		AT+ACAS	AIA	APAN	AAF	AMS	AIA	APC	AAF	AMS	AIA	APC	AAF	
Força AMOC	1,0000	0,7971	0,2251	-0,8635	-0,4338	-0,3228	0,3356	0,1822	0,0122	0,1551	0,2045	0,0560	-0,0634	
34.25°S	AT+ACAS	0,7971	1,0000	-0,1999	-0,8636	-0,2784	-0,2087	0,2060	0,0233	0,0100	0,1100	0,2941	-0,1324	-0,0846
	AIA	0,2251	1,0000	-0,1999	-0,2834	-0,1373	-0,1464	0,1400	0,1998	-0,0105	0,0781	-0,0762	0,1836	0,0215
	APAN	-0,8635	-0,8636	1,0000	-0,2834	0,2902	0,2502	-0,2450	-0,1121	-0,0108	-0,1648	-0,2482	0,0413	0,0710
	AAF	-0,4338	-0,2784	-0,1373	0,2902	1,0000	0,3106	-0,3216	-0,2036	-0,0051	-0,0954	-0,0308	-0,1200	-0,0838
Drake	AMS	-0,3228	-0,2087	-0,1464	0,2502	0,3106	1,0000	-0,6509	-0,2433	0,0142	-0,0289	-0,0819	-0,0236	-0,0980
	AIA	0,3356	0,2060	0,1400	-0,2450	-0,3216	-0,6509	1,0000	-0,1233	-0,0287	0,0517	0,0806	0,0561	0,2094
	APC	0,1822	0,0233	0,1998	-0,1121	-0,2036	-0,2433	-0,1233	1,0000	0,0488	0,0583	-0,0397	0,4744	0,3397
	AAF	0,0122	0,0100	-0,0105	-0,0108	-0,0051	0,0142	-0,0287	0,0488	1,0000	0,0257	-0,0217	0,0207	0,0153
África	AMS	0,1551	0,1100	0,0781	-0,1648	-0,0954	-0,0289	0,0517	0,0583	0,0257	1,0000	-0,4378	-0,3695	0,0381
	AIA	0,2045	0,2941	-0,0762	-0,2482	-0,0308	-0,0819	0,0806	-0,0397	-0,0217	-0,4378	1,0000	-0,2713	-0,0584
	APC	0,0560	-0,1324	0,1836	0,0413	-0,1200	-0,0236	0,0561	0,4744	0,0207	-0,3695	-0,2713	1,0000	-0,2713
	AAF	-0,0634	-0,0846	0,0215	0,0710	-0,0838	-0,0980	0,2094	0,3397	0,0153	0,0381	-0,0584	-0,2713	1,0000

Tabela 6. Correlação dos transportes de calor somados em cada intervalo de densidade neutra pré-definida. Os valores em azul apresentaram significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos

Transporte de Calor	Força da AMOC	34.25°S				Drake				África			
		AT+ACAS	AIA	APAN	AAF	AMS	AIA	APC	AAF	AMS	AIA	APC	AAF
Força AMOC	1,0000	0,8151	0,2002	-0,5840	-0,4308	-0,3267	0,2606	-0,5840	-0,4308	0,2492	0,0289	0,2757	-0,0531
34.25°S	AT+ACAS	0,8151	1,0000	-0,0584	-0,6929	-0,2763	-0,2271	0,1794	0,2313	0,2092	0,1428	0,2067	-0,0671
	AIA	0,2002	-0,0584	1,0000	-0,3161	-0,0977	-0,0946	0,0605	0,1182	0,0195	0,0415	-0,0720	0,1507
	APAN	-0,5840	-0,6929	-0,3161	1,0000	0,1171	0,2056	-0,1382	-0,1646	0,0079	-0,1582	-0,1017	-0,1871
	AAF	-0,4308	-0,2763	-0,0977	0,1171	1,0000	0,2913	-0,2063	-0,0853	0,0068	-0,1461	0,0918	-0,1195
Drake	AMS	-0,3267	-0,2271	-0,0946	0,2056	0,2913	1,0000	-0,3864	-0,0951	-0,0082	-0,1552	0,0791	0,0231
	AIA	0,2606	0,1794	0,0605	-0,1382	-0,2063	-0,3864	1,0000	-0,1810	0,0222	0,1007	-0,0175	0,0356
	APC	-0,5840	0,2313	0,1182	-0,1646	-0,0853	-0,0951	-0,1810	1,0000	-0,0473	0,0686	-0,0208	0,2188
	AAF	-0,4308	-0,0090	0,0195	0,0079	0,0068	-0,0082	0,0222	-0,0473	1,0000	-0,0267	0,0180	-0,0090
África	AMS	0,2492	0,2092	0,0415	-0,1582	-0,1461	-0,1552	0,1007	0,0686	-0,0267	1,0000	-0,3753	-0,0713
	AIA	0,0289	0,1428	-0,0720	-0,1017	0,0918	0,0791	-0,0175	-0,0208	0,0180	-0,3753	1,0000	-0,0707
	APC	0,2757	0,2067	0,1507	-0,1871	-0,1195	0,0231	0,0356	0,2188	-0,0090	-0,0713	-0,0707	1,0000
	AAF	-0,0531	-0,0671	0,0125	0,0678	0,0325	0,0324	-0,0175	-0,1902	0,0869	-0,0482	-0,0336	0,1561

Tabela 7. Correlação dos transportes de sal somados em cada intervalo de densidade neutra pré-definida. Os valores em azul apresentaram significância maior de 95% e os valores em rosa não são significativos

Transporte de Sal	Força da AMOC	34.25°S				Drake				África			
		AT+ACAS	AIA	APAN	AAF	AMS	AIA	APC	AAF	AMS	AIA	APC	AAF
Força AMOC	1,0000	0,7985	0,2245	-0,8649	-0,4337	-0,3218	0,3356	0,1824	0,0122	0,1612	0,2017	0,0589	-0,0636
34.25°S	AT+ACAS	0,7985	1,0000	-0,1944	-0,8654	-0,2792	-0,2118	0,2098	0,0253	0,0100	0,1206	0,2932	-0,1299
	AIA	0,2245	-0,1944	1,0000	-0,2843	-0,1359	-0,1444	0,1380	0,1997	-0,0108	0,0787	-0,0764	0,1847
	APAN	-0,8649	-0,8654	-0,2843	1,0000	0,2911	0,2508	-0,2466	-0,1130	-0,0110	-0,1708	-0,2459	-0,0383
	AAF	-0,4337	-0,2792	-0,1359	0,2911	1,0000	0,3087	-0,3204	-0,2039	-0,0051	-0,1000	0,0280	-0,1217
Drake	AMS	-0,3218	-0,2118	-0,1444	0,2508	0,3087	1,0000	-0,6472	-0,2422	0,0144	-0,0368	-0,0792	-0,0239
	AIA	0,3356	0,2098	0,1380	-0,2466	-0,3204	-0,6472	1,0000	-0,1241	-0,0287	0,0595	0,0771	0,0577
	APC	0,1824	0,0253	0,1997	-0,1130	-0,2039	-0,2422	-0,1241	1,0000	0,0612	-0,0417	-0,0407	0,4760
	AAF	0,0122	0,0100	-0,0108	-0,0110	-0,0051	0,0144	-0,0287	0,0612	1,0000	0,0255	-0,0216	0,0207
África	AMS	0,1612	0,2017	-0,0764	-0,2459	0,0280	-0,0792	0,0771	-0,0407	-0,0216	-0,4358	1,0000	0,0408
	AIA	0,2017	0,2932	-0,1299	-0,0383	-0,1217	-0,0239	0,0577	0,4760	0,0207	-0,3678	0,0408	1,0000
	APC	0,0589	-0,1299	0,1847	-0,0383	-0,1217	-0,0239	0,0577	0,4760	0,0207	-0,3678	0,0408	1,0000
	AAF	-0,0636	-0,0831	0,0204	0,0710	-0,0838	-0,0976	0,2091	0,3119	0,0152	0,0408	-0,0134	-0,2119

Os transportes de volume e sal, mais uma vez apresentaram valores parecidos, como em toda a análise deste estudo. A força da AMOC mostrou-se correlacionada significativamente com quase todas as massas envolvidas como é possível ver nas três tabelas. Cerca de 63% do transporte das águas superficiais

explicam a variância desta força e 66% é explicado pelo transporte de calor nesta seção, provando mais uma vez a importância do transporte meridional de calor para a intensidade da AMOC. Sendo a força da AMOC formada pelo transporte positivo em direção ao norte, o transporte da APAN resultou em uma correlação negativa com esta série, onde 74% do transporte profundo explica a variância da força. Já o transporte de calor da APAN obteve uma correlação menor de 34%. Esta mesma relação foi vista para as águas superficiais de 34,25°S, região que define a força da AMOC.

É interessante notar que o transporte pela AIA e APC de Drake, assim como pela AMS e AIA da seção sul da África estão correlacionadas com a força da AMOC, como já se esperava diante das contribuições destas águas para a composição das águas do Atlântico. Porém, para o transporte de calor, as águas da AMS e APC é que obtiveram uma correlação significativa para a força da AMOC, isso é explicado pela APAN, que chega ao oceano Austral e interfere no transporte da APC, como já foi descrito.

A força da AMOC e a AAF tem transporte positivo e ambas obtiveram correlação negativa significativa, onde 18% do aumento de uma explica a redução da outra. Estudos comprovam que a AAF está mais fraca diante das mudanças que a MOC tem sofrido com aumento das temperaturas dos oceanos (JOHNSON; PURKEY; TOOLE, 2008) e então a diminuição da AAF pode ser uma consequência de um aumento na intensidade da MOC do Atlântico Sul.

Uma outra observação importante é que os transportes em cada superfície neutra nas seções de Drake e sul da África apenas se correlacionaram significativamente na APC, e mesmo assim é uma relação relativamente fraca. Apesar desta circulação local ser bem definida e dos transportes de calor, suas densidades neutras variam conforme estas águas sofrem influência de outras, como a intrusão da APAN na APC em APCS e APCI. Isto prova também a importância da análise pelas camadas de densidade neutra para a análise da influência e origem das massas d'água que afetam na variabilidade da AMOC.

De uma forma geral, os transportes em cada massa d'água definida não mostrou correlações fortes. Uma correlação mais significativa, tanto das séries de transportes totais quanto nas camadas de densidade neutra, seria em seções onde

não houvessem os movimentos de meso-escala, mas ao mesmo tempo estes são fundamentais para a composição e mudanças da AMOC (BAEHR; STROUP; MAROTZKE, 2009). Além disso, seções sem menores influências da oscilação do oceano Austral provavelmente captariam feições mais importantes da entrada e trocas de águas entre os oceanos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As descrições da área de estudo bem como a quantificação dos transportes de volume, calor e sal envolvidos na Célula de Circulação Meridional do Atlântico Sul e nas seções da Passagem de Drake e Sul da África foram calculados. As principais correntes e massas d'água que compõe a AMOC foram identificadas e definidas como as correntes de contorno oeste (APAN e CB), CBe, VA, CCA, sendo os transportes de cada um estimados.

Séries temporais foram determinadas a fim de obter sinais de uma variabilidade específica tanto decenal como inter-anual e ainda captar modos de oscilação da AMOC e de cada seção. As feições mais importantes e sua variabilidade entre os anos foram comentadas de forma a obter relações, principalmente relacionadas a força da AMOC, que apresentou uma tendência positiva em sua intensidade, e a seção de 34,25°S.

As séries temporais de volume e de sal obtiveram correlações muito parecidas, indicando que o transporte de sal é regido pelo de volume. Estes transportes nas seções de Drake e sul da África apresentaram uma correlação significativa com a força da AMOC. Um comportamento diferente e de certa forma mais importante do transporte de calor foi constatado em relação a variabilidade da AMOC principalmente pela TCM estar relacionada a variância da força desta célula de recirculação.

Modos de variação anual e semi-anual foram detectados através dos espectros de densidade e foi feita uma estimativa de quando estes sinais ocorriam e quais eram os picos de variação das propriedades em questão. As oscilações foram comparadas entre as séries a fim de obter uma relação do comportamento das propriedades que entram no Atlântico Sul e afetam a variabilidade da AMOC. A força da AMOC teve seus picos anuais próximo aos do transporte de calor no sul da África e em 34,25°S.

Através das superfícies neutras, as massas d'águas foram definidas em intervalos de densidade neutra específicos para este estudo a fim de constatar a contribuição das massas d'água de cada seção do oceano Austral para a seção de

34,25°S referente a AMOC do Atlântico Sul. O transporte de calor mostrou-se importante para a intensidade da AMOC, principalmente pelo transporte da APAN e das águas superficiais de 34,25°S, que a compõem.

As contribuições das águas intermediárias e profundas vindas da seção de Drake e as de superfície e intermediárias do sul África também apresentaram significativas para a variabilidade destas águas na AMOC, como foi descrito para a área. Em todas as correlações feitas os transportes de volume e sal para as seções de Drake e do sul da África foram significativamente altas tanto para as séries temporais quanto para as oscilações anuais, pois estão localizadas no oceano Austral onde a circulação é regida por uma variação específica.

O SODA mostrou-se uma boa ferramenta para os estudos de larga-escala dos oceanos, mesmo que alguns valores encontrados para os transportes estarem superestimados aos já encontrados. Os oceanos e conseqüentemente a AMOC têm seu movimento influenciado de diversas formas como a tensão de cisalhamento dos ventos, as interações oceano-atmosfera, fluxos diapirais e os diferentes tipos de transportes, sendo que neste estudo apenas o transporte total foi utilizado para a estimativa de todos transportes.

Uma correlação mais significativa das séries de transportes totais nas camadas de densidade neutra resultaria com a análise mais apurada das características de cada massa d'água com digramas-TS, por exemplo, caracterizando melhor estas propriedades de acordo com os dados do SODA especificamente. E para todos os resultados de correlação, a escolha de seções sem influências do oceano Austral poderia captar feições mais importantes para a análise proposta neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSORGE, I. J. et al. Basin-Wide Oceanographic Array Bridges the South Atlantic. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 95, n. 6, p. 53–54, 11 fev. 2014.

BADIN, G.; WILLIAMS, R. Water-mass transformations in the Southern Ocean diagnosed from observations: contrasting effects of air-sea fluxes and diapycnal mixing. **Journal of Physical Oceanography**, 2013.

BAEHR, J.; STROUP, A.; MAROTZKE, J. Testing concepts for continuous monitoring of the meridional overturning circulation in the South Atlantic. **Ocean Modelling**, v. 29, n. 2, p. 147–153, jan. 2009.

BEAL, L. M. et al. On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. **Nature**, v. 472, n. 7344, p. 429–36, 28 abr. 2011.

BIASTOCH, A; BÖNING, C. Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. **Nature**, v. 462, n. 7272, p. 495–498, 26 nov. 2009.

BIASTOCH, A; LUTJEHARMS, J. Mesoscale perturbations control inter-ocean exchange south of Africa. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 20, p. 2000–2005, 16 out. 2008.

BIASTOCH, A.; BÖNING, C. W. Anthropogenic impact on Agulhas leakage. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 6, p. 1138–1143, 28 mar. 2013.

CARTON, J. A.; GIESE, B. S. A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). **Monthly Weather Review**, v. 136, n. 8, p. 2999–3017, ago. 2008.

CARTON, J. A.; SEIDEL, H. F.; GIESE, B. S. Detecting historical ocean climate variability. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. C2, p. C02023, 11 fev. 2012.

CUNNINGHAM, S. A.; MARSH, R. Observing and modeling changes in the Atlantic MOC. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, p. n/a–n/a, 2010.

DOMINGUES, R.; GONI, G. Wind-forced variability of the Antarctic Circumpolar Current south of Africa between 1993 and 2010. **Journal of Geophysical Research**, p. 1123–1145, 2014.

DONG, S. et al. Interannual variations in the Atlantic meridional overturning circulation and its relationship with the net northward heat transport in the South Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 20, p. L20606, 23 out. 2009.

DONG, S.; GARZOLI, S.; BARINGER, M. The Role of Interocean Exchanges on Decadal Variations of the Meridional Heat Transport in the South Atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 41, n. 8, p. 1498–1511, ago. 2011.

DONNERS, J.; DRIJFHOUT, S. The Lagrangian view of South Atlantic interocean exchange in a global ocean model compared with inverse model results. **Journal of physical oceanography**, n. 1986, p. 1019–1035, 2004.

DRIJFHOUT, S. S.; WEBER, S. L.; SWALUW, E. The stability of the MOC as diagnosed from model projections for pre-industrial, present and future climates. **Climate Dynamics**, v. 37, n. 7-8, p. 1575–1586, 26 out. 2010.

FRIOCOURT, Y.; DRIJFHOUT, S. Water mass export from Drake Passage to the Atlantic, Indian, and Pacific oceans: a Lagrangian model analysis. **Journal of physical ...**, p. 1206–1222, 2005.

GANACHAUD, A.; WUNSCH, C. Large-scale ocean heat and freshwater transports during the World Ocean Circulation Experiment. **Journal of Climate**, p. 696–705, 2003.

GARZOLI, S. L.; BARINGER, M. O. Meridional heat transport determined with expandable bathythermographs—Part II: South Atlantic transport. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 54, n. 8, p. 1402–1420, ago. 2007.

GARZOLI, S. L.; MATANO, R. The South Atlantic and the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 58, n. 17-18, p. 1837–1847, set. 2011.

GORDON, A. Inter-ocean exchange of thermocline water. **Journal of Geophysical Research: Oceans (1978)**, v. 91, n. 6, p. 5037–5046, 1986.

HOLFORT, J.; SIEDLER, G. The Meridional Oceanic Transports of Heat and Nutrients in the South Atlantic. **Journal of Physical Oceanography**, v. 31, n. 1, p. 5–29, jan. 2001.

JACKETT, D.; MCDUGALL, T. A neutral density variable for the world's oceans. **Journal of Physical Oceanography**, n. 1968, p. 237–263, 1997.

JOHNSON, G. C.; PURKEY, S. G.; TOOLE, J. M. Reduced Antarctic meridional overturning circulation reaches the North Atlantic Ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 22, p. L22601, 19 nov. 2008.

JULLION, L. et al. Circulation and Water Mass Modification in the Brazil–Malvinas Confluence. **Journal of Physical Oceanography**, v. 40, n. 5, p. 845–864, maio. 2010.

KUHLBRODT, T.; GRIESEL, A. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation. **Reviews of ...**, n. 2004, 2007.

LUMPKIN, R.; SPEER, K. Global Ocean Meridional Overturning. **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, n. 10, p. 2550–2562, out. 2007.

LUTJEHARMS, J. R. E. The Agulhas Current. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Alemanha, 2006.

MCCARTHY, G.; FRAJKA-WILLIAMS, E. Observed interannual variability of the Atlantic meridional overturning circulation at 26.5 N. **Geophysical Research Letters**, 2012.

MEINEN, C. S. et al. Temporal variability of the meridional overturning circulation at 34.5°S: Results from two pilot boundary arrays in the South Atlantic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 118, n. 12, p. 6461–6478, 3 dez. 2013.

MEREDITH, M. P. Changes in the ocean transport through Drake Passage during the 1980s and 1990s, forced by changes in the Southern Annular Mode. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 21, p. L21305, 2004.

NAVEIRA GARABATO, A. C. et al. On the export of Antarctic Bottom Water from the Weddell Sea. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 49, n. 21, p. 4715–4742, jan. 2002.

ORSI, A. H.; JOHNSON, G. C.; BULLISTER, J. L. Circulation, mixing, and production of Antarctic Bottom Water. **Progress in Oceanography**, v. 43, n. 1, p. 55–109, jan. 1999.

PEREZ, R. C. et al. Geostrophic Velocity Measurement Techniques for the Meridional Overturning Circulation and Meridional Heat Transport in the South Atlantic. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 28, n. 11, p. 1504–1521, nov. 2011.

REID, J. On the total geostrophic circulation of the South Atlantic Ocean: Flow patterns, tracers, and transports. **Progress in Oceanography**, v. 23, 1989.

RUIJTER, W. P. M. DE et al. **South Atlantic Inter-Oceanic Exchanges**. Report of the CLIVAR/OOPC/IQI Workshop. On the South Atlantic Climate Observing System (SACOS). Fevereiro, 2003.

SEND, U.; LANKHORST, M.; KANZOW, T. Observation of decadal change in the Atlantic meridional overturning circulation using 10 years of continuous transport data. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 24, p. n/a–n/a, 28 dez. 2011.

SLOYAN, B. M. et al. Antarctic Intermediate Water and Subantarctic Mode Water Formation in the Southeast Pacific: The Role of Turbulent Mixing. **Journal of Physical Oceanography**, v. 40, n. 7, p. 1558–1574, jul. 2010.

SPEICH, S.; BLANKE, B.; CAI, W. Atlantic meridional overturning circulation and the Southern Hemisphere supergyre. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 23, p. n/a–n/a, 16 dez. 2007.

SROKOSZ, M. et al. Past, Present, and Future Changes in the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 11, p. 1663–1676, nov. 2012.

ST. LAURENT, L. et al. Turbulence and Diapycnal Mixing in Drake Passage. **Journal of Physical Oceanography**, v. 42, n. 12, p. 2143–2152, dez. 2012.

STRAMMA, LOTHAR ENGLAND, M. On the water masses and mean Circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, p. 863–883, 1999.

WUNSCH, C.; HEIMBACH, P. Two Decades of the Atlantic Meridional Overturning Circulation: Anatomy, Variations, Extremes, Prediction, and Overcoming Its Limitations. **Journal of Climate**, 2013.

YOU, Y. Review of global ocean intermediate water masses: 1. part A, the neutral density surface (the “mcdougall surface”) as a study frame for water-mass analysis. **Journal of Ocean University of China**, v. 5, n. 3, p. 187–199, 2006.