Rafael Carvalho Gonçalves

Impactos de mudanças nos ventos de oeste do Hemisfério Sul no vazamento das Agulhas

Dissertação de mestrado em Oceanografia Física apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências na área de Oceanografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Edmo José Dias Campos

São Paulo

2011

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

Impactos de mudanças nos ventos de oeste do Hemisfério Sul no vazamento das Agulhas

Versão corrigida

Rafael Carvalho Gonçalves

Dissertação de mestrado em Oceanografia Física apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências na área de Oceanografia Física.

Aprovada em ____ / ____ / ____ por:

_____ Prof(a). Dr(a).	_____ Conceito
_____ Prof(a). Dr(a).	_____ Conceito
_____ Prof(a). Dr(a).	_____ Conceito

Aos meus pais, Regina e Paulo.

Sumário

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Lista de Acrônimos	viii
Lista de Figuras	x
1 Introdução	1
1.1 Hipótese Científica	6
2 Objetivo	7
3 Materiais e Métodos	8
3.1 Descrição do Modelo	8
3.2 Migração para o sul dos ventos de oeste nos dados da reanálise do NCEP/NCAR	9
4 Resultados	17
4.1 Representação da circulação do Sistema Agulhas pelo modelo	17
4.1.1 Comparação da saída do modelo com a literatura	17
4.1.2 Comparação da saída do modelo com dados de satélite	25
4.2 Migração para o sul da STF e do Sistema Agulhas	36
4.3 Intensificação superficial da AC e aumento do vazamento das Agulhas	43

5	Discussão	49
6	Conclusões	54
6.1	Sugestão para trabalhos futuros	55
	Referências Bibliográficas	57

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edmo J. D. Campos pela oportunidade dada e pela orientação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Aos professores Dr. Paulo S. Polito, Dr. Belmiro M. C. Filho, Dr. Ilson C. A. da Silveira e Dra. Sueli S. de Godoi pela dedicação nas aulas ministradas.

Aos membros da banca que examinaram o presente documento, pela atenção e sugestões fornecidas no transcorrer da apresentação.

Ao Prof. Dr. Antônio H. Fetter Filho, por me receber na Universidade Federal de Pernambuco, e ajudar na análise dos resultados.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos de sala, Augusto, Coelho, Daniel, Hermínio, João, Leilane, Marcelo, Paquito e Tom, por todas as discussões sobre oceanografia física, e por seguirmos juntos até o final.

Aos meus irmãos de 2nd Floor, Caio, Fabrício e Rafael, que sempre me ajudaram quando precisei.

Ao amigos, Alê, Ana Paula, Betinho, Carlos Eduardo (Batatinha), Carlos (Manape), Carol (Tatu), Cássia, César, Daniel Benevides, Edson, Felipe, Franzé, Gilberto, Jéssica, Juliana, Karol, Leandro, Lilian, Lucas, Luis Fernando (Rosinha), Márcio Borges, Márcio Japa, Marin, PH, Piero, Raul, Ronaldo, Sárkis, Sebastian e Wellington (Frango), pelo convívio ao longo dos últimos anos.

A todos os professores e funcionários do IOUSP e as demais pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

Ao sul da África, a Corrente das Agulhas sofre uma abrupta retroflexão, liberando anéis com águas mais quentes e mais salinas do Oceano Índico na região sudeste do Atlântico Sul. A transferência de águas do Índico para o Atlântico por meio de anéis e filamentos na região de retroflexão da Corrente das Agulhas é referida na literatura como o vazamento das Agulhas. Esse vazamento conecta os giros subtropicais do Atlântico Sul e do Índico, sendo parcialmente responsável pela alta salinidade do Oceano Atlântico. A comunicação entre esses dois giros subtropicais na área de retroflexão da Corrente das Agulhas é limitado ao sul pela Frente Subtropical, que é controlada pela posição do rotacional zero da tensão de cisalhamento do vento. Desde o final da década de 1960, os ventos de oeste do Hemisfério Sul tem sofrido uma migração em direção ao polo como reflexo da tendência positiva do índice do modo anular sul (SAM). Para investigar o impacto dessas mudanças na circulação atmosférica no vazamento das Agulhas, foi implementada uma rodada do modelo HYCOM forçada com médias mensais dos produtos de reanálise do NCEP entre 1948 e 2010. Os resultados mostram um aumento no vazamento das Agulhas de 1.14 Sv por década entre 1960 e 2010. O aumento nesse transporte interoceânico está relacionado a uma migração para o sul da Frente Subtropical, forçada pelo deslocamento para o sul dos ventos de oeste. Os resultados também mostram uma tendência positiva nos campos de altura da superfície livre e temperatura na região das Agulhas, sendo esses, consequência da migração para o sul da Frente Subtropical. A tendência positiva desses campos e o deslocamento para o sul da Frente Subtropical seguem a tendência positiva do índice da SAM, que apresenta valores mais altos durante o verão austral. Como a tendência do índice da SAM tem sido atribuída à redução na camada de ozônio e ao aumento na concentração

dos gases causadores do efeito estufa, os resultados aqui apresentados salientam as consequências das mudanças climáticas antropogênicas na distribuição de sal e calor dos oceanos.

Palavras-chave: Vazamento das Agulhas, Frente Subtropical, ventos de oeste do Hemisfério Sul.

Abstract

South of Africa, the southwestward flowing Agulhas Current retroflects abruptly, shedding rings with saltier and warmer Indian Ocean waters into the relatively colder and fresher southeast portion of the South Atlantic. This Agulhas leakage connects the South Atlantic and Indian oceans subtropical gyres, and is partly responsible for the Atlantic Ocean high salinity. The connection between Indian Ocean and South Atlantic at the Agulhas retroflexion area is limited to the south by the Subtropical Front, and is largely controlled by the location of the zero wind stress curl. Since the late 1960s, the Southern Hemisphere westerly winds have been showing a poleward shift possibly in response to the positive trend of the southern annular mode (SAM). To access the impact of these changes of the atmospheric forcing on the Agulhas leakage, an implementation of the HYCOM, forced with monthly means of NCEP/Reanalysis since 1948 was run. The results show an Agulhas leakage increase of 1.1 Sv per decade between 1960 and 2010. This inter-basin transport increase is correlated to a southward shift of the Subtropical Front, forced by the poleward migration of the westerlies. The results also show a positive trend in sea surface height and temperature at the Agulhas region as a consequence of the poleward shift of the Subtropical Front. The positive trends of these fields and the displacement of the Subtropical Front follow the positive trend of the SAM index, which has higher values during austral summer months. As the SAM index trend is been assigned to the ozone depletion and to the increase of the greenhouse gases, these results highlight the consequences of the anthropogenic atmospheric changes on the heat and salt distribution within the oceans.

Keywords: Agulhas leakage, Subtropical Front, Southern Hemisphere westerlies.

Lista de Acrônimos

AC Corrente das Agulhas (*Agulhas Current*)

ACC Corrente Circumpolar Antártica (*Antartic Circumpolar Current*)

ALACE *Autonomus Lagrangian Circulation Explorer*

AMOC Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*)

AR4 Quarto Relatório de Avaliação (*Fourth Assessment Report*)

ARC Corrente de Retorno das Agulhas (*Agulhas Return Current*)

AVHRR *Advanced Very High Resolution Radiometer*

ETOPO5 *Earth Topography at 5-degree resolution*

IPCC Painel Internacional de Mudanças Climáticas (*Intergovenmental Panel on Climate Change*)

LABMON Laboratório de Modelagem Numérica do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

NADW Água Profunda do Atlântico Norte (*North Atlantic Deep Water*)

NCEP/NCAR *National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research*

NODC *National Oceanografic Data Center*

NOAA *National Oceanic and Atmospheric Administration*

STF Frente Subtropical (*Subtropical Front*)

SAM Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode*)

SODB *Southern Ocean Database*

SSH altura da superfície do mar (*sea surface height*)

SST temperatura da superfície do mar (*sea surface temperature*)

WOA05 *World Ocean Atlas 2005 Series*

WODB *World Ocean Database*

Lista de Figuras

3.1	Superior: média do rotacional da tensão de cisalhamento do vento do NCEP/NCAR ($N.m^{-3}$) entre 1960 e 2010 e vetores da média da tensão de cisalhamento do vento ($N.m^{-2}$). Inferior: tendência linear do rotacional da tensão de cisalhamento do vento e vetores da tendência da tensão de cisalhamento do vento. As linhas preta e amarela marcam a posição do rotacional zero em 1960 e 2010, respectivamente.	11
3.2	Campo médio (superior) e tendência (inferior) entre 1960 e 2010 da componente zonal da tensão de cisalhamento do vento do NCEP/NCAR ($N.m^{-2}$) sobre os oceanos Atlântico Sul e Índico Sul.	12
3.3	Campo médio (superior) e tendência (inferior) entre 1960 e 2010 da componente meridional da tensão de cisalhamento do vento do NCEP/NCAR ($N.m^{-2}$) sobre os oceanos Atlântico Sul e Índico Sul.	13
3.4	Médias zonais da latitude do rotacional zero da tensão de cisalhamento do vento sobre o Índico Sul (entre $40^{\circ}E$ e $110^{\circ}E$, linha vermelha) e ao sul da região das Agulhas (entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, linha azul). As linhas pontilhadas indicam a tendência linear das séries. Foram eliminados os sinais com período menor que 4 anos.	14

3.5	De cima para baixo: média espacial entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $45^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$ do rotacional da tensão de cisalhamento do vento, em $N.m^{-3}$; índice do SAM considerando apenas os meses de dezembro, janeiro e fevereiro; índice do SAM considerando apenas os meses de junho, julho e agosto; índice do SAM considerando todos os meses do ano. Em vermelho (azul) estão os valores acima (abaixo) da média. Todas as séries foram filtradas com filtro passa-baixa, com frequência de corte de 4 anos. Os índices do SAM foram obtidos no site do <i>State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (China)</i>	15
4.1	Função de corrente barotrópica média, em $m^3.s^{-1}$, no período entre 1960 e 2010, ilustrando a circulação do giro subtropical do Índico Sul simulada pelo modelo.	18
4.2	Módulo da velocidade de corrente superficial, em $m.s^{-1}$ e vetores de velocidade em 25 de Janeiro de 1960. As linhas azuis indicam as seções em $30^{\circ}S$ (A), $32^{\circ}S$ (B), $35^{\circ}S$ (C) e $36^{\circ}S$ (D), apresentadas na Figura 4.3. A linha preta pontilhada indica a seção onde foi estimado o Vazamento das Agulhas. Nessa imagem, podem ser identificados os anéis das Agulhas (AA), os vórtices do Canal de Moçambique (VM) e os vórtices da Corrente Leste de Madagascar (VCLM1 para vórtice ciclônico e VCLM2 para anticiclônico). 20	
4.3	Seções de velocidade da AC em $30^{\circ}S$ (A), $32^{\circ}S$ (B), $35^{\circ}S$ (C) e $36^{\circ}S$ (D). As velocidades apresentadas são normais a seção, com valores positivos no sentido SW e negativos no sentido NE. As linhas mais espessas indicam a isolinha de $0,05m.s^{-1}$, utilizadas pra limitar a área da seção no cálculo do transporte da AC.	22

4.4	Os três gráficos superiores são mapas de SSH (metros) e mostram a liberação e evolução de um anel das Agulhas. Os gráficos inferiores mostram a estrutura do anel em 21/03/1960 (seção indicada pela linha pontilhada no mapa de SSH desta data). Na esquerda, as cores representam a componente zonal de velocidade ($m.s^{-1}$) e as linhas, a temperatura ($^{\circ}C$). Na direita, as cores representam a componente vertical de velocidade ($m.s^{-1}$) e as linhas, a salinidade.	24
4.5	Seção da componente zonal de velocidade ($m.s^{-1}$) em $20^{\circ}E$ e distribuição de temperatura (linha preta) e salinidade (linha cinza). Valores positivos (negativos) indicam fluxo no sentido leste (oeste). A linha pontilhada verde indica os limites da seção no cálculo do Vazamento das Agulhas. . .	25
4.6	Campo médio de SSH, em metros, dos dados altimétricos da AVISO (em cima) e da saída do modelo (embaixo).	27
4.7	Desvio padrão de SSH, em metros, dos dados altimétricos da AVISO (em cima) e da saída do modelo (embaixo).	28
4.8	Trajetórias médias do Sistema Agulhas (corrente + retroflexão + corrente de retorno), calculadas a partir da SSH da AVISO (linha branca) e do modelo (linha vermelha), plotadas sobre o mapa topográfico da região. . .	29
4.9	Componentes zonal (esquerda) e meridional (direita) das velocidades geostróficas barotrópicas médias, em $m.s^{-1}$ calculadas a partir da SSH dos dados altimétricos da AVISO (superior) e do modelo (inferior).	29
4.10	Curvas de regressão entre campos de SSH simulados e os campos de SSH dos dados altimétricos da AVISO, onde r é coeficiente de correlação e C.A. é o coeficiente angular da reta. O gráfico superior mostra o mês com maior coeficiente de correlação ($r=0,89$) dos 212 meses avaliados, enquanto que o gráfico do meio apresenta o mês com menor coeficiente de correlação ($r=0,78$). O gráfico inferior apresenta a curva de regressão entre os campos médios de SSH entre outubro de 1992 e dezembro de 2010.	31
4.11	Campo médio de SST, em $^{\circ}C$, dos dados radiométricos do Pathfinder (em cima) e da saída do modelo (embaixo).	33

4.12	Desvio padrão de SST, em $^{\circ}C$, dos dados radiométricos do Pathfinder (em cima) e da saída do modelo (embaixo).	34
4.13	Curvas de regressão entre campos de SST simulados e os campos de SST dos dados radiométricos do Pathfinder, onde r é coeficiente de correlação e C.A. é o coeficiente angular da reta. O gráfico superior mostra o mês com maior coeficiente de correlação ($r=0,97$) dos 264 meses avaliados, enquanto que o gráfico do meio apresenta o mês com menor coeficiente de correlação ($r=0,89$). O gráfico inferior apresenta a curva de regressão entre os campos médios de SST entre janeiro de 1985 e dezembro de 2006.	35
4.14	Tendência linear da SSH entre 1960 e 2010 ($metros.ano^{-1}$). Os contornos representam o campo médio da SSH, em metros, no período, e as linhas mais espessas indicam a isolinha de $SSH = 0$ em 1960 (preto) e 2010 (amarelo).	37
4.15	Tendência linear da SST (prof.= 0 metros) e temperatura nas profundidades de 200, 500 e 1000 metros, entre 1960 e 2010 ($^{\circ}C.ano^{-1}$). Os contornos representam o campo médio da SST no período. As linhas mais espessas indicam as isotermas de $13^{\circ}C$ (prof. = 0 metros), $12^{\circ}C$ (prof. = 200 metros), $6^{\circ}C$ (prof. = 500 metros) e $3,5^{\circ}C$ (prof. = 1000 metros) em 1960 (preto) e em 2010 (amarelo). As linhas tracejadas indicam as seções das Figuras 4.16 e 4.17.	38
4.16	Tendência linear de temperatura ($^{\circ}C.ano^{-1}$) em uma seção na longitude de $25^{\circ}E$. As linhas mais finas são a média da componente zonal de velocidade ($m.s^{-1}$), com valores positivos indicando sentido de oeste para leste. As linhas mais espessas indicam as isotermas ($^{\circ}C$) em 1960 (preto) e em 2010 (amarelo).	38
4.17	Mesmo que a Figura 4.16, mas para uma seção em $20^{\circ}E$	39

4.18	Mapas de correlação entre o vento (rotacional e componentes zonal e meridional) e as médias espaciais dos campos de SSH (A, C e E, respectivamente) e SST (B, D e F, respectivamente) entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$. As linhas mais espessas pretas indicam os valores críticos para o nível de significância de 95% (0,56). Nas séries temporais utilizadas, foram removidos a tendência linear e os sinais com período menor que 4 anos.	40
4.19	De cima para baixo: índice do SAM considerando apenas os meses de dezembro, janeiro e fevereiro; média espacial entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $45^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$ do rotacional da tensão de cisalhamento do vento, em $N.m^{-3}$; média espacial de SSH entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$, em metros; média espacial de SST entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$, em $^{\circ}C$. Em vermelho (azul) estão os valores acima (abaixo) da média. Todas as séries foram filtradas com filtro passa-baixa, com frequência de corte de 4 anos.	41
4.20	Médias zonais (entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$) das latitudes do rotacional zero do vento (A), da SSH zero (B) e da isoterma de $13^{\circ}C$ (C). Foram eliminados os sinais com período menor que 4 anos. Em vermelho (azul) estão os valores acima (abaixo) da média.	42
4.21	Tendência linear da energia cinética turbulenta entre 1960 e 2010 (em $m^2.s^{-2}.ano^{-1}$). Os contornos representam o campo médio. As linhas tracejadas indicam as seções das Figuras 4.22 e 4.23.	44
4.22	Tendência linear de energia cinética turbulenta (em $m^2.s^{-2}.ano^{-1}$) em uma seção na longitude de $25^{\circ}E$. As linhas mais finas mostram a média da componente zonal de velocidade (em $m.s^{-1}$), com valores positivos indicando sentido de oeste para leste. As linhas mais espessas indicam as isolinhas de energia cinética turbulenta (em $m^2.s^{-2}$) em 1960 (preto) e em 2010 (amarelo).	44
4.23	Mesmo que a Figura 4.22, mas para uma seção em $20^{\circ}E$	45

4.24	Transporte calculado nas seções A (azul), B (vermelho), C (preto) e D (verde), ilustradas nas Figuras 4.2 e 4.3. Na esquerda, estão as séries de transporte em toda a coluna d'água, enquanto que na direita, estão as séries de transporte calculadas entre a superfície e a profundidade de 200 metros. As linhas pontilhadas indicam a tendência linear de cada curva.	46
4.25	Transporte da AC e vazamento das Agulhas (ambos em Sv) calculados a partir da integral da componente zonal da velocidade na seção em $20^{\circ}E$, apresentada nas Figuras 4.2 e 4.5. A seção é limitada meridionalmente pelo continente africano e pela latitude de $42^{\circ}S$, e limitada verticalmente pela profundidade de 1300 metros. Os sinais com período menor que 4 anos foram removidos das séries. As linhas pontilhadas indicam as tendências lineares de cada série.	48

Capítulo 1

Introdução

A circulação oceânica global promove as trocas de água entre as bacias oceânicas de todo o planeta, influenciando o clima, a distribuição de propriedades físico-químicas e a biota dos oceanos. A circulação das regiões subtropicais é caracterizada pela presença de grandes giros anticiclônicos, cujas dimensões horizontais são comparáveis às das próprias bacias oceânicas, se estendendo da superfície até aproximadamente 1 km de profundidade. Essas feições de larga escala são referidas como giros subtropicais, e são forçadas pelos padrões de larga escala do rotacional da tensão de cisalhamento do vento entre os ventos alísios e os ventos de oeste, em latitudes médias. No Hemisfério Sul, o limite sul dos giros subtropicais é delineado pela Frente Subtropical (*Subtropical Front*) (STF), entre aproximadamente $40^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$.

Ao sul do continente africano, a STF encontra-se em aproximadamente $42^{\circ}S$, enquanto que a extremidade da plataforma continental da África do Sul não ultrapassa a latitude de $37^{\circ}S$. O espaço entre a STF e o continente permite a comunicação dos giros subtropicais do Índico Sul e do Atlântico Sul, que ocorre por um transporte de águas do primeiro para o segundo. Esse fluxo é promovido através da emissão de vórtices anticiclônicos e filamentos pela corrente de borda oeste do giro subtropical do Índico Sul, a Corrente das Agulhas (*Agulhas Current*) (AC) (Lutjeharms, 2006). Os vórtices anticiclônicos, denominados anéis das Agulhas, são liberados na retroflexão da AC, e são responsáveis pela maior parte desse transporte interoceânico,

que devido ao seu carácter intermitente, é conhecido como vazamento das Agulhas.

Apesar de representar apenas entre 10 e 20% do transporte da AC, o vazamento das Agulhas constitui uma das principais fontes de água para o Atlântico Sul, representando entre 30 e 50% do transporte de seu giro subtropical (Gordon e Lutjeharms, 1987; Gordon et al., 1992; De Ruijter et al., 1999). Dessa forma, considerando o campo médio das correntes, os giros subtropicais do Índico Sul e do Atlântico Sul estão fundidos em um super-giro subtropical (De Ruijter et al., 1999). Alguns trabalhos mais recentes incluem o giro subtropical do Pacífico Sul ao super-giro devido a uma conexão do primeiro com o Índico, ao sul da Austrália (Cai et al., 2005; Cai, 2006; Speich et al., 2007; Beal et al., 2011).

As correntes de borda leste dos giros subtropicais transportam águas frias de maiores latitudes em direção ao equador, enquanto que as correntes de borda oeste carregam águas mais quentes das regiões tropicais em direção aos polos. A intrusão das águas quentes da AC na região sudeste do Atlântico Sul contribui fortemente para uma peculiaridade desta bacia oceânica: ela é a única cujo transporte líquido de calor é em direção ao equador. O transporte de calor para o Hemisfério Norte é feito pela Corrente Norte do Brasil, que percorre a costa NE/N do Brasil e abastece o giro subtropical do Atlântico Norte.

As águas transportadas pela AC apresentam maior salinidade que as águas do sudeste do Atlântico Sul, e com isso, o vazamento das Agulhas é também responsável por um transporte de sal para esta bacia oceânica. Este acréscimo de sal é também transferido para o Hemisfério Norte pela Corrente Norte do Brasil, e provavelmente tenha influência na alta salinidade das águas da termoclina do Atlântico em relação à do Pacífico (Gordon et al., 1992). Provavelmente, o transporte de calor promovido pelo vazamento das Agulhas, mencionado anteriormente, também contribua com a alta salinidade do Atlântico, pois nesse oceano, a evaporação excede a precipitação e a descarga fluvial (Warren, 1983; Gordon e Piola, 1983; De Ruijter et al., 1999).

Desta forma, o vazamento das Agulhas desempenha um papel fundamental na circulação termohalina global (Gordon, 1986). A alta salinidade do Atlântico é um dos fatores determinantes para a formação da Água Profunda do Atlântico Norte (*North Atlantic Deep Water*) (NADW); uma massa de água que é formada nas regiões subpolares do Atlântico Norte durante o inverno boreal, e ocupa as regiões profundas de praticamente todas as bacias oceânicas. No inverno, as águas mais superficiais perdem calor pra atmosfera, ganham densidade, gerando um processo de convecção profunda. Este processo não ocorre no Pacífico Norte porque as águas desta bacia oceânica não são tão salgadas quanto as do Atlântico, e assim, suas águas superficiais nas regiões subpolares não atingem a densidade das águas profundas ao perderem calor durante o inverno (Warren, 1983).

Após sua formação, a NADW é transportada para o sul através de uma corrente de borda oeste profunda, sendo posteriormente levada para as outras bacias oceânicas pela Corrente Circumpolar Antártica (*Antartic Circumpolar Current*) (ACC) (Stommel e Arons, 1960). Conforme descrito anteriormente, parte do transporte de águas do Índico para o Atlântico chega ao Hemisfério Norte, compensando a perda de água profunda (Gordon, 1986). Este padrão de circulação do Atlântico, onde águas mais superficiais são levadas para o norte, sofrem subsidção e posteriormente são transportadas para o sul, recebe o nome de Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (*Atlantic Meridional Overturning Circulation*) (AMOC). O "caminho de retorno" promovido pelo vazamento das Agulhas é geralmente referido na literatura como rota de água quente (*warm water route*) (Gordon, 1986). Alguns trabalhos utilizando modelos de inversão a partir de seções hidrográficas questionaram a importância da rota de água quente, sugerindo que o transporte de águas intermediárias do Pacífico para o Atlântico pelo estreito de Drake seria a principal fonte da parte superior da AMOC (Rintoul, 1991; Macdonald, 1998; Sloyan e Rintoul, 2000). Mais recentemente, um trabalho utilizando derivadores numéricos em um modelo de circulação global (Donners e Drijfhout, 2004) mostrou que a principal fonte de águas do Atlântico Sul era a rota de água quente, e que os modelos de inversão não são viáveis para estimar os caminhos da

circulação global. Isso porque esses modelos trabalham com o balanço do fluxo em seções de uma área e, dessa forma, não lidam adequadamente com seções onde existam fluxos com sentidos opostos. No caso dos trabalhos supracitados, o vazamento das Agulhas é mascarado pelo transporte da ACC.

Devido a importância do vazamento das Agulhas na AMOC, e consequentemente, na circulação termohalina global, variações em sua intensidade podem influenciar o clima do planeta. A formação da NADW é responsável pelo transporte de calor das regiões tropicais e subtropicais para as regiões subpolares do Hemisfério Norte, e o enfraquecimento desse fluxo pode desencadear períodos de glaciação (Clark et al., 2002). Por outro lado, mudanças climáticas podem afetar o vazamento das Agulhas, já que sua intensidade está associada à localização da STF que, por sua vez, é determinada pela região de máxima dos ventos de oeste do Hemisfério Sul (De Ruijter, 1982; De Ruijter et al., 1999). Estudos paleo-oceanográficos sugerem que o vazamento das Agulhas desempenhou um papel importante nas glaciações dos últimos 800 mil anos. Variações na proporção de fósseis de foraminíferos planctônicos típicos da AC em amostras de sedimento no sudeste do Atlântico Sul indicam que o vazamento das Agulhas foi mais forte nos períodos interglaciais, sendo reduzido drasticamente durante as glaciações (Peeters et al., 2004). O enfraquecimento do transporte interoceânico entre o Índico e o Atlântico nas glaciações ocorreu devido a migrações para o norte dos ventos de oeste do Hemisfério Sul, que impulsionaram deslocamentos da STF de até 7° de latitude para o norte, fazendo com que esta chegasse à costa sul africana (Bard e Rickaby, 2009). Durante os períodos glaciais, a redução na intensidade do vazamento das Agulhas apresentou uma forte correlação com a redução da ventilação das águas profundas do Atlântico, indicando uma influência direta no enfraquecimento da AMOC e, consequentemente, na severidade dos períodos glaciais (Bard e Rickaby, 2009).

Alguns experimentos numéricos mostram que a variabilidade do vazamento das Agulhas chega à região de formação da NADW através da propagação de ondas planetárias baroclínicas e barotrópicas em escala inter-anual/decadal (Weijer, 2002;

Biaostoch et al., 2008). Um experimento numérico acoplado (oceano/atmosfera) em que o vazamento das Agulhas é interrompido mostra impactos significativos na circulação termohalina do Atlântico (Haarsma et al., 2009). Nesse experimento, as anomalias de densidade geradas no Hemisfério Sul chegaram ao Atlântico Norte sem sofrer grandes modificações.

Nas últimas décadas têm sido observadas alterações significativas na circulação de todas as bacias oceânicas do Hemisfério Sul. Os 3 giros subtropicais (Atlântico, Índico e Pacífico) têm apresentado uma migração em direção ao polo, acompanhando um deslocamento para o sul da STF (Cai et al., 2005; Alory et al., 2007; Lumpkin e Garzoli, 2011). O Pacífico Sul também tem experimentado uma intensificação de seu giro subtropical (Cai et al., 2005; Roemmich et al., 2007). Essas mudanças têm sido atribuídas a uma migração para o sul dos ventos de oeste do Hemisfério Sul nas últimas 4 décadas, que por sua vez, tem sido relacionada aos aumentos no buraco da camada de ozônio e dos gases causadores do efeito estufa (Thompson e Solomon, 2002; Gillett e Thompson, 2003; Marshall, 2003; Marshall et al., 2004; Alory et al., 2007; Cai e Cowan, 2007). Estudos baseados em modelos climáticos projetam a continuidade dessas tendências na circulação atmosférica e nos oceanos durante este século (Gupta et al., 2009).

Considerando as mudanças na circulação atmosférica e nos giros subtropicais do Hemisfério Sul nas últimas décadas, é de se esperar que ocorram mudanças no transporte de águas do Índico para o Atlântico. Recentemente, resultados de modelos numéricos apontam para um aumento no vazamento das Agulhas em decorrência do deslocamento para o sul dos ventos de oeste do Hemisfério Sul (Biaostoch et al., 2009; Lee et al., 2011). Um outro trabalho utilizando modelo numérico aponta uma causa diferente para o aumento desse transporte (Rouault et al., 2009). Nesse trabalho, o aumento do vazamento das Agulhas é atribuído a um aumento no transporte da AC que, por sua vez, é forçado por uma intensificação do rotacional do vento sobre o Índico Sul.

Embora as causas da intensificação do vazamento das Agulhas ainda estejam em debate, o aumento da comunicação dos giros subtropicais do Índico Sul e do Atlântico Sul é condizente com observações, que apontam para um aumento na salinidade da Corrente Norte do Brasil (Biastoch et al., 2009) e um aquecimento diferenciado do Atlântico em relação ao Índico e ao Pacífico nas últimas décadas (Levitus et al., 2009; Lee et al., 2011). Tendo isso em vista, o presente trabalho tem por objetivo contribuir com o entendimento sobre o impacto das mudanças observadas da circulação atmosférica no vazamento das Agulhas.

1.1 Hipótese Científica

A hipótese a ser testada neste trabalho é a seguinte:

”A migração para o sul dos ventos de oeste do Hemisfério Sul nos últimos 40 anos gerou um aumento do vazamento das Agulhas nesse mesmo período.”

Capítulo 2

Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo geral analisar se a tendência de migração para o sul observada nos ventos de oeste do Hemisfério Sul pode resultar no aumento do transporte de águas do Oceano Índico para o Oceano Atlântico.

São identificados os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e quantificar as variações nos produtos de vento fornecidos pela reanálise do *National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR), no período entre 1960 e 2010;
- Analisar a resposta oceânica nas saídas de rodada de modelo numérico forçado com os produtos do NCEP/NCAR, no período entre 1960 e 2010, no domínio geográfico que inclui a região do vazamento das Agulhas;
- Avaliar correlações entre o vazamento das Agulhas e as diferentes variáveis observadas e modeladas na região.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Descrição do Modelo

Foram analisados produtos de simulação numérica executada com o Modelo Oceânico de Coordenadas Híbridas (Hybrid Coordinates Ocean Model – HYCOM), executado no Laboratório de Modelagem Numérica do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (LABMON).

O HYCOM (Bleck et al., 1992) é um modelo oceânico de última geração, o qual tem como característica principal a capacidade de adaptar suas coordenadas verticais para a mais adequada, dependendo da região e das condições oceânicas. De uma forma geral, esse modelo utiliza: coordenadas isopícnas (superfícies de constante densidade) no interior do oceano; coordenadas sigma (frações da profundidade local) no talude e plataforma continental; e coordenadas cartesianas z na camada de mistura e nas regiões mais rasas, próximas à costa.

A versão implementada no LABMON foi executada na região geográfica delimitada por $98^{\circ}W - 114^{\circ}E$; $65^{\circ}S - 60^{\circ}N$, utilizando como topografia de fundo o conjunto de dados batimétricos *Earth Topography at 5-degree resolution* (ETOPO5). Foram utilizadas 22 camadas híbridas na vertical, com resolução espacial de 0.25 grau na direção zonal (leste-oeste) e 0.25 grau multiplicado pelo cosseno da latitude na direção norte-sul (projeção Mercator), permitindo marginalmente a resolução dos

anéis formados pela retroflexão da Corrente das Agulhas.

O experimento numérico foi forçado com médias mensais, com variabilidade inter-anual, dos produtos da reanálise do NCEP/NCAR: Tensão de cisalhamento do vento; fluxos radiativos; precipitação e temperatura da superfície do mar. Nos contornos abertos a estrutura termohalina (T e S) é relaxada para a climatologia do *World Ocean Atlas 2005 Series* (WOA05) (Locarnini et al., 2006) e um fluxo barotrópico de 148 Sv é prescrito entre as latitude $40^{\circ}S$ e $65^{\circ}S$, de tal maneira a produzir uma ACC com características reais. Esse valor de transporte foi definido através de um estudo de sensibilidade tomando-se como parâmetro a localização da Confluência Brasil-Malvinas. A temperatura da superfície do mar (*sea surface temperature*) (SST) foi relaxada para dados de SST do NCEP/NCAR com uma taxa de decaimento de 30 dias.

O modelo foi executado a partir do repouso, com distribuição inicial de temperatura e salinidade da climatologia do WOA05. Forçado inicialmente com dados climatológicos do COADS, o modelo foi deixado rodar por um período de 10 anos, até se atingir uma situação estável. O resultado desse “*spin-up*” foi então utilizado como condição inicial para a rodada datada com produtos do NCEP/NCAR, a partir de janeiro de 1948. Foram utilizados nesse trabalho apenas os resultados do modelo obtidos a partir de janeiro de 1960.

3.2 Migração para o sul dos ventos de oeste nos dados da reanálise do NCEP/NCAR

O limite entre os giros subtropicais e a ACC, delineada pela STF, é determinada pela posição do rotacional zero da tensão de cisalhamento do vento, que marca a região de máxima dos ventos de oeste. Ao sul da África do Sul, a posição do rotacional zero da tensão de cisalhamento do vento atua como um regulador do transporte de águas da termoclina do Índico para o Atlântico (De Ruijter, 1982).

Os dados do NCEP/NCAR apresentam uma intensificação dos ventos de oeste do Hemisfério Sul em direção ao Polo Sul, acompanhada por um deslocamento para o sul do rotacional zero da tensão de cisalhamento do vento. A Figura 3.1 apresenta os campos médios e as tendências do rotacional e dos vetores da tensão de cisalhamento do vento no período entre 1960 e 2010. As posições do rotacional zero em 1960 e 2010 (valores obtidos a partir do método de mínimos quadrados) estão marcadas pelas linhas preta e amarela, respectivamente. Essas linhas mostram a migração para o sul das regiões de máxima dos ventos de oeste no Atlântico Sul e no Índico Sul, com exceção de algumas regiões entre $15^{\circ}W$ e $30^{\circ}W$, e entre 0 e $10^{\circ}E$. O comportamento das componentes zonal e meridional da da tensão de cisalhamento do vento estão ilustradas separadamente nas Figuras 3.2 e 3.3, respectivamente.

A Figura 3.4 apresenta a média zonal da latitude do rotacional zero do vento sobre o Índico Sul (entre $40^{\circ}E$ e $110^{\circ}E$, linha vermelha) e ao sul da região das Agulhas (entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, linha azul). As duas curvas apresentam tendência de migração para o sul do rotacional zero (linhas pontilhadas); ao sul das Agulhas a migração para o sul foi de $0,34$ graus de latitude por década, enquanto que no restante do Índico Sul foi de $0,2$ graus de latitude por década. Em ambas as curvas, o deslocamento começa a ficar evidente no final da década de 1960, porém ocorre uma diferença marcante nos últimos 15 anos: enquanto que sobre o Índico, o rotacional zero do vento segue em direção ao polo, ao sul das Agulhas ele passa a se deslocar para o norte.

Figura 3.1: Superior: média do rotacional da tensão de cisalhamento do vento do NCEP/NCAR ($N.m^{-3}$) entre 1960 e 2010 e vetores da média da tensão de cisalhamento do vento ($N.m^{-2}$). Inferior: tendência linear do rotacional da tensão de cisalhamento do vento e vetores da tendência da tensão de cisalhamento do vento. As linhas preta e amarela marcam a posição do rotacional zero em 1960 e 2010, respectivamente.

Figura 3.2: Campo médio (superior) e tendência (inferior) entre 1960 e 2010 da componente zonal da tensão de cisalhamento do vento do NCEP/NCAR ($N.m^{-2}$) sobre os oceanos Atlântico Sul e Índico Sul.

Figura 3.3: Campo médio (superior) e tendência (inferior) entre 1960 e 2010 da componente meridional da tensão de cisalhamento do vento do vento do NCEP/NCAR ($N.m^{-2}$) sobre os oceanos Atlântico Sul e Índico Sul.

Figura 3.4: Médias zonais da latitude do rotacional zero da tensão de cisalhamento do vento sobre o Índico Sul (entre $40^{\circ}E$ e $110^{\circ}E$, linha vermelha) e ao sul da região das Agulhas (entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, linha azul). As linhas pontilhadas indicam a tendência linear das séries. Foram eliminados os sinais com período menor que 4 anos.

A migração para o sul dos ventos de oeste está associada à tendência positiva do índice do Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode*) (SAM) (Thompson e Solomon, 2002; Marshall, 2003; Marshall et al., 2004; Alory et al., 2007; Cai e Cowan, 2007). O SAM é o modo de variabilidade atmosférico predominante no Hemisfério Sul, e seu índice em questão é a componente principal dominante das anomalias de altura geopotencial em $850hPa$ ao sul de $20^{\circ}S$ (Thompson e Wallace, 2000). Este índice apresenta uma tendência positiva com um padrão sazonal, sendo mais intensa nos meses de verão (Thompson e Solomon, 2002; Gillett e Thompson, 2003; Cai, 2006). A Figura 3.5 mostra como o rotacional da tensão de cisalhamento do vento ao sul da região das Agulhas nos dados do NCEP/NCAR segue o índice do SAM calculado apenas com os meses de verão.

Figura 3.5: De cima para baixo: média espacial entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $45^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$ do rotacional da tensão de cisalhamento do vento, em $N.m^{-3}$; índice do SAM considerando apenas os meses de dezembro, janeiro e fevereiro; índice do SAM considerando apenas os meses de junho, julho e agosto; índice do SAM considerando todos os meses do ano. Em vermelho (azul) estão os valores acima (abaixo) da média. Todas as séries foram filtradas com filtro passa-baixa, com frequência de corte de 4 anos. Os índices do SAM foram obtidos no site do *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (China)*.

As mudanças nos ventos de oeste ocorrem desde a estratosfera à superfície terrestre (Thompson e Solomon, 2002; Gillett e Thompson, 2003). Alguns trabalhos apontam a redução da camada de ozônio a partir da década de 1970 como um dos principais agentes na mudança do regime de ventos. Thompson e Solomon (2002) mostram que na estratosfera, as mudanças mais drásticas ocorrem no fim da primavera, e correlacionam essas modificações à diminuição da camada de ozônio.

A anomalia gerada na estratosfera demora cerca de 2 meses para alcançar a superfície terrestre, sendo as modificações na troposfera mais intensas nos meses de verão. Cai e Cowan (2007) compararam as saídas de 71 simulações atmosféricas utilizadas no Quarto Relatório de Avaliação (*Fourth Assessment Report*) (AR4) do Painel Internacional de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (IPCC), com os dados de reanálise do NCEP/NCAR para o período entre 1950 e 1999. Assim como no trabalho citado anteriormente, os autores também destacam a sazonalidade da tendência dos ventos zonais no Hemisfério Sul, com tendência mais forte entre dezembro e fevereiro. Dentre os modelos analisados, 48 levaram em consideração a redução na camada de ozônio, permitindo aos autores analisar a importância deste fator nas tendências encontradas. As simulações que consideraram a redução na camada de ozônio apresentaram, em média, tendência duas vezes mais forte que as outras simulações, estando seus resultados mais fortemente relacionados aos dados de reanálise. Os autores também apontam que as tendências são intensificadas na metade da década de 1970, no mesmo período em que a redução na camada de ozônio se torna significativa.

Por outro lado, Marshall et al. (2004) mostram, através de um modelo de circulação atmosférica e de observações que as tendências observadas no SAM resultam de uma combinação não linear de forçantes naturais e antropogênicas. Os autores salientam que, apesar das tendências serem mais acentuadas no verão, quando as forçantes antropogênicas são mais significativas, as tendências iniciaram pelo menos uma década antes do começo da perda de ozônio. Os resultados mostram ainda que, além da redução na camada de ozônio, a emissão de gases causadores do efeito estufa também contribuem para a intensificação da tendência nos meses de verão.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Representação da circulação do Sistema Agulhas pelo modelo

O Sistema Agulhas envolve a AC, sua retroflexão, e a Corrente de Retorno das Agulhas (*Agulhas Return Current*) (ARC). Esse sistema constitui a parte sudoeste do giro subtropical do Índico Sul, sendo a AC sua corrente de borda oeste. Este giro anticiclônico também é composto pela Corrente Sul Equatorial e pela Corrente do Índico Sul, além da pouco evidente Corrente Oeste da Austrália. Assim, variações na circulação do giro podem refletir no Sistema Agulhas, sendo importante para este trabalho uma boa representação desta feição de larga escala pelo modelo. A seguir, para testar a confiabilidade dos resultados, as circulações do giro subtropical do Índico Sul e do Sistema Agulhas reproduzidas pelo modelo serão comparadas à literatura e a dados derivados de imagens de satélite (topografia dinâmica e temperatura da superfície do mar).

4.1.1 Comparação da saída do modelo com a literatura

A Figura 4.1 apresenta a função de corrente barotrópica simulada no Índico Sul (média entre 1960 e 2010). Qualitativamente, a representação do giro subtropical pelo modelo está condizente com os padrões de circulação descritos na literatura

(Figura 2.2 de Lutjeharms (2006) e Figuras 2 e 7 de Stramma e Lutjeharms (1997)). Entre as feições mais marcantes reproduzidas pelo modelo, está a caracterização de um sub-giro que se estende até aproximadamente a longitude de $60^\circ E$. Este sub-giro, descrito por Stramma e Lutjeharms (1997), é formado pela intensificação do giro subtropical em sua porção oeste. Outra célula de recirculação reproduzida pelo modelo aparece entre as longitudes de $25^\circ E$ e $35^\circ E$. Esta célula é mais intensa que a primeira e é caracterizada por um forte giro anticiclônico. Esta feição, foi sugerida por Gordon e Lutjeharms (1987) para explicar a intensificação da AC ao sul de $32^\circ S$, e posteriormente foi observada por Feron et al. (1998) através de dados altimétricos. De acordo com De Ruijter et al. (1999), essas duas células de recirculação são as principais fontes de massas de água da AC.

Figura 4.1: Função de corrente barotrópica média, em $m^3.s^{-1}$, no período entre 1960 e 2010, ilustrando a circulação do giro subtropical do Índico Sul simulada pelo modelo.

Importantes fontes de variabilidade do Sistema Agulhas têm origem na Corrente Sul Equatorial. Esta sofre uma bifurcação na costa leste de Madagascar, formando os braços norte e sul da Corrente Leste de Madagascar (em alguns trabalhos, essas correntes são referidas como Corrente Nordeste de Madagascar e Corrente Sudeste de Madagascar). O braço norte da Corrente Leste de Madagascar chega a costa leste africana em aproximadamente $11^\circ S$, onde sofre nova bifurcação (Schott e McCreary, 2001). O ramo sul dessa última bifurcação é responsável pela geração de vórtices

anticiclônicos que, atravessam o Canal de Moçambique e alcançam a AC (Figura 4.2). Segundo De Ruijter et al. (2002), esses vórtices percorrem o canal junto ao talude do continente africano, e ocorrem com uma frequência de aproximadamente 4 ao ano. No modelo, esses vórtices também se propagam próximos à costa africana, porém sua frequência é de aproximadamente 6 ao ano. O outro braço da Corrente Leste de Madagascar flui para o sul, se comportando como uma pequena corrente de borda oeste. Ao sul da ilha de Madagascar, essa corrente se torna um jato livre em direção a África, liberando vórtices ciclônicos e anticiclônicos que se propagam para sudoeste, e chegam à AC (Figura 4.2). Muitos desses vórtices aparecem na forma de dipolos nas bordas do jato, com vórtices ciclônicos a nordeste e vórtices anticiclônicos a sudeste (De Ruijter et al., 2004). Alguns trabalhos descrevem uma retroflexão anticiclônica da Corrente de Leste Madagascar ao sul da ilha (Lutjeharms et al., 1981; Lutjeharms, 1988), o que não é reproduzido no modelo. A presença dessa retroflexão foi contestada por De Ruijter et al. (2004) e por Quartly et al. (2006) por não haver um fluxo consistente para leste nessa região. Os autores de ambos os trabalhos atribuíram a aparente retroflexão observada a anticiclones formados a sudeste de Madagascar, que posteriormente se deslocam para sudoeste. A formação desses anticiclones foi reproduzida pelo modelo. A representação dos vórtices de Moçambique e dos liberados pelo braço sul da Corrente Leste de Madagascar pelo modelo estão ilustradas na Figura 4.2.

O padrão de circulação superficial da AC simulado pelo modelo também está de acordo com a literatura. Tendo origem em aproximadamente $27^{\circ}S$, a AC pode ser dividida em dois segmentos distintos de acordo com a característica de seu fluxo (Paldor e Lutjeharms, 2009). No segmento norte, a corrente segue bem próxima a quebra da plataforma continental, apresentando um fluxo bastante estável. Em $34^{\circ}S$, quando começa a contornar o Banco das Agulhas, a corrente passa a meandrar, apresentando um fluxo mais instável. Este segmento termina na retroflexão da AC, em aproximadamente $15^{\circ}E$. Na Figura 4.2, a seção C marca o fim do segmento norte e o início do segmento sul. De Ruijter et al. (1999) e Paldor e Lutjeharms (2009) atribuíram essas diferenças de fluxo à topografia: no segmento norte, a pla-

taforma continental é estreita e o talude apresenta uma declividade mais abrupta, impedindo que a corrente meandre; na região do Banco das Agulhas, a plataforma continental é mais extensa e a declividade do talude é mais suave, permitindo que os meandramentos se desenvolvam.

Figura 4.2: Módulo da velocidade de corrente superficial, em $m.s^{-1}$ e vetores de velocidade em 25 de Janeiro de 1960. As linhas azuis indicam as seções em $30^{\circ}S$ (A), $32^{\circ}S$ (B), $35^{\circ}S$ (C) e $36^{\circ}S$ (D), apresentadas na Figura 4.3. A linha preta pontilhada indica a seção onde foi estimado o Vazamento das Agulhas. Nessa imagem, podem ser identificados os anéis das Agulhas (AA), os vórtices do Canal de Moçambique (VM) e os vórtices da Corrente Leste de Madagascar (VCLM1 para vórtice ciclônico e VCLM2 para anticiclônico).

A estabilidade do segmento norte da AC é quebrada pela chegada dos vórtices do Canal de Moçambique e dos liberados pela Corrente Leste de Madagascar, descritos anteriormente. A interação desses vórtices com a corrente, ocasionalmente, gera um meandramento em direção ao oceano que se propaga como um soliton junto à corrente. Esse meandramento geralmente se origina na Baía de Natal (em aproxima-

damente $29^{\circ}S$), e por isso recebe o nome de pulso de Natal. Ao chegarem na região da retroflexão, os pulsos desencadeiam a liberação dos Anéis das Agulhas, desempenhando um papel fundamental no transporte de águas do Índico para o Atlântico (van Leeuwen et al., 2000; Schouten et al., 2002; Biastoch et al., 2008). Os resultados do modelo apresentam deslocamentos do núcleo da AC de 30 km durante a passagem de pulsos de Natal. Esses deslocamentos são inferiores aos encontrados por Biastoch et al. (2008), que utilizando um modelo com resolução espacial de $1/10^{\circ}$, descreveram deslocamentos do núcleo da corrente entre 40-50 km.

A Figura 4.3 mostra a estrutura vertical da AC simulada em 4 seções ao longo da costa africana (Figura 4.2). As seções de velocidade de corrente média estão orientadas perpendicularmente ao fluxo da corrente, e as médias foram calculadas para o período entre 1960 e 2010. As duas primeiras seções, em aproximadamente $30^{\circ}S$ (seção A) e $32^{\circ}S$ (seção B), estão sobre o segmento norte da AC. Nessas seções, a corrente está próxima a costa, se estendendo por aproximadamente 170 km (distância entre isolinhas de velocidade de $0,05m.s^{-1}$), atingindo uma profundidade de $2000m$ e com o núcleo da corrente estando aproximadamente sobre a isóbata de $600m$. O transporte médio na seção A foi de $60,8Sv$, com desvio padrão de $7,8Sv$, enquanto que na seção B, o transporte médio foi de $69,9Sv$, com desvio padrão de $8,8Sv$. A terceira seção, centrada em $35^{\circ}S$ (seção C), está no começo do segmento sul da AC. Nessa região, a corrente começa a se afastar da costa, com o núcleo sobre a isóbata de $1100m$, aproximadamente. Nessa seção, a corrente atinge a profundidade de $2400m$, se estendendo por aproximadamente $217km$. Ela apresentou o maior transporte entre as 4, com um valor médio de $107,4Sv$ e desvio padrão de $17,4Sv$. A última seção está centrada em aproximadamente $36^{\circ}S$ e $25^{\circ}E$ (seção D), estando no meio do segmento sul da AC. Nesse ponto, a corrente está contornando o Banco das Agulhas, com o núcleo aproximadamente sobre a isóbata de $2000m$, a mais de $200km$ da costa. A corrente apresenta a maior extensão entre as seções, chegando a 350 km, porém, é a que apresentou o fluxo mais raso (profundidade máxima de aproximadamente $1700m$). O transporte médio calculado foi de $78,9Sv$, com desvio padrão de $20,7Sv$.

Figura 4.3: Seções de velocidade da AC em $30^{\circ}S$ (A), $32^{\circ}S$ (B), $35^{\circ}S$ (C) e $36^{\circ}S$ (D). As velocidades apresentadas são normais a seção, com valores positivos no sentido SW e negativos no sentido NE. As linhas mais espessas indicam a isolinha de $0,05m.s^{-1}$, utilizadas pra limitar a área da seção no cálculo do transporte da AC.

As seções utilizadas mostram que o comportamento da AC está condizente com a literatura, com a corrente mais estável e próxima à costa ao norte, e com maior variabilidade e longe da costa ao sul (De Ruijter et al., 1999; Lutjeharms, 2006; Paldor e Lutjeharms, 2009). Entre as seções em A e C, o fluxo é intensificado pelas células de recirculação do Índico Sul, descritas anteriormente. Essa intensificação foi sugerida por Gordon e Lutjeharms (1987) e posteriormente caracterizada por Casal et al. (2009), que calcularam o transporte em quatro seções na costa leste sul africana a partir de dados de LADCP. Entre as duas últimas seções (C e D), o fluxo perde intensidade, sendo a velocidade média do núcleo reduzida em mais de 60% e o transporte médio reduzido em 26%. Isso ocorre porque parte do fluxo da corrente na seção C entra diretamente na ARC através do giro anti-ciclônico da célula de recirculação. O transporte médio na seção B ($32^{\circ}S$) foi estatisticamente idêntico ao encontrado por Bryden et al. (2005) em uma seção na mesma latitude. A partir de séries temporais de correntômetros, os autores calcularam um transporte médio de $69,7Sv$ para um período de 267 dias. A localização do núcleo e extensão horizontal da corrente no segmento norte da corrente (seções A, B e C) estão de acordo com

as medições de Casal et al. (2009), com o núcleo a aproximadamente 50 Km da costa e com a corrente se estendendo até 200 Km da costa. Uma diferença marcante entre as seções do modelo e as observadas pelos autores é a ausência no primeiro da Sub-Corrente das Agulhas. Essa sub-corrente segue junto ao talude em sentido oposto ao da AC, ao longo do segmento norte desta, ocorrendo entre 1000 e 2500 m de profundidade.

A Figura 4.2 também ilustra o transporte de águas do Índico para o Atlântico Sul promovido pelos anéis das Agulhas. Essas feições podem atingir 4000 metros de profundidade (Gordon e Lutjeharms, 1987), com diâmetros de até 500 km (Arhan et al., 1999). A Figura 4.4 mostra a evolução de um anel na simulação entre 01/01/1960 e 21/03/1960, e sua estrutura vertical no dia 21/03/1960. Esse anel possui um diâmetro de aproximadamente 330 km, e apresenta características típicas de um vórtice anticiclônico, com subsidência no núcleo e ressurgência nas bordas. A disposição das isotermas e isohalinas mostram que o interior do anel apresenta águas mais quentes e salgadas que o entorno. A isoterma de 13°C apresenta um deslocamento vertical de aproximadamente 500 metros entre núcleo do anel e as bordas, enquanto que a isohalina de 34,8 apresenta um deslocamento de mais de 600 metros. Essas distribuições de temperatura e salinidade se assemelham às dos anéis das Agulhas observados por (Arhan et al., 1999) e Schmid et al. (2003).

A estimativa do Vazamento das Agulhas é uma tarefa complicada devido ao seu caráter intermitente. Apesar disso, várias tentativas para calcular este fluxo foram realizadas. De Ruijter et al. (1999) apresentam uma compilação de vários trabalhos que estimaram o Vazamento das Agulhas utilizando diferentes técnicas, como cálculos geostróficos a partir de observações hidrográficas, modelos de inversão e estimativa do fluxo dos anéis liberados na retroflexão da AC. Os valores estimados variam entre 2,8 Sv e 15 Sv. Richardson (2007) estimou um transporte de 15 Sv do Oceano Índico para o Oceano Atlântico utilizando derivadores de superfície e boias de sub-superfície.

Figura 4.4: Os três gráficos superiores são mapas de SSH (metros) e mostram a liberação e evolução de um anel das Agulhas. Os gráficos inferiores mostram a estrutura do anel em 21/03/1960 (seção indicada pela linha pontilhada no mapa de SSH desta data). Na esquerda, as cores representam a componente zonal de velocidade ($m.s^{-1}$) e as linhas, a temperatura ($^{\circ}C$). Na direita, as cores representam a componente vertical de velocidade ($m.s^{-1}$) e as linhas, a salinidade.

A forma mais utilizada para estimar o Vazamento das Agulhas em modelos numéricos é baseada no cálculo do fluxo através de um plano vertical próximo à retroflexão da AC (Dijkstra e de Ruijter, 2001; Matano e Beier, 2003; Treguier et al., 2003; Reason et al., 2003; Hermes et al., 2007; Rouault et al., 2009). Este tipo de estimativa euleriana, no entanto, pode ser contaminada por fluxos de outros sistemas, como a ACC e a Corrente do Atlântico Sul (Gordon e Lutjeharms, 1987). No presente trabalho, o Vazamento das Agulhas foi calculado através da integral da componente zonal de velocidade em uma seção meridional na longitude de $20^{\circ}E$, entre as latitudes de $34,6^{\circ}S$ e $42^{\circ}S$ e entre as profundidades de 0 e 1300 metros (Figura 4.2). O limite sul da seção foi escolhido de acordo com o limite dos fluxos médios do Sistema Agulhas e da ACC (Figura 4.5). O transporte médio do vazamento das Agulhas foi de 16,8 Sv, com desvio padrão de 8 Sv, sendo estatisticamente idêntico ao estimado por Richardson (2007). Matano e Beier (2003) utilizaram uma seção meridional na longitude de aproximadamente $24^{\circ}E$, com limite sul em $42^{\circ}S$,

e estimaram um Vazamento das Agulhas de 19 Sv nos primeiros 1500 metros de profundidade. Rouault et al. (2009) estimaram o transporte em 11 Sv utilizando uma seção meridional em $18^\circ E$, e considerando no cálculo apenas águas com temperatura superior a $5^\circ C$ e salinidade superior a 34,8 para excluir a ACC. Utilizando os mesmos critérios que Rouault et al. (2009) na seção em $20^\circ E$, o Vazamento das Agulhas é estatisticamente idêntico ao estimado por esses autores, com transporte médio de 10,8 Sv e desvio padrão de 3,1 Sv.

Figura 4.5: Seção da componente zonal de velocidade ($m.s^{-1}$) em $20^\circ E$ e distribuição de temperatura (linha preta) e salinidade (linha cinza). Valores positivos (negativos) indicam fluxo no sentido leste (oeste). A linha pontilhada verde indica os limites da seção no cálculo do Vazamento das Agulhas.

4.1.2 Comparação da saída do modelo com dados de satélite

Para melhor avaliar o desempenho do modelo na região das Agulhas, os resultados foram comparados com dados extraídos de imagens de satélite. Resultados de altura da superfície do mar (*sea surface height*) (SSH) e velocidade na camada de mistura foram comparados a dados de topografia dinâmica e velocidade geostrófica

absoluta derivados de campos altimétricos de anomalia de SSH. Esses dados são produtos gerados por *Ssalto/Duacs* e distribuídos pela AVISO, com suporte do *Centre National d'Etudes Spatiales*. Os dados têm uma resolução espacial de $1/4^\circ$ e resolução temporal de 1 mês, compreendendo o período entre outubro de 1992 e dezembro de 2010. A topografia dinâmica é a altura da superfície do mar sobre o geóide, e será referida daqui em diante como SSH da AVISO.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os campos médios de SSH e desvio padrão, respectivamente, do modelo e da AVISO. As feições do campo médio de SSH do modelo estão condizentes com o campo médio da AVISO, porém, a variabilidade da região foi subestimada. A Figura 4.8 apresenta as linhas de corrente médias do núcleo do Sistema Agulhas no modelo e nos dados da AVISO (LC_{AVISO} e LC_{modelo} , respectivamente), traçadas a partir das isolinhas de SSH do núcleo da Corrente das Agulhas em $30^\circ S$. As duas linhas de corrente seguem bem próximas no segmento norte da AC, acompanhando as isóbatas sobre o talude. A partir de $34^\circ S$, onde a corrente se afasta da costa para contornar o Banco das Agulhas, começam a aparecer algumas discrepâncias nas trajetórias. A LC_{AVISO} acompanha as isóbatas do talude do Banco das Agulhas, sofrendo a retroflexão em $18^\circ E$. Já a LC_{modelo} , se afasta um pouco do Banco das Agulhas, seguindo por uma região mais profunda. Com isso, sua trajetória assume uma direção mais zonal, e a corrente acaba entrando mais no Atlântico antes de sofrer a retroflexão, que ocorre entre $16^\circ E$ e $17^\circ E$. Após a retroflexão, as feições mais marcantes da LC_{AVISO} são dois sinuosos meandramentos, que ocorrem devido à compressão do tubo de vórtice sofrido pela ARC ao passar pelo Platô das Agulhas, em $20^\circ E$, e por uma extensão do Platô de Moçambique, em $31^\circ E$ (Lutjeharms, 2006). A LC_{modelo} sofre o primeiro meandramento ao passar pelo Platô das Agulhas, mas não retorna para o sul ao chegar na região mais profunda, entre os platôs. Nessa região, é observada uma bifurcação na ARC tanto nos dados altimétricos da AVISO como nos dados do modelo (Figura 4.9). A discrepância nas trajetórias das linhas de corrente ocorre porque o núcleo calculado a partir dos dados da AVISO segue pelo ramo sul da bifurcação, enquanto que o núcleo calculado pelo modelo segue pelo norte.

Figura 4.6: Campo médio de SSH, em metros, dos dados altimétricos da AVISO (em cima) e da saída do modelo (embaixo).

Figura 4.7: Desvio padrão de SSH, em metros, dos dados altimétricos da AVISO (em cima) e da saída do modelo (embaixo).

Figura 4.8: Trajetórias médias do Sistema Agulhas (corrente + retroflexão + corrente de retorno), calculadas a partir da SSH da AVISO (linha branca) e do modelo (linha vermelha), plotadas sobre o mapa topográfico da região.

Figura 4.9: Componentes zonal (esquerda) e meridional (direita) das velocidades geostóficas barotrópicas médias, em $m.s^{-1}$ calculadas a partir da SSH dos dados altimétricos da AVISO (superior) e do modelo (inferior).

Para comparar os gradientes de SSH entre os campos do modelo e da AVISO, foram calculadas as curvas de regressão e os respectivos coeficientes de correlação (r) das médias mensais entre outubro de 1992 e dezembro de 2010. Os dados da AVISO foram interpolados para a grade do modelo, sendo utilizados os pontos de grade entre as latitudes de 30^0S e 47^0S , e as longitudes de 10^0E e 40^0E . O coeficiente de correlação é uma estimativa do quão bem o diagrama de dispersão se ajusta a curva de regressão, e consequentemente, indica o grau de correlação entre os campos. O coeficiente angular da curva de regressão indica a relação entre os gradientes dos campos de SSH do modelo e da AVISO. Quanto mais próximo de 1, melhor a representação dos gradientes pelo modelo. O coeficiente de correlação teve um valor médio de 0,83, com desvio padrão de 0,02. A média dos coeficientes angulares das curvas de regressão foi 0,8, e o desvio padrão foi 0,03. A Figura 4.10 mostra as curvas de regressão dos meses com a maior correlação ($r = 0,89$) e com a menor correlação ($r = 0,78$) no período analisado. Essa Figura também apresenta a curva de regressão dos campos médios entre outubro de 1992 e dezembro de 2010. Nesse caso, o coeficiente de correlação foi $r = 0,93$ e o coeficiente angular do ajuste foi 0,94.

Também foram comparados os campos de SST com dados extraídos de imagens de satélite. Estes, são produtos derivados de radiômetro *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) do projeto *Pathfinder Version 5* (Casey et al., 2010). Os dados radiométricos são coletados e processados pelo *National Oceanographic Data Center* (NODC) em cooperação com a Universidade de Miami, e os produtos são disponibilizados pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Esses dados possuem resolução espacial de 4 Km, resolução temporal de 1 mês, e compreendem o período entre janeiro de 1985 e dezembro de 2006. Os dados de SST do *Pathfinder* possuem níveis de qualidade com valores que variam entre 0 e 7. Esses níveis são definidos em uma série de testes que levam em conta entre outros fatores, a cobertura de nuvens (Kilpatrick et al., 2001). Como a partir do nível 4 os dados não apresentam influência de nuvens, foram utilizados apenas os dados com valores entre 4 e 7.

Figura 4.10: Curvas de regressão entre campos de SSH simulados e os campos de SSH dos dados altimétricos da AVISO, onde r é coeficiente de correlação e C.A. é o coeficiente angular da reta. O gráfico superior mostra o mês com maior coeficiente de correlação ($r=0,89$) dos 212 meses avaliados, enquanto que o gráfico do meio apresenta o mês com menor coeficiente de correlação ($r=0,78$). O gráfico inferior apresenta a curva de regressão entre os campos médios de SSH entre outubro de 1992 e dezembro de 2010.

O campo médio de SST do modelo na região das Agulhas está de acordo o campo médio de SST do *Pathfinder* (Figura 4.11). Apesar disso, o comportamento das isotermas na região adjacente à costa africana indica que algumas diferenças observadas no campo de SSH do modelo e da AVISO também estão presentes. Nos dados radiométricos, ao passar a latitude de 34°S , a AC segue acompanhando o talude e antes da retroflexão segue um sentido NE-SW. Já na saída do modelo, a AC se afasta um pouco mais da costa, e antes da retroflexão, segue uma direção mais zonal, se estendendo mais para oeste. Outra diferença marcante, são as isotermas ao sul do sistema Agulhas: nos dados radiométricos, essas isotermas são mais regulares, não apresentando grandes oscilações espaciais, enquanto que nos dados simulados, as isotermas apresentam algumas irregularidades em decorrência de oscilações meridionais no fluxo da ACC.

Os desvios padrão dos campos de SST do modelo e do *Pathfinder* apresentam uma faixa zonal de máxima variabilidade nas regiões frontais que marcam a ARC e a STF (Figura 4.12). Em algumas regiões, o desvio padrão do modelo é consideravelmente superior ao do *Pathfinder*, como na região do Platô das Agulhas.

Assim como foi feito com os dados de SSH, foram calculadas as curvas de regressão entre as médias mensais dos campos de SST do modelo e do *Pathfinder* entre janeiro de 1985 e dezembro de 2006. Os dados do *Pathfinder* foram interpolados para a grade do modelo, sendo utilizados os pontos de grade entre as latitudes de 30°S e 47°S , e as longitudes de 10°E e 40°E . O coeficiente de correlação teve um valor médio de 0,94, com desvio padrão de 0,01. A média dos coeficientes angulares das curvas de regressão foi 1,05, e o desvio padrão foi 0,06. A Figura 4.13 mostra as curvas de regressão dos meses com a maior correlação ($r = 0,97$) e com a menor correlação ($r = 0,89$) no período analisado. Essa Figura também apresenta a curva de regressão dos campos médios entre janeiro de 1985 e dezembro de 2006. Nesse caso, o coeficiente de correlação foi $r = 0,98$ e o coeficiente angular do ajuste foi 1,06.

Figura 4.11: Campo médio de SST, em $^{\circ}\text{C}$, dos dados radiométricos do Pathfinder (em cima) e da saída do modelo (embaixo).

Figura 4.12: Desvio padrão de SST, em $^{\circ}\text{C}$, dos dados radiométricos do Pathfinder (em cima) e da saída do modelo (embaixo).

Figura 4.13: Curvas de regressão entre campos de SST simulados e os campos de SST dos dados radiométricos do Pathfinder, onde r é coeficiente de correlação e C.A. é o coeficiente angular da reta. O gráfico superior mostra o mês com maior coeficiente de correlação ($r=0,97$) dos 264 meses avaliados, enquanto que o gráfico do meio apresenta o mês com menor coeficiente de correlação ($r=0,89$). O gráfico inferior apresenta a curva de regressão entre os campos médios de SST entre janeiro de 1985 e dezembro de 2006.

De maneira geral, os campos de SSH e SST apresentam uma boa correlação com os dados derivados de imagens de satélite, tendo o modelo reproduzido razoavelmente bem as feições de meso-escala do Sistema Agulhas, como a retroflexão da AC e os meandramentos da ARC. A baixa variabilidade temporal do campo de SSH em relação aos dados altimétricos ocorre devido à relativa baixa resolução horizontal da malha utilizada (Beckmann et al., 1994; Stammer et al., 1996). O melhor desempenho do campo de SST em relação ao de SSH, quando comparado com dados de satélite, se deve ao fato do primeiro ter sido relaxado com dados de SST do NCEP/NCAR.

4.2 Migração para o sul da STF e do Sistema Agulhas

Os resultados do modelo apontam um aumento na SSH ao sul do Sistema Agulhas e na STF (Figura 4.14). Esse aumento indica uma migração para o sul do Sistema Agulhas e da STF. Na Figura 4.14, as isolinhas de 0 metros em 1960 (preto) e 2010 (amarelo) ilustram o deslocamento da STF para o sul.

Como consequência das mudanças indicadas, ocorreu um aquecimento das águas ao sul do continente africano. Os mapas de tendência linear em diferentes profundidades, apresentados na Figura 4.15, indicam que no Sistema Agulhas esse aquecimento ocorreu apenas nas regiões mais superficiais, porém, ao sul da STF, o aumento na temperatura chegou a profundidades de até 1000 metros. No mapa de tendência linear da SST (profundidade de 0 metros da Figura 4.15), as linhas mais espessas representam a isoterma de 13°C em 1960 (preto) e em 2010 (amarelo). Essa isoterma indica a posição da STF ao sul do Sistema Agulhas (Lutjeharms, 2006), e nesse gráfico, fica evidente a migração para o sul desta zona frontal. Nas outras profundidades, foram utilizadas isotermas que ocupam a mesma latitude da anterior (12°C para a prof. = 200 metros, 6°C para a prof. = 500 metros e $3,5^{\circ}\text{C}$ para a prof. = 1000 metros) e todas elas mostram migração para o sul da STF.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram a tendência linear da temperatura em seções meridionais nas longitudes de $25^{\circ}E$ e $20^{\circ}E$, respectivamente. Nessas Figuras, as linhas mais finas mostram a média da componente zonal da velocidade, ilustrando a AC (valores negativos), a ARC e parte da ACC (valores positivos). A diferença entre as posições das isotermas em 1960 e 2010 (linhas mais espessas pretas e amarelas, respectivamente) mostram claramente o deslocamento do Sistema Agulhas e da STF para o sul, resultando no aquecimento das águas nessa região. Conforme mostrado na Figura 4.15, o aquecimento atingiu maiores profundidades ao sul da STF, chegando a 1400 metros na seção em $20^{\circ}E$, enquanto que na ARC, o aquecimento foi mais evidente até aproximadamente 600 metros. Essa migração para o sul intensificou o levantamento das isotermas junto à costa africana, ocasionando um resfriamento das águas ao norte das seções.

Figura 4.14: Tendência linear da SSH entre 1960 e 2010 (metros.ano^{-1}). Os contornos representam o campo médio da SSH, em metros, no período, e as linhas mais espessas indicam a isolinha de SSH = 0 em 1960 (preto) e 2010 (amarelo).

Figura 4.15: Tendência linear da SST (prof. = 0 metros) e temperatura nas profundidades de 200, 500 e 1000 metros, entre 1960 e 2010 ($^{\circ}C.ano^{-1}$). Os contornos representam o campo médio da SST no período. As linhas mais espessas indicam as isotermas de $13^{\circ}C$ (prof. = 0 metros), $12^{\circ}C$ (prof. = 200 metros), $6^{\circ}C$ (prof. = 500 metros) e $3,5^{\circ}C$ (prof. = 1000 metros) em 1960 (preto) e em 2010 (amarelo). As linhas tracejadas indicam as seções das Figuras 4.16 e 4.17.

Figura 4.16: Tendência linear de temperatura ($^{\circ}C.ano^{-1}$) em uma seção na longitude de $25^{\circ}E$. As linhas mais finas são a média da componente zonal de velocidade ($m.s^{-1}$), com valores positivos indicando sentido de oeste para leste. As linhas mais espessas indicam as isotermas ($^{\circ}C$) em 1960 (preto) e em 2010 (amarelo).

Figura 4.17: Mesmo que a Figura 4.16, mas para uma seção em $20^{\circ}E$.

A Figura 4.18 apresenta mapas de correlação entre a tensão de cisalhamento do vento (rotacional e componentes zonal e meridional) e as médias espaciais dos campos de SSH e SST entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$. As séries utilizadas nas correlações tiveram a tendência linear e os sinais com período menor que 4 anos removidos. Os campos de SSH e SST apresentam maior correlação com o rotacional do vento ao sul da África do Sul, entre $40^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$. Nessa região, o rotacional da tensão de cisalhamento do vento apresenta tendência positiva (Figura 3.1) em decorrência da migração para o sul dos ventos de oeste, e a alta correlação com os dados do modelo indicam que as os aumentos na SSH e na SST estão relacionados a essas mudanças. A Figura 4.19 mostra as séries temporais de SSH e SST utilizadas no cálculo das correlações, porém com as tendências lineares mantidas, e a série temporal da média espacial do rotacional da tensão de cisalhamento do vento entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $45^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$. As variações decadais e interdecadais na SSH e SST na região das Agulhas seguem as variações do rotacional do vento e do índice do SAM calculado apenas com os meses de verão. Esses resultados mostram a influência da tendência do SAM na circulação do Sistema Agulhas, e evidenciam uma possível consequência do aquecimento global na região de transição entre os giros do Alântico Sul e do Índico Sul. Entre o final da década de 1960 e o começo da de 1980, ocorre um aumento considerável em todas as séries temporais apresentadas

na Figura 4.19. Após um período estável, o rotacional e a SSH sofrem um aumento abrupto no início da década de 1990, seguindo o índice do SAM, enquanto que a SST segue crescendo de maneira mais suave. A partir do ano 2000, a SSH perde intensidade, o que também ocorre com o índice do SAM e com o rotacional do vento. No final da década de 2000, todas as séries apresentam uma intensificação seguida por um decaimento.

Figura 4.18: Mapas de correlação entre o vento (rotacional e componentes zonal e meridional) e as médias espaciais dos campos de SSH (A, C e E, respectivamente) e SST (B, D e F, respectivamente) entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$. As linhas mais espessas pretas indicam os valores críticos para o nível de significância de 95% (0,56). Nas séries temporais utilizadas, foram removidos a tendência linear e os sinais com período menor que 4 anos.

Figura 4.19: De cima para baixo: índice do SAM considerando apenas os meses de dezembro, janeiro e fevereiro; média espacial entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $45^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$ do rotacional da tensão de cisalhamento do vento, em $N.m^{-3}$; média espacial de SSH entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$, em metros; média espacial de SST entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$, em $^{\circ}C$. Em vermelho (azul) estão os valores acima (abaixo) da média. Todas as séries foram filtradas com filtro passa-baixa, com frequência de corte de 4 anos.

O efeito da migração dos ventos de oeste para o sul nos campos de SSH e SST na região das Agulhas também está presente no mapa de correlação destes campos com a componente zonal do vento (Figura 4.18 C e D, respectivamente). Esses mapas mostram uma forte correlação negativa ao sul da África, onde, devido a migração para o sul dos ventos de oeste, ocorre um enfraquecimento dos ventos (Figura 3.2). Pelo mesmo motivo, existe uma máxima correlação positiva entre a componente zonal do vento e a SSH ao sul de $50^{\circ}S$, região onde os ventos de oeste ganham força. Já no caso da componente meridional do vento, as maiores correlações ocorrem apro-

ximadamente na longitude de $50^{\circ}E$, entre $36^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$. Nessa região predominam os ventos de oeste, e devido a migração desses para o sul, a componente meridional, que é negativa, perde força (Figura 3.3). A correlação positiva indica que a migração para o sul do giro subtropical atmosférico gera um aumento nos campos de SSH e SST.

Figura 4.20: Médias zonais (entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$) das latitudes do rotacional zero do vento (A), da SSH zero (B) e da isoterma de $13^{\circ}C$ (C). Foram eliminados os sinais com período menor que 4 anos. Em vermelho (azul) estão os valores acima (abaixo) da média.

A evolução da posição do rotacional zero e da STF ao sul da região das Agulhas está ilustrada na Figura 4.20. Esta Figura mostra as séries temporais das médias zonais entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$ da latitude do rotacional zero (A), e das latitudes do SSH zero (B) e SST= $13^{\circ}C$ (C), representando a localização da STF nos dados de SSH e SST, respectivamente. Tanto a latitude da SSH zero como a da SST= $13^{\circ}C$ acompanham a migração para o sul do rotacional zero do vento, que inicia a partir do final da década de 1960. Apesar disso, apenas a SSH zero sofre a inversão na tendência observada no rotacional zero, nos últimos 15 anos das séries. As diferenças

observadas no comportamento dos campos de SSH e SST se deve principalmente, à relaxação utilizada nos dados de SST.

4.3 Intensificação superficial da AC e aumento do vazamento das Agulhas

As mudanças verificadas no Sistema Agulhas são acompanhadas por uma intensificação superficial das correntes desse sistema. A Figura 4.21 apresenta as tendências lineares de energia cinética turbulenta em diferentes profundidades no sudoeste do Índico. Nos gráficos referentes a superfície e a profundidade de 200 metros, é possível observar uma intensificação sobre a AC e sobre a ARC. Nas profundidades de 500 e 1000 metros, ocorreu um enfraquecimento tanto da AC como da ARC. No entanto, na retroflexão da AC, a energia cinética turbulenta aumenta em todas as profundidades analisadas, indicando um possível desacoplamento entre a intensidade da AC e o vazamento das Agulhas. Nas profundidades de 0 e 200 metros, esse aumento se estende da retroflexão em direção ao Atlântico pela região por onde se propagam os anéis das Agulhas (corredor dos anéis das Agulhas).

As Figuras 4.22 e 4.23 mostram a tendência linear da energia cinética turbulenta em seções meridionais nas longitudes de $25^{\circ}E$ e $20^{\circ}E$. Assim como nas Figuras 4.16 e 4.17, as linhas pretas e amarelas indicam as isolinhas de energia cinética turbulenta em 1960 e 2010, respectivamente, e as linhas mais finas indicam o campo médio da componente zonal da velocidade. Na seção em $25^{\circ}E$ é nítida a intensificação da AC e da ARC nos primeiros 700 metros de profundidade, além do deslocamento para o sul dessas duas correntes. Já na seção em $20^{\circ}E$, a intensificação na AC não chega a 600 metros de profundidade, sendo mais intensa, nos primeiros 200 metros, enquanto que a ARC sofre apenas um leve aumento de energia cinética turbulenta entre 200 e 800 metros de profundidade. Entre $43^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$, é possível observar uma forte intensificação de um dos núcleos da ACC.

Figura 4.21: Tendência linear da energia cinética turbulenta entre 1960 e 2010 (em $m^2.s^{-2}.ano^{-1}$). Os contornos representam o campo médio. As linhas tracejadas indicam as seções das Figuras 4.22 e 4.23.

Figura 4.22: Tendência linear de energia cinética turbulenta (em $m^2.s^{-2}.ano^{-1}$) em uma seção na longitude de $25^{\circ}E$. As linhas mais finas mostram a média da componente zonal de velocidade (em $m.s^{-1}$), com valores positivos indicando sentido de oeste para leste. As linhas mais espessas indicam as isolinhas de energia cinética turbulenta (em $m^2.s^{-2}$) em 1960 (preto) e em 2010 (amarelo).

Figura 4.23: Mesmo que a Figura 4.22, mas para uma seção em $20^{\circ}E$.

O aumento de energia cinética turbulenta nas camadas superficiais do Sistema Agulhas pode ser observado no transporte da AC. A Figura 4.24 mostra as séries temporais de transporte em toda a coluna d'água (esquerda) e nos primeiros 200 metros de profundidade (direita) nas seções apresentadas anteriormente (Figuras 4.2 e 4.3). No transporte em toda a coluna d'água, as séries apresentam fracas tendências negativas, com exceção da série da seção C, que apresenta um leve aumento no fluxo. Já nos primeiros 200 metros de profundidade, todas as seções apresentam aumento no transporte. Entre 1996 e 2010, ocorre uma redução do fluxo das seções mais ao norte (A e B), diferentemente da seção C, onde o transporte segue aumentando. Isso evidencia uma intensificação da célula de recirculação entre $25^{\circ}E$ e $35^{\circ}E$, descrita anteriormente. Apesar desse aumento na seção C, a seção D apresenta uma redução no transporte a partir de 2000. Isso ocorre porque além do aumento da recirculação da ARC para a AC, aumenta também a parte da AC que passa pela seção C e cai diretamente na ARC.

A célula de recirculação entre as seções C e D aparentemente gera um desacoplamento na variabilidade dos segmentos norte e sul da AC. As séries temporais de transporte das seções A e B apresentam uma correlação de 0,84, enquanto que as das

seções B e C apresentam correlação de 0,61. A correlação cai drasticamente entre as seções C e D (0,37), estando abaixo do valor crítico para um nível de significância de 95% (0,56).

Figura 4.24: Transporte calculado nas seções A (azul), B (vermelho), C (preto) e D (verde), ilustradas nas Figuras 4.2 e 4.3. Na esquerda, estão as séries de transporte em toda a coluna d'água, enquanto que na direita, estão as séries de transporte calculadas entre a superfície e a profundidade de 200 metros. As linhas pontilhadas indicam a tendência linear de cada curva.

A Figura 4.25 apresenta o transporte da AC e o vazamento das Agulhas calculados na seção em $20^{\circ}E$ (Figuras 4.2 e 4.5). O transporte da AC apresenta uma fraca tendência negativa, porém, assim como nas outras seções, nos primeiros 200 metros a tendência é levemente positiva (não apresentado). Nessa seção, a AC segue o transporte da seção D (até 200 metros de profundidade), apresentando uma correlação 0,61.

Já o vazamento das Agulhas, apresentou um aumento decadal de 1,14 Sv, resultando em um aumento de 5,8 Sv entre 1960 e 2010. A série temporal apresenta um pico de transporte no início da década de 1960 seguida por uma forte queda. Depois disso, ocorre um aumento entre o fim da década de 1960 e 1979 e outro aumento entre o início da década de 1980 e o ano 2000. Os últimos 10 anos apresentam uma redução no transporte. O vazamento das Agulhas apresenta uma correlação de 0,68 com a AC calculada nessa mesma seção, e 0,60 com o transporte da AC nos primeiros 200 metros da seção D.

Conforme observado anteriormente na Figura 4.21, a intensificação superficial da AC ao norte da seção D não tem correlação com o aumento do vazamento das Agulhas. Por outro lado, transporte do Índico para o Atlântico calculado na seção em $20^{\circ}E$ está diretamente relacionado à migração para o sul da STF, sendo esta forçada pelo deslocamento em direção ao polo dos ventos de oeste. A série temporal do vazamento das Agulhas (Figura 4.25) apresenta correlação de 0,65 com a média do rotacional do vento entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $45^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$, e correlação de 0,75 com a média do SSH entre $20^{\circ}E$ e $40^{\circ}E$, e $35^{\circ}S$ e $45^{\circ}S$, ambas as séries mostradas na Figura 4.19.

Figura 4.25: Transporte da AC e vazamento das Agulhas (ambos em Sv) calculados a partir da integral da componente zonal da velocidade na seção em $20^{\circ}E$, apresentada nas Figuras 4.2 e 4.5. A seção é limitada meridionalmente pelo continente africano e pela latitude de $42^{\circ}S$, e limitada verticalmente pela profundidade de 1300 metros. Os sinais com período menor que 4 anos foram removidos das séries. As linhas pontilhadas indicam as tendências lineares de cada série.

Capítulo 5

Discussão

Os resultados aqui apresentados mostram que a intensificação e migração para o sul dos ventos de oeste do Hemisfério Sul, presentes nos dados de reanálise do NCEP/NCAR entre 1960 e 2010, induziram uma migração em direção ao polo da STF ao sul do Sistema Agulhas, aumentando a região de comunicação entre os giros subtropicais do Índico e do Atlântico Sul, e consequentemente, intensificando o vazamento das Agulhas. Esses resultados estão de acordo com De Ruijter (1982), que associou a intensidade do vazamento das Agulhas a distância entre a posição do rotacional zero do vento e a extremidade sul do continente africano.

A tendência de aumento do vazamento das Agulhas entre 1960 e 2010 foi bastante próxima à simulada por Biastoch et al. (2009). Os autores utilizaram um modelo de alta resolução $1/10^\circ$ na região das Agulhas aninhado a um modelo global ($1/2^\circ$) e estimaram o transporte do Índico para o Atlântico através de derivadores numéricos. Seus resultados mostram um aumento de 1,2 Sv por década entre 1968 e 2004, contra 1,14 Sv por década estimada nessa dissertação. Os autores também atribuíram o aumento do vazamento das Agulhas à migração em direção ao polo dos ventos de oeste.

Tanto nos resultados aqui apresentados como no trabalho de Biastoch et al. (2009), outra consequência da migração para o sul da STF foi o aquecimento das águas ao sul do continente africano. Esse aquecimento ocorreu porque, com o des-

locamento da STF em direção ao polo, as águas mais quentes dos giros subtropicais alcançaram maiores latitudes. Na região das Agulhas, esse aquecimento foi observado na SST por Rouault et al. (2009). Através de dados de radiômetro AVHRR e médias anuais da SST de Hadley e Reynolds (Rayner et al., 2003), os autores identificaram um aumento na SST entre 1980 e 2006, porém, não relacionaram esse aquecimento à migração para o sul do limite entre os giros subtropicais e a ACC. Através de modelagem numérica, os autores concluíram que o aquecimento observado foi induzido por uma intensificação do rotacional do vento sobre o Índico Sul. Essa intensificação teria gerado um aumento no transporte de águas mais quentes, ao sul de Madagascar, ocasionando um aumento no transporte e na temperatura da AC. Os autores também estimaram um aumento no vazamento das Agulhas, mas diferentemente dos resultados apresentados nesta dissertação, relacionaram esse aumento à intensificação da AC.

No presente trabalho foi mostrado que, ao sul do Sistema Agulhas, a simulação analisada também apresentou um aquecimento das águas em profundidades superiores a 1000 metros na ACC. Este resultado está de acordo com Gille (2008). A autora comparou dados históricos de temperatura dos primeiros 1100 metros de profundidade do Hemisfério Sul medidos desde 1930 oriundos do *World Ocean Database* (WODB) a dados medidos na década de 1990. Suas análises mostram que ocorreu aquecimento em todas as profundidades ao longo da ACC. A autora atribuiu esse fato a um deslocamento em direção ao polo da ACC forçado pela migração para o sul dos ventos de oeste.

A resposta do sistema Agulhas às mudanças no regime de ventos observada no modelo está de acordo com as mudanças na circulação e com o aquecimento das regiões extra-tropicais do Hemisfério Sul investigadas por Cai (2006). O autor utilizou um modelo analítico (*Godfrey's Island Rule Model*) para analisar o efeito das tendências nos dados de vento do NCEP/NCAR entre 1978 e 2002 na circulação do super-giro formado pela conexão dos giros subtropicais do Pacífico Sul, do Índico e do Atlântico Sul. Seus resultados mostram que a tendência positiva do rotacional

do vento nas latitudes extratropicais gerou uma intensificação e uma migração do super-giro para o sul, aumentando a conexão entre as bacias oceânicas. As mudanças na circulação forçadas pela tendência do vento ocasionou uma advecção de águas mais quentes para o sul, o que segundo o autor, constitui uma explicação plausível ao aquecimento mais acentuado observado no Oceano Austral nas últimas décadas.

As mudanças na SST e SSH na região das Agulhas ocorreram de forma mais intensa nos meses de verão, evidenciando a influência da tendência positiva do SAM na região. Esses resultados corroboram com Alory et al. (2007), que analisaram o aquecimento oceânico no Índico, reproduzido nas simulações de modelos climáticos do IPCC. Nessas simulações, o aquecimento foi mais acentuado entre $40^{\circ}S$ e $50^{\circ}S$, estando relacionado à tendência positiva do índice do SAM. Em outro trabalho, Cai et al. (2005), também utilizando modelos climáticos, atribuíram a intensificação e migração dos giros subtropicais do Hemisfério Sul em direção ao polo, assim como o aquecimento das águas nessas regiões, à tendência positiva do SAM. Nesse trabalho, os autores utilizaram forçantes antrópicas para gerar a tendência da SAM, e mostraram que a redução na camada de ozônio e o aumento da concentração dos gases do efeito estufa podem ser responsáveis pelas mudanças na circulação dos giros oceânicos.

Os resultados do modelo apresentaram uma inversão na tendência da SSH na região das Agulhas e do vazamento das Agulhas na última década, enquanto que no rotacional do vento, essa inversão ocorreu nos últimos 15 anos. Essas estão relacionadas a um enfraquecimento da SAM a partir de 1999. No Pacífico Sul, Roemmich et al. (2007) observaram, através de dados altimétricos, hidrográficos e de flutuadores, uma intensificação no giro subtropical entre 1993 e 2004, seguido de um enfraquecimento a partir de 2004. Os autores atribuíram essas variações à intensificação seguida de um enfraquecimento do rotacional do vento, sendo esses últimos associados ao índice da SAM. Em outro trabalho na mesma região, Qiu e Chen (2006), através de dados altimétricos, observaram um comportamento semelhante na SSH: na década de 1990 ocorreu um aumento, seguido de uma redução a partir

de 2002. Os autores também atribuíram essa variação decadal à inversão do comportamento do rotacional do vento sobre essa região a partir de 1999.

Se a tendência positiva da SAM nos últimos 50 anos tiver origem antrópica, as mudanças observadas na última década podem significar apenas uma variação de menor período. Gupta et al. (2009) fizeram uma projeção sobre as tendências da circulação no Hemisfério Sul no século XXI a partir de saídas de modelos utilizados no AR4 do IPCC. As projeções para a circulação atmosférica preveem a continuidade da tendência do SAM. Como consequência, os autores projetaram a intensificação e migração para o sul da ACC acompanhada por um aquecimento das águas nas latitudes extra-tropicais, principalmente na região da STF.

O aumento da temperatura do mar vem ocorrendo em todas as bacias oceânicas do planeta desde 1950 (Levitus, 2000). Este aquecimento é atribuído ao desequilíbrio no balanço radioativo planetário observado nas últimas décadas (Hansen et al., 1997). Entre as bacias oceânicas, a do Atlântico é a que tem sofrido maior aquecimento. Entre as décadas de 1970 e 2000, nos primeiros 700 metros de profundidade, a taxa de armazenamento de calor do Atlântico (2.10^{22} J por década) é praticamente igual às taxas do Pacífico e do Índico somadas ($1,5.10^{22}$ J por década e $0,5.10^{22}$ J por década, respectivamente) (Levitus et al., 2009). Lee et al. (2011) investigaram esse aquecimento diferenciado do Atlântico através de modelagem numérica, e o atribuíram ao aumento do fluxo de calor promovido pelo vazamento das Agulhas. Parte desse aumento ocorreu pelo aquecimento das águas transportadas do Índico para o Atlântico, porém, ela foi mais fortemente influenciada pelo aumento do vazamento das Agulhas.

Além do aumento do armazenamento de calor do Oceano Atlântico, outra possível consequência do aumento do vazamento das Agulhas é a intensificação do transporte de calor em direção ao equador que ocorre no Atlântico Sul. Esse transporte de calor foi investigado por Dong et al. (2011) através de modelagem numérica. Seus resultados mostram uma intensificação do transporte meridional de calor em uma

seção em $34^{\circ}S$ entre 1980 e 1993, e que essa está relacionada a um aumento do transporte de calor do Índico para o Atlântico. Além disso, os autores observaram uma intensificação da AMOC nessa seção no mesmo período.

Capítulo 6

Conclusões

Apesar de já ser um fato conhecido e descrito na literatura, a migração dos ventos de oeste no Hemisfério Sul em direção ao polo foi um dos motivadores principais do presente trabalho. Assim, uma análise detalhada do comportamento dos ventos produzidos pela reanálise do NCEP/NCAR, usados para forçar o modelo, foi incluída como um dos objetivos específicos. O resultado foi que, no período analisado, os dados apresentaram uma migração para o sul dos ventos de oeste do Hemisfério Sul entre o final da década de 1960 e 2010. A latitude da média zonal do rotacional da tensão de cisalhamento do vento zero apresentou uma migração de aproximadamente 0.2° por década sobre o Índico e de aproximadamente 0.34° por década ao sul da região das Agulhas. As mudanças nos ventos de oeste estão de acordo com a tendência do índice da SAM, com tendências mais fortes no verão austral.

O foco desta dissertação é investigar os impactos da mudança verificada nos ventos de oeste sobre a circulação oceânica, na região incluindo a retroflexão da AC. Os resultados do modelo mostram nessa região um aumento da SSH e um aquecimento das águas entre o sul do sistema Agulhas e a ACC. Na ACC, o aquecimento chega a profundidades superiores a 1000 metros. Essas mudanças estão relacionadas a migração para o sul da STF, que por sua vez, está correlacionada com a migração para o sul dos ventos de oeste.

Na região adjacente à costa leste da África, a AC apresentou um aumento no

transporte nas camadas mais superficiais, porém esse transporte não está diretamente relacionado à migração para o sul dos ventos de oeste, e nem ao aumento do transporte do Índico para o Atlântico. O vazamento das Agulhas, por sua vez, apresentou correlação com o campo médio de SSH na região das Agulhas e com o campo médio do rotacional da tensão de cisalhamento do vento ao sul da região das Agulhas. Essas correlações mostram que a intensidade do vazamento das Agulhas sobre longos períodos (nesse trabalho, maiores que 4 anos), é influenciada pela latitude da STF, e consequentemente pela localização do rotacional zero da tensão de cisalhamento do vento.

Os resultados das análises do modelo corroboram a hipótese de que a migração para o sul dos ventos de oeste do Hemisfério Sul tem intensificado o transporte do Índico para o Atlântico nas últimas décadas. O vazamento das Agulhas apresentou um aumento de aproximadamente 1,14 Sv por década, resultando em um aumento entre 1960 e 2010 de 5,8 Sv.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

As conclusões obtidas a partir deste trabalho foram em cima de resultados de uma simulação que resolve marginalmente a meso-escala oceânica. Conforme foi mostrado na comparação com dados altimétricos, a variabilidade no sistema Agulhas foi subestimada pelo modelo. Tendo em vista a importância dos processos de meso escala no vazamento das Agulhas, fica a sugestão que um trabalho nos mesmos moldes desta dissertação seja implementado para uma simulação com uma grade mais refinada. Simulações utilizando grades com resolução de $0,1^\circ$ apresentam uma boa correspondência da variabilidade do sistema Agulhas com dados altimétricos (Biaستoch et al., 2008; van Sebille et al., 2009).

Outra sugestão para um trabalho futuro é a avaliação do vazamento das Agulhas através de derivadores numéricos. As estimativas lagrangeanas permitem traçar

a origem das águas que passam pela retroflexão da AC e terminam no Oceano Atlântico. Por outro lado, estimativas eulerianas, como a aplicada neste trabalho, estão suscetíveis a contaminação por outros fluxos, como o da ACC e da Corrente do Atlântico Sul.

Referências Bibliográficas

- Alory, G., S. Wijffels e G. Meyers, 2007. Observed temperature trends in the Indian Ocean over 1960–1999 and associated mechanisms. *Geophysical Research Letters*, **34**(2), 2–7.
- Arhan, M., H. Mercier e J. R. E. Lutjeharms, 1999. The disparate evolution of three agulhas rings in the south atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research*, **104**.
- Bard, E. e R. E. M. Rickaby, 2009. Migration of the subtropical front as a modulator of glacial climate. *Nature*, **460**(7253), 380–3.
- Beal, L. M., W. P. M. De Ruijter, A. Biastoch, R. Zahn, M. Cronin, J. Hermes, J. Lutjeharms, G. Quartly, T. Tozuka, S. Baker-Yeboah, T. Bornman, P. Cippolini, H. Dijkstra, I. Hall, W. Park, F. Peeters, P. Penven, H. Ridderinkhof e J. Zinke, 2011. On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. *Nature*, **472**(7344), 429–436.
- Beckmann, A., C. Böning, C. Köberle e J. Willebrand, 1994. Effects of increased horizontal resolution in a simulation of the north atlantic ocean. *Journal of physical oceanography*.
- Biastoch, A., L. M. Beal, J. R. E. Lutjeharms e T. G. D. Casal, 2009. Variability and coherence of the agulhas undercurrent in a high-resolution ocean general circulation model. *Journal of Physical Oceanography*, **39**(10), 2417.
- Biastoch, A., C. W. Böning e J. R. E. Lutjeharms, 2008. Agulhas leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature*, **456**(7221), 489–92.

- Biaostoch, A., J. Lutjeharms, C. Böning e M. Scheinert, 2008. Mesoscale perturbations control inter-ocean exchange south of Africa. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20602.
- Bleck, R., C. Rooth, D. Hu e L. Smith, 1992. Salinity-driven thermocline transients in a wind-and thermohaline-forced isopycnic coordinate model of the North Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, **22**(12), 1486–1505.
- Bryden, H. L., L. M. Beal e L. M. Duncan, 2005. Structure and Transport of the Agulhas Current and Its Temporal Variability. *Journal of Oceanography*, **61**(3), 479–492.
- Cai, W., 2006. Antarctic ozone depletion causes an intensification of the Southern Ocean super-gyre circulation. *Geophysical Research Letters*, **33**(3), 1–4.
- Cai, W. e T. Cowan, 2007. Trends in southern hemisphere circulation in ipcc ar4 models over 1950–99: Ozone depletion versus greenhouse forcing. *Journal of Climate*, **20**(4).
- Cai, W., G. Shi, T. Cowan, D. Bi e J. Ribbe, 2005. The response of the southern annular mode, the east australian current, and the southern mid-latitude ocean circulation to global warming. *Geophysical Research Letters*, **32**(23), 94–97.
- Casal, T. G. D., L. M. Beal, R. Lumpkin e W. E. Johns, 2009. Structure and downstream evolution of the Agulhas Current system during a quasi-synoptic survey in February–March 2003. *Journal of Geophysical Research*, **114**(C3), 1–16.
- Casey, K. S., T. B. Brandon, P. Cornillon e R. Evans, 2010. The past, present and future of the avhrr pathfinder sst program. *Oceanography from Space: Revisited*.
- Clark, P. U., N. G. Pisias, T. F. Stocker e A. J. Weaver, 2002. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature*, **415**(6874), 863–9.
- De Ruijter, W., 1982. Asymptotic analysis of the Agulhas and Brazil Current systems. *Journal of Physical Oceanography*, **12**(4), 361–373.

- De Ruijter, W., H. Aken, E. Beier, J. Lutjeharms, R. Matano e M. Schouten, 2004, March). Eddies and dipoles around South Madagascar: formation, pathways and large-scale impact. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **51**(3), 383–400.
- De Ruijter, W., H. Ridderinkhof, J. Lutjeharms, M. Schouten e C. Veth, 2002. Observations of the flow in the mozambique channel. *Geophysical Research Letters*, **29**.
- De Ruijter, W., P. van Leeuwen, W. Weijer, A. Biastoch, S. Drijfhout, J. Lutjeharms, R. Matano e T. Pichevin, 1999. Indian-Atlantic interocean exchange- Dynamics, estimation and impact. *Journal of Geophysical Research*, **104**(20), 20885–20910.
- Dijkstra, H. A. e W. P. M. de Ruijter, 2001. On the Physics of the Agulhas Current: Steady Retroflection Regimes. *Journal of Physical Oceanography*, **31**(10), 2971–2985.
- Dong, S., S. Garzoli e M. Baringer, 2011. The role of interocean exchanges on decadal variations of the meridional heat transport in the south atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, **41**(8), 1498–1511.
- Donners, J. e S. Drijfhout, 2004. The Lagrangian view of South Atlantic interocean exchange in a global ocean model compared with inverse model results. *Journal of physical oceanography* (1986), 1019–1035.
- Feron, R. C. V., W. De Ruijter e P. Van Leeuwen, 1998. A new method to determine the mean sea surface dynamic topography from satellite altimeter observations. *Journal of Geophysical Research*, **103**.
- Gille, S. T., 2008. Decadal-scale temperature trends in the southern hemisphere ocean. *Journal of Climate*, **21**(18), 4749–4765.
- Gillett, N. P. e D. W. J. Thompson, 2003. Simulation of recent southern hemisphere climate change. *Science (New York, N.Y.)*, **302**(5643), 273–5.
- Gordon, A. e J. Lutjeharms, 1987. Stratification and circulation at the agulhas retroflection. *Deep Sea Research Part A*, **34**(4).

- Gordon, A. e A. Piola, 1983. Atlantic Ocean upper layer salinity budget. *Journal of physical oceanography*, **13**(7), 1293–1300.
- Gordon, A. L., 1986. Interocean Exchange of Thermocline Water. *Journal of Geophysical Research*, **91**(C4), 5037–5046.
- Gordon, A. L., R. F. Weiss, W. M. Smethie e M. J. Warner, 1992. Thermocline and Intermediate Water Communication Between the South Atlantic and Indian Oceans. *Journal of Geophysical Research*, **97**(C5), 7223–7240.
- Gupta, A., A. Santoso, A. Taschetto, C. Ummenhofer, J. Trevena e M. England, 2009. Projected changes to the Southern Hemisphere ocean and sea ice in the IPCC AR4 climate models. *Journal of Climate*, **22**, 3047–3078.
- Haarsma, R. J., E. J. D. Campos, S. Drijfhout, W. Hazeleger e C. Severijns, 2009. Impacts of interruption of the Agulhas leakage on the tropical Atlantic in coupled ocean-atmosphere simulations. *Climate Dynamics* (October), 1–31.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, a. Lacis, K. Asamoah, K. Beckford, S. Borenstein, E. Brown, B. Cairns, B. Carlson, B. Curran, S. de Castro, L. Druyan, P. Etwarrow, T. Ferede, M. Fox, D. Gaffen, J. Glascoe, H. Gordon, S. Hollandsworth, X. Jiang, C. Johnson, N. Lawrence, J. Lean, J. Lerner, K. Lo, J. Logan, a. Lockett, M. P. McCormick, R. McPeters, R. Miller, P. Minnis, I. Ramberran, G. Russell, P. Russell, P. Stone, I. Tegen, S. Thomas, L. Thomason, a. Thompson, J. Wilder, R. Willson e J. Zawodny, 1997. Forcings and chaos in interannual to decadal climate change. *Journal of Geophysical Research*, **102**(D22), 25679–25720.
- Hermes, J., C. Reason e J. Lutjeharms, 2007. Modeling the variability of the greater agulhas current system. *Journal of climate*, **20**(13), 3131–3146.
- Kilpatrick, K., G. Podesta e R. Evans, 2001. Overview of the noaa/nasa advanced very high resolution radiometer pathfinder algorithm for sea surface temperature and associated matchup database. *Journal of Geophysical Research*, **106**.
- Lee, S.-K., W. Park, E. van Sebille, M. O. Baringer, C. Wang, D. B. Enfield, S. G. Yeager e B. P. Kirtman, 2011. What caused the significant increase in atlantic ocean

- heat content since the mid-20th century? *Geophysical Research Letters*, **38**(17), 1–6.
- Levitus, S., 2000. Warming of the World Ocean. *Science*, **287**(5461), 2225–2229.
- Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. a. Locarnini, H. E. Garcia e a. V. Mishonov, 2009. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophysical Research Letters*, **36**(7).
- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer e H. E. Garcia, 2006. *World Ocean Atlas 2005* (S. Levitus ed.), Volume Volume 1: Temperature. Washington, D.C.: NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office.
- Lumpkin, R. e S. Garzoli, 2011. Interannual to decadal changes in the western south atlantic’s surface circulation. *Journal of Geophysical Research*, **116**(C1), 1–10.
- Lutjeharms, J., 1988. Remote sensing corroboration of retroflexion of the east madagascar current. *Deep Sea Research Part A*, **35**(12).
- Lutjeharms, J. R. E., 2006. *The Agulhas Current*. Springer, Berlin.
- Lutjeharms, J. R. E., N. D. Bang e C. P. Duncan, 1981. Characteristics of the currents east and south of madagascar. *Deep Sea Research*, **28**(9).
- Macdonald, A., 1998. The global ocean circulation: A hydrographic estimate and regional analysis. *Progress In Oceanography*, **41**, 281–382.
- Marshall, G. J., 2003. Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *Journal of Climate*, **16**(24).
- Marshall, G. J., P. A. Stott, J. Turner, W. M. Connolley, J. C. King e T. A. Lachlan-Cope, 2004. Causes of exceptional atmospheric circulation changes in the southern hemisphere. *Geophysical Research Letters*, **31**.
- Matano, R. e E. Beier, 2003, January). A kinematic analysis of the Indian/Atlantic interocean exchange. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **50**(1), 229–249.

- Paldor, N. e J. R. E. Lutjeharms, 2009. Why is the stability of the Agulhas Current geographically bi-modal? *Geophysical Research Letters*, **36**(14), 1–4.
- Peeters, F. J. C., R. Acheson e G. J. A. Brummer, 2004. Vigorous exchange between the Indian and Atlantic oceans at the end of the past five glacial periods. *Nature*, **430**(7000), 661–665.
- Qiu, B. e S. Chen, 2006. Decadal variability in the large-scale sea surface height field of the south pacific ocean: Observations and causes. *Journal of Physical Oceanography*, **36**(9), 1751–1762.
- Quartly, G., J. J. H. Buck, M. A. Srokosz e A. C. Coward, 2006. Eddies around madagascar — the retroflexion re-considered. *Journal of Marine Systems*, **63**.
- Rayner, N., D. Parker, E. Horton, C. Folland, L. Alexander, D. Rowell, E. Kent e A. Kaplan, 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *Journal of Geophysical Research*, **108**.
- Reason, C., J. Lutjeharms, J. Hermes, A. Biastoch e R. Roman, 2003. Inter-ocean fluxes south of africa in an eddy-permitting model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **50**(1), 281–298.
- Richardson, P. L., 2007. Agulhas leakage into the Atlantic estimated with subsurface floats and surface drifters. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **54**(8), 1361–1389.
- Rintoul, S. R., 1991. South atlantic interbasin exchange. *Journal of Geophysical Research*, **96**(C2), 2675–2692.
- Roemmich, D., J. Gilson, R. Davis, P. Sutton, S. Wijffels e S. Riser, 2007. Decadal spinup of the south pacific subtropical gyre. *Journal of Physical Oceanography*, **37**(2), 162–173.
- Rouault, M., P. Penven e B. Pohl, 2009. Warming in the Agulhas Current system since the 1980's. *Geophysical Research Letters*, **36**(12), 1–5.

- Schmid, C., O. Boebel, W. Zenk, J. Lutjeharms, S. Garzoli, P. Richardson e C. Barron, 2003. Early evolution of an agulhas ring. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **50**(1), 141–166.
- Schott, F. e J. P. McCreary, 2001. The monsoon circulation of the indian ocean. *Progress In Oceanography*, **51**.
- Schouten, M., W. De Ruijter e P. Van Leeuwen, 2002. Upstream control of agulhas ring shedding. *Journal of Geophysical Research*, **107**.
- Sloyan, B. M. e S. R. Rintoul, 2000. Estimates of Area-Averaged Diapycnal Fluxes from Basin-Scale Budgets. *Journal of Physical Oceanography*, **30**(9), 2320–2341.
- Speich, S., B. Blanke e W. Cai, 2007. Atlantic meridional overturning circulation and the Southern Hemisphere supergyre. *Geophysical Research Letters*, **34**(23), 1–5.
- Stammer, D., R. Tokmakian, A. Semtner e C. Wunsch, 1996. How well does a 1/4 global circulation model simulate large-scale oceanic observations? *Journal of Geophysical Research*, **101**(C11), 25779–25.
- Stommel, H. e A. B. Arons, 1960. On the abyssal circulation of the world ocean - ii. an idealized model of the circulation pattern and amplitude in oceanic basins. *Deep Sea Research*, **6**, 217–230.
- Stramma, L. e J. R. E. Lutjeharms, 1997. The flow field of the subtropical gyre of the south indian ocean. *Journal of Geophysical Research*, **102**.
- Thompson, D. W. J. e S. Solomon, 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science (New York, N.Y.)*, **296**(5569), 895–9.
- Thompson, D. W. J. e J. Wallace, 2000. Annular modes in the extratropical circulation. part i: Month-to-month variability*. *Journal of Climate*, **13**(5).
- Treguier, A., O. Boebel, B. Barnier e G. Madec, 2003, January). Agulhas eddy fluxes in a 1/6 Atlantic model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **50**(1), 251–280.

- van Leeuwen, P. J., W. P. M. de Ruijter e J. R. E. Lutjeharms, 2000. Natal pulses and the formation of Agulhas rings. *Journal of Geophysical Research*, **105**(C3), 6425–6436.
- van Sebille, E., P. van Leeuwen, a. Biastoch, C. Barron e W. de Ruijter, 2009. Lagrangian validation of numerical drifter trajectories using drifting buoys: Application to the Agulhas system. *Ocean Modelling*, **29**(4), 269–276.
- Warren, B., 1983. Why is no deep water formed in the north pacific? *Journal of Marine Research*, **41**(2), 327–347.
- Weijer, W., 2002. Response of the Atlantic overturning circulation to South Atlantic sources of buoyancy. *Global and Planetary Change*, **34**(3-4), 293–311.