



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
CURSO DE OCEANOGRAFIA**

**RAFAEL CAMPOS MARTINS MARQUES**

**ESTUDO DA VARIABILIDADE SAZONAL DA  
BIFURCAÇÃO DA CORRENTE SUL EQUATORIAL E SUA  
RELAÇÃO COM AS CORRENTES DE CONTORNO  
OESTE AO LARGO DA COSTA DO BRASIL**

Salvador  
2014

**RAFAEL CAMPOS MARTINS MARQUES**

**ESTUDO DA VARIABILIDADE SAZONAL DA  
BIFURCAÇÃO DA CORRENTE SUL EQUATORIAL E SUA  
RELAÇÃO COM AS CORRENTES DE CONTORNO  
OESTE AO LARGO DA COSTA DO BRASIL**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia,  
Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia,  
como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel  
em Oceanografia.

Orientador: **Prof. Dr. Clemente Augusto Souza Tanajura**

Salvador  
2014

TERMO DE APROVAÇÃO

RAFAEL CAMPOS MARTINS MARQUES

ESTUDO DA VARIABILIDADE SAZONAL DA  
BIFURCAÇÃO DA CORRENTE SUL EQUATORIAL E SUA  
RELAÇÃO COM AS CORRENTES DE CONTORNO  
OESTE AO LARGO DA COSTA DO BRASIL

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel  
em Oceanografia, Universidade Federal da Bahia, pela seguinte banca  
examinadora:

---

Guilherme Camargo Lessa  
Doutor em Ciências Marinhas pela University of Sydney, AUS  
Universidade Federal da Bahia

---

Janini Pereira  
Doutora em Oceanografia Física pela Universidade de São Paulo, BRA  
Universidade Federal da Bahia

---

Mauro Cirano  
Doutor em Oceanografia Física pela University of New South Wales, AUS  
Universidade Federal da Bahia

Salvador, 11 de fevereiro de 2014.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço aos meus queridos irmãos, DANIEL CAMPOS, GABRIEL CAMPOS, LUIZ ANTÔNIO CAMPOS, GUSTAVO MARQUES, LUCAS MARQUES e DARCY MARQUES, quem eu amo tanto.

Sobretudo, à minha mãe, MARTHA CAMPOS, principal apoiadora em tudo que realizei durante minha vida inteira. E também ao meu padasto e grande amigo, MÁRIO CASTRO, quem, há muito, faz-se constantemente presente em minha jornada.

À minha segunda mãe, LYNDA MAURÍCIO, uma pessoa que dispensa quaisquer comentários. E ao meu pai, FABIO MARQUES.

À minha querida tia, MARIELZA CAMPOS, por sempre zelar por mim, desde meus primeiros passos. Ao meu estimado tio, MARCEL CAMPOS, e sua esposa, MARIA LUIZA, por me acolherem nos momentos decisivos desta etapa. E a todos os demais membros de minha família.

A todos os professores e professoras com quem tive contato nos cursos de Oceanografia da Universidade Federal da Bahia, Ciências do Mar da Universidade de Vigo e Ciências Ambientais da Universidade de Buenos Aires, por abrirem meus olhos para novas descobertas. Em especial, ao meu orientador, professor CLEMENTE TANAJURA, quem eu admiro, tenho como referência e que acreditou em meu potencial. E também aos professores GUILHERME LESSA, JANINI PEREIRA e MAURO CIRANO, pela honra em aceitarem compor a banca examinadora deste trabalho.

Aos meus grandes amigos de conversas e confidências, alegrias e tristezas: ANDRÉ MARQUES, ANDREI MOREIRA, BRÁULIO PESSOA, ERALDO BARBOSA, FELIPE FERREIRA, FELIPE SANTOS, FILIPE SOUZA, GABRIEL MURICY, ICARO GRIMALDI, ISMAEL MOREIRA, LUCAS TEIXEIRA, MAURÍCIO SAMPAIO, PEDRO BACELLAR, VINÍCIUS DUPLAT e WALDEMIR ALBUQUERQUE.

Aos meus companheiros de graduação e também amigos. Especialmente, a DAVI MIGNAC e MATEUS LIMA, com quem compartilhei grande parte desta caminhada que se termina.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram positivamente para a conclusão desta importante etapa da minha vida.

*“Cultivar a ciência pela utilidade prática, imediata, é desvirtuar a alma da própria ciência. Sem o sonho e a fantasia a ciência se abastarda. É ciência morta.”*

*Malba Tahan*

## RESUMO

O trabalho que aqui se apresenta tem a intenção de contribuir para o entendimento da circulação de larga escala na borda oeste do Oceano Atlântico Sul, especialmente no que tange à variabilidade sazonal da Bifurcação da Corrente Sul Equatorial (BiCSE) e sua relação com a Corrente do Brasil (CB) e com a Subcorrente Norte do Brasil/Corrente Norte do Brasil (SNB/CNB). As análises foram realizadas a partir de saídas de temperatura, salinidade, e velocidades zonal e meridional provenientes do sistema *HYbrid Coordinate Ocean Model/Navy Coupled Ocean Data Assimilation* (HYCOM/NCODA) de 2004 a 2011. Os campos termohalinos produzidos pelo HYCOM/NCODA mostraram-se coerentes com as climatologias mensais e anuais do *World Ocean Atlas 2009* (WOA09) e com a literatura pertinente. Comparado aos campos de velocidade superficial do *Ocean Surface Current Analyses Real-Time* (OSCAR), o HYCOM/NCODA apresentou discrepâncias na ordem de  $0,12 \pm 0,08$  m/s na área de estudo. As maiores discrepâncias superaram 0,7 m/s, entretanto, as mesmas ocorreram fora da região de interesse do presente trabalho. Em uma média anual, a posição da BiCSE variou de 10°S na superfície a 25°S em 1000 m, migrando, portanto, 15° entre esses dois níveis, caracterizando, assim, sua dependência da profundidade. Sazonalmente, a BiCSE encontrou-se na superfície mais ao norte na primavera e mais ao sul no outono. Anualmente, a BiCSE entre 0 e 200 m posicionou-se mais ao norte (13°S) em dezembro e mais ao sul (18,5°S) em maio, com a média em 16°S. Esse comportamento da BiCSE em seus primeiros 200 m evidenciou forte correlação negativa com a SNB/CNB em 6°S (-0,72) e 10°S (-0,95), e com a CB em 18°S (-0,85) e 22°S (-0,90), entre 0 e 400 m. Quando a BiCSE encontrou-se em suas posições mais ao norte, o escoamento da SNB/CNB diminuiu ao passo que o escoamento da CB aumentou. Inversamente, quando a BiCSE localizou-se em latitudes mais austrais, a SNB/CNB teve sua intensidade aumentada enquanto a CB reduziu sua intensidade. Os resultados ainda mostraram que a variabilidade sazonal da BiCSE observada próxima da superfície é distinta da variabilidade observada em maiores profundidades. Entre 700 e 1000 m, a BiCSE foi encontrada mais ao sul (~25°S) durante os meses de primavera-verão e mais ao norte (~22,5°S) durante os meses de outono-inverno. Nesse nível, a posição média foi cerca de 23,5°S.

**Palavras-chave:** Corrente do Brasil; Corrente Norte do Brasil; HYCOM/NCODA.

## ABSTRACT

The work presented here intends to contribute to the understanding of large-scale circulation on the western margin of the South Atlantic Ocean, especially regarding to the seasonal variability of the Bifurcation of the South Equatorial Current (BiSEC) and its relationship with the Brazil Current (BC) and the North Brazil Undercurrent/North Brazil Current (NBUC/NBC). The analyses were performed using daily outputs of temperature, salinity, and zonal and meridional velocities of the HYbrid Coordinate Ocean Model/Navy Coupled Ocean Data Assimilation (HYCOM/NCODA) system from 2004 to 2011. The thermohaline fields produced by HYCOM/NCODA have shown agreement with monthly and annual climatologies of the World Ocean Atlas 2009 (WOA09) and relevant literature. Compared with surface velocity fields of the Ocean Surface Current Analyses Real-Time (OSCAR), HYCOM/NCODA has shown discrepancies about  $0.12 \pm 0.08$  m/s in the area of study. The largest discrepancies exceeded 0.7 m/s, however, they have occurred outside of the region of interest of this work. The annual mean position of the BiSEC ranged from 10°S on the surface to 25°S at 1000 m, moving, thereby, 15° between these two levels. This characterizes its depth dependence. Seasonally, the BiSEC on the surface has reached its northernmost position in the spring and its southernmost position in the fall. The BiSEC between 0 and 200 m was positioned further north (13°S) in December and further south (18.5°S) in May, with its mean at 16°S. This behavior of the BiSEC in the upper 200 m has shown strong negative correlation with the NBUC/NBC at 6°S (-0.72) and 10°S (-0.95), and the BC at 18°S (-0.85) and 22°S (-0.90), between 0 and 400 m. When the BiSEC was met on its northernmost positions, the flow of the NBUC/NBC has decreased while the flow of the BC has increased. Conversely, when the BiSEC was met on its austral latitudes, the NBUC/NBC has increased its intensity while the BC has reduced its intensity. The results also have shown that the seasonal variability of the BiSEC observed near surface is distinct from the variability observed at greater depths. Between 700 and 1000 m, the BiSEC was found further south (~25°S) during spring-summer months and further north (~22.5°S) during autumn-winter months. At this level, the average position was about 23.5°S.

**Keywords:** Brazil Current; North Brazil Current; HYCOM/NCODA.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Circulação geostrófica de larga escala nos primeiros 100 m de coluna de água do Atlântico Sul durante o outono. As regiões marcadas referem-se aos locais de formação da Água Tropical e da Água Modal do Atlântico Sul. Contracorrente Norte Equatorial (CCNE); Corrente da Guiné (CG); Corrente Sul Equatorial (CSE) e seus ramos norte (nCSE), equatorial (eCSE), central (cCSE) e sul (sCSE); Subcorrente Equatorial (SE); Corrente Norte do Brasil (CNB); Subcorrente Sul Equatorial (SSE); Contracorrente Sul Equatorial (CCSE); Giro da Angola; Corrente de Benguela; Corrente do Brasil; Corrente do Atlântico Sul; Corrente das Agulhas (CA); Corrente das Malvinas (CM); Corrente Circumpolar Antártica. Adaptado de Stramma e England (1999). 7
- Figura 2.** Estrutura do sistema de correntes equatoriais do Oceano Atlântico durante o mês de agosto. Contracorrente Norte Equatorial (CCNE); Corrente Sul Equatorial (CSE); Contracorrente Sul Equatorial (CCSE); Subcorrente Equatorial (SE); Subcorrente Norte Equatorial (SNE); Subcorrente Sul Equatorial (SSE). Adaptado de Tomczak e Godfrey (1994). 8
- Figura 3.** Diagrama TS espalhado de radiais oceanográficas em 19°S (círculos) e ao largo de Cabo Frio (cruzes). Valores de temperatura e salinidade expressos em °C e ups, respectivamente. Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água Intermediária Antártica (AIA); Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). Extraído de Silveira *et al.* (2000). 11
- Figura 4.** Média anual da velocidade geostrófica meridional calculada a partir de observações (a) e da velocidade total meridional a partir de modelo numérico (b). As velocidades (m/s) representam médias dentro de uma faixa de 2° de longitude ao largo da costa da América do Sul. Valores positivos (negativos) indicam fluxos para norte (sul) associados à SNB (CB). Corrente do Brasil (CB); Subcorrente Norte do Brasil (SNB). Adaptado de Rodrigues *et al.* (2007). 12
- Figura 5.** Esquema da variabilidade sazonal da BiCSE nos primeiros 400 m de coluna de água, de acordo com Rodrigues *et al.* (2007). A posição mais ao norte (13°S) ocorre em novembro (linha preta) e a posição mais ao sul (17°S) em julho (linha cinza). Corrente Sul Equatorial (CSE); Corrente do Brasil (CB); Subcorrente Norte do Brasil (SNB); Corrente Norte do Brasil (CNB). Extraído de Amorim (2011). 14
- Figura 6.** Síntese do escoamento do sistema de Correntes de Contorno Oeste ao longo da margem continental brasileira, de acordo com os padrões



esquemáticos de larga escala de Stramma e England (1999). Corrente Sul Equatorial (CSE); Corrente do Brasil (CB); Subcorrente Norte do Brasil (SNB); Corrente Norte do Brasil (CNB); Corrente de Contorno Intermediária (CCI); Corrente de Contorno Profunda (CCP); Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água Intermediária Antártica (AIA); Água Profunda do Atlântico Norte. Extraído de Soutelino (2008).	15
<b>Figura 7.</b> Batimetria do HYCOM na área de estudo.	17
<b>Figura 8.</b> Sistema de coordenadas verticais híbridas utilizado pelo HYCOM: verticais (z), isopicnais ( $\rho$ ) e normalizada pela batimetria ( $\sigma$ ). Extraído de Chassignet <i>et al.</i> (2006).	18
<b>Figura 9.</b> Representação da faixa selecionada ao largo da costa para identificação da posição da BiCSE.	21
<b>Figura 10.</b> Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) na superfície. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).	25
<b>Figura 11.</b> Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 100 m. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).	27
<b>Figura 12.</b> Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 400 m. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).	28
<b>Figura 13.</b> Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 800 m. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).	30
<b>Figura 14.</b> Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 1400 m. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).	31
<b>Figura 15.</b> Velocidade média anual (m/s) do HYCOM/NCODA na superfície (a), 100 (b), 200 (c), 400 (d), 800 (e) e 1400 m (f) de profundidade. Os pontos pretos representam a posição da BiCSE estimada visualmente.	32
<b>Figura 16.</b> Raiz do erro quadrático médio (m/s) das velocidades zonal (a) e meridional (b) do HYCOM/NCODA em relação ao OSCAR nos 30 m superficiais do oceano.	35

- Figura 17.** Média anual da velocidade meridional (m/s) na região ao largo da costa brasileira destacada na Figura 9. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). A linha branca representa velocidade nula e a linha preta tracejada indica a posição estimada da BiCSE. 37
- Figura 18.** Média sazonal da velocidade meridional (m/s) na região ao largo da costa brasileira destacada na Figura 9: verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d). Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). A linha branca representa velocidade nula e a linha preta tracejada indica a posição estimada da BiCSE. 38
- Figura 19.** Perfis verticais sazonais da posição estimada da BiCSE em função da latitude: verão (vermelho), outono (preto), inverno (azul), primavera (verde). 39
- Figura 20.** Média mensal da velocidade meridional (m/s) na região ao largo da costa brasileira destacada na Figura 9: janeiro (a), fevereiro (b), março (c), abril (d), maio (e), junho (f), julho (g), agosto (h), setembro (i), outubro (j), novembro (k) e dezembro (l). Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). A linha branca representa velocidade nula e a linha preta tracejada indica a posição estimada da BiCSE. 40
- Figura 21.** Perfis verticais mensais da posição estimada da BiCSE em função da latitude: janeiro (linha vermelha contínua), fevereiro (linha vermelha pontilhada), março (linha vermelha tracejada), abril (linha preta contínua), maio (linha preta pontilhada), junho (linha preta tracejada), julho (linha azul contínua), agosto (linha azul pontilhada), setembro (linha azul tracejada), outubro (linha verde contínua), novembro (linha verde pontilhada) e dezembro (linha verde tracejada). 41
- Figura 22.** Ciclo anual da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha) e entre 700 e 1000 m (linha azul), além de suas respectivas posições médias (linhas pretas tracejadas). 42
- Figura 23.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 6°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). 44
- Figura 24.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela SNB/CNB (linha azul) em 6°S (0 - 400 m / 35°W - 34°W), e da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para norte (valores positivos). 44

- Figura 25.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 10°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). 46
- Figura 26.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela SNB (linha azul) em 10°S (0 - 400 m / 36°W - 34,5°W), e da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para norte (valores positivos). 46
- Figura 27.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 18°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). 47
- Figura 28.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela CB (linha azul) em 18°S (0 - 400 m / 39°W - 36,5°W), e da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para sul (valores negativos). 47
- Figura 29.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 22°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). 49
- Figura 30.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela CB (linha azul) em 22°S (0 - 400 m / 40,5°W - 39,5°W), e da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para sul (valores negativos). 49

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Limites termohalinos, isopicnais e de profundidade das massas de água que compõem o oeste do Atlântico Sul. Os limites termohalinos são de acordo com Silveira <i>et al.</i> (2000), os limites isopicnais de acordo com Silveira (2007) e os limites de profundidade de acordo com Cirano <i>et al.</i> (2006) e Silveira (2007). Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água Intermediária Antártica (AIA); Água Profunda do Atlântico Norte (APAN).	10
<b>Tabela 2.</b> Estimativas da posição média da BiCSE segundo diversos autores.	13
<b>Tabela 3.</b> Níveis verticais do HYCOM/NCODA e suas respectivas profundidades.	19
<b>Tabela 4.</b> Média e desvio padrão para cada um dos mapas de raiz do erro quadrático médio (REQM) da temperatura (°C) e da salinidade (ups) do HYCOM/NCODA em relação ao WOA09 em 0, 100, 400, 800 e 1400 m.	24
<b>Tabela 5.</b> Média e desvio padrão para os mapas de raiz do erro quadrático médio (REQM) das componentes zonal e meridional da velocidade (m/s) do HYCOM/NCODA em relação ao OSCAR nos 30 m superficiais do oceano.	35
<b>Tabela 6.</b> Coeficiente de correlação ( $r$ ) entre o transporte dirigido pelas CCOs (0 - 400 m) e a posição da BiCSE (0 - 200 m). SNB/CNB: 6°S e 10°S; CB: 18°S e 22°S.	43

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACAS: Água Central do Atlântico Sul  
APAN: Água Profunda do Atlântico Norte  
ASM: Altura da Superfície do Mar  
AT: Água Tropical  
AIA: Água Intermediária Antártica  
BiCSE: Bifurcação da Corrente Sul Equatorial  
CA: Corrente das Agulhas  
CAS: Corrente do Atlântico Sul  
CB: Corrente do Brasil  
CCNE: Contracorrente Norte Equatorial  
CCSE: Contracorrente Sul Equatorial  
cCSE: Ramo Central da Corrente Sul Equatorial  
CCI: Corrente de Contorno Intermediária  
CCO: Corrente de Contorno Oeste  
CCP: Corrente de Contorno Profunda  
CG: Corrente da Guiné  
CM: Corrente das Malvinas  
CNB: Corrente Norte do Brasil  
CSE: Corrente Sul Equatorial  
DBDB2: Digital Bathymetric Data Base  
eCSE: Ramo Equatorial da Corrente Sul Equatorial  
ENOS: El Niño Oscilação Sul  
ESR: Earth & Space Research  
GSAS: Giro Subtropical do Atlântico Sul  
HYCOM: HYbrid Coordinate Ocean Model  
MAD: Método de Assimilação de Dados  
MATLAB: MATrix LABoratory  
MICOM: Miami Isopycnic-Coordinate Ocean Model  
NCODA: Navy Coupled Ocean Data Assimilation  
nCSE: Ramo Norte da Corrente Sul Equatorial  
NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration  
NODC: National Oceanographic Data Center  
NOGAPS: Navy Operational Global Atmospheric Prediction System  
NRL: Naval Research Laboratory  
OCL: Ocean Climate Laboratory

OSCAR: Ocean Surface Current Analyses Real-Time  
PCB: Plataforma Continental Brasileira  
REQM: Raiz do Erro Quadrático Médio  
sCSE: Ramo Sul da Corrente Sul Equatorial  
SE: Subcorrente Equatorial  
SNB: Subcorrente Norte do Brasil  
SNE: Subcorrente Norte Equatorial  
SSE: Subcorrente Sul Equatorial  
TSM: Temperatura da Superfície do Mar  
ups: Unidade Prática de Salinidade  
VSM: Vento na Superfície do Mar  
WOA05: World Ocean Atlas 2005  
WOA09: World Ocean Atlas 2009  
ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul  
ZCIT: Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	<b>x</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>xii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>5</b>
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>6</b>
3.1. Oceano Atlântico Sul	6
3.2. Estrutura Vertical de Massas de Água	9
3.3. Bifurcação da Corrente Sul Equatorial	12
3.4. Sistema de Correntes de Contorno Oeste	14
<b>4. METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
4.1. Sistema HYCOM/NCODA	17
4.2. World Ocean Atlas 2009	19
4.3. Ocean Surface Current Analysis Real-Time	20
4.4. Determinação da posição da Bifurcação da Corrente Sul Equatorial	21
4.5. Análise Estatística	22
4.5.1. Raiz do Erro Quadrático Médio	22
4.5.2. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson	23
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>24</b>
5.1. Estrutura Termohalina	24
5.2. Velocidade Horizontal	31
5.3. Bifurcação da Corrente Sul Equatorial	36
5.4. Seções de Velocidade e Transporte de Volume Meridional	43
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>51</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O oceano global é um componente fundamental do sistema climático (PBMC, 2013). Ele representa 70% das condições de contorno de temperatura da atmosfera sobre a superfície do planeta, absorve 97% da radiação solar incidente a partir de distâncias zenitais menores que 50°, fornece 85% do vapor de água contido na atmosfera, é responsável por cerca de 50% do transporte de calor global da região tropical para as regiões de mais altas latitudes e, em sua superfície, atua na regulação dos gases do efeito estufa na atmosfera, além de ser a maior fonte natural de aerossóis. O papel essencial do oceano global como regulador climático permite, portanto, que o planeta mantenha-se em condições habitáveis e favoráveis à vida como a conhecemos (Bigg *et al.*, 2003; IPCC, 2013).

Tendo em vista a dinâmica do sistema climático, as propriedades físicas do oceano global variam substancialmente em diversas escalas espaço-temporais (Bigg *et al.*, 2003; IPCC, 2013). Sazonalmente, observa-se a migração meridional da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) conforme varia o ângulo de incidência dos raios solares sobre a Terra. Na região tropical do Oceano Atlântico, por exemplo, é constatada uma variação sazonal da temperatura da superfície do mar (TSM) como reflexo, principalmente, da variabilidade da radiação solar incidente. Tais variações intra-anuais de TSM chegam a 8°C (Veleda *et al.*, 2011). Numa escala interanual com períodos de 2 a 4 anos, o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) vem recebendo bastante atenção da comunidade científica. Ele caracteriza-se por variações interanuais no comportamento dos Ventos Alísios e consequente anomalia de temperatura do oceano, principalmente em superfície, onde pode chegar a 4°C (Servain *et al.*, 2003). O ENOS impõe modificações substanciais na precipitação e em outras grandezas climáticas em diversas regiões do planeta (Hopelewski e Halpert, 1987), implicando na ocorrência anômala de secas e chuvas abundantes (PBMC, 2013). Outros fenômenos possuem variabilidade em diversas escalas temporais, como, por exemplo, o Dipolo do Atlântico que apresenta picos de variabilidade em escalas interanuais a decenais. O Dipolo constitui-se de oscilações meridionais dos gradientes de TSM através da ZCIT. Esse modo de variabilidade climática é único do Oceano Atlântico e não possui um análogo no Oceano Pacífico (Servain *et al.*, 2003). Outras variabilidades em escalas mais longas, como as decenais, estão sendo cada vez mais bem entendidas tendo em vista a necessidade de acessar os cenários de mudança climática (IPCC, 2007; IPCC, 2013).



O estudo e a observação da dinâmica dos oceanos são importantes para uma série de atividades humanas, incluindo a navegação, pesca, esporte, lazer, busca e resgate, gerenciamento de zonas costeiras, monitoramento da dispersão de poluentes, estudo de padrões de distribuição de organismos, indústria petrolífera, entre outras (Dohan *et al.*, 2009). Embora sistemas observacionais decorrentes de sensoriamento remoto sejam capazes de reproduzir bem a variabilidade espaço-temporal da superfície oceânica, permanece um lapso de informação do que ocorre em subsuperfície (Boebel *et al.*, 1999). Esse lapso de informação é preenchido, em parte, com dados provenientes de perfiladores verticais como, por exemplo, CTD, XBT e derivadores Argo, que dão uma boa noção da estratificação vertical do oceano. Entretanto, tais dados são esparsos e deixam a desejar no que diz respeito à caracterização da variabilidade espacial de mesoescala.

Dessa forma, a caracterização do estado e variabilidade do oceano não é possível ser feita apenas com observações, sendo necessário utilizar conhecimentos prévios, traduzidos em termos de estatísticas de observações pretéritas, entendimento da dinâmica e modelagem oceânica. Combinando essas informações em um sistema de assimilação de dados dentro de um modelo oceânico capaz de simular as feições de interesse, é possível fazer estimativas consistentes do estado físico do oceano. Nesse caso, o modelo numérico atua como um eficiente interpolador dinâmico das observações (Chassignet *et al.*, 2007).

Modelos oceânicos são extremamente importantes para o estudo da variabilidade espaço-temporal em diferentes partes do globo e para a realização de previsões numéricas no âmbito da oceanografia operacional. Com o reconhecimento do oceano global como um elemento-chave no entendimento e na previsão do clima, principalmente por estar intrinsecamente relacionado à variabilidade de longo termo, torna-se essencial que modelos oceânicos sejam incorporados a modelos climáticos e a modelos do sistema terrestre (Bigg *et al.*, 2003; Momin *et al.*, 2013).

Cirano *et al.* (2006) e Veleda *et al.* (2011), utilizando modelos numéricos global e regional, respectivamente, destacam a importância de sua aplicação no estudo da circulação oceânica, devido a duas razões principais: baixo custo operacional, graças a cada vez maior acessibilidade e eficiência dos equipamentos computacionais; e possibilidade de estudar áreas bastante extensas dos oceanos, de forma sinótica, o que é dificilmente conquistado em estudos observacionais. Além disso, tais autores sugerem a utilização de modelos globais com maior resolução em estudos sazonais.

Por outro lado, Chassignet *et al.* (2007) atribuem o grande avanço dos modelos numéricos nas últimas décadas ao aumento das resoluções espacial e temporal, incorporando feições costeiras e batimetrias mais realísticas, migrando de simulações a partir de campos de forçantes idealizadas para simulações forçadas por dados observacionais em escala temporal relativamente pequena.

O desenvolvimento de sistemas globais e regionais de assimilação de dados oceanográficos tornou-se mais intenso nos anos 90, impulsionado por avanços nos modelos numéricos oceânicos, esquemas de assimilação acurados e demonstrados em aplicações realísticas, crescente evolução dos computadores, e desenvolvimento das redes de observação oceânica (Dombrowsky *et al.*, 2009). Cummings *et al.* (2009) definem os Métodos de Assimilação de Dados (MADs) como processos matemáticos rigorosos de combinação de dados observados com resultados de modelos numéricos, de onde se extrai as informações mais importantes das observações, que são esparsas no espaço e no tempo e, portanto, incompletas. Assim, os MADs produzem novos campos, as análises objetivas, nas quais o estado do modelo é corrigido na direção das observações. Os mesmos autores também consideram a importância dos MADs devido à deficiência que os modelos numéricos têm em relação a seus modelos físicos, resolução espacial, condições de contorno laterais e forçantes atmosféricas. Assim, os MADs evitam a tendência dos modelos em afastar-se da realidade.

Bourlès *et al.* (2008) pontuam que a variabilidade do sistema oceano-atmosfera no Atlântico Tropical, desde escalas de tempo intra-sazonais a escalas multi-decenais, influencia fortemente o regime de chuvas e, portanto, o clima das margens continentais adjacentes, exercendo impactos econômicos e sociais significativos, como chuvas e secas na Região Nordeste do Brasil. Dessa maneira, a descrição de seus componentes torna-se essencial à prevenção e mitigação de impactos, assim como nas tomadas de decisões políticas, econômicas e sociais.

Além disso, em decorrência do sistema Corrente Sul Equatorial/Subcorrente Norte do Brasil (CSE/SNB) ser um importante mecanismo de transporte inter-hemisférico de massa e calor (da Silva *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2009), o entendimento da variabilidade da Bifurcação da Corrente Sul Equatorial (BiCSE) no clima presente é fundamental no sentido de prover base para comparação num contexto de mudanças climáticas. Dessa forma, considerando a relativa falta de conhecimento sobre a variabilidade da dinâmica oceânica na margem oeste do Oceano Atlântico Equatorial, mais

especificamente no que diz respeito ao comportamento sazonal da BiCSE (Rodrigues *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2009, Veleda *et al.*, 2011), este estudo espera contribuir com mais informações sobre a dinâmica na região, envolvendo, principalmente, a relação da BiCSE com o transporte da Corrente do Brasil (CB) e da SNB/Corrente Norte do Brasil (SNB/CNB).

Feita esta introdução inicial, seguir-se-ão outros 5 tópicos gerais. No próximo, serão apresentados os objetivos do presente estudo. Em seguida, no Tópico 3, encontra-se uma revisão dos estudos pretéritos mais importantes que caracterizam as feições oceanográficas de larga escala da área de estudo. No Tópico 4, está detalhada a metodologia de trabalho adotada, juntamente com a descrição das bases de dados utilizadas. Os resultados obtidos e sua discussão estão apresentados no Tópico 5. E, por fim, no Tópico 6, há um sumário dos resultados mais relevantes e as conclusões.

## 2. OBJETIVOS

O presente trabalho apresenta como objetivo geral o estudo da variabilidade sazonal da posição e da estrutura vertical da BiCSE e de sua relação com a CB e com o sistema SNB/CNB, a partir de resultados de análises globais produzidas pelo sistema *HYbrid Coordinate Ocean Model/Navy Coupled Ocean Data Assimilation* (HYCOM/NCODA). Para a conquista dessa meta principal, foi necessário, primeiramente, validar as análises do HYCOM/NCODA para que, em seguida, fosse feita a investigação mencionada como objetivo central. Isso levou, portanto, às seguintes etapas, que podem ser vistas, também, como objetivos específicos:

- Comparar campos termohalinos do HYCOM/NCODA com análises climatológicas mensais e anuais do *World Ocean Atlas 2009* (WOA09);
- Comparar campos de velocidade superficial do HYCOM/NCODA com médias mensais do *Ocean Surface Current Analyses Real-Time* (OSCAR);
- Confeccionar mapas de velocidade horizontal do HYCOM/NCODA em diversos níveis de profundidade;
- Investigar a variabilidade sazonal da posição meridional da BiCSE em seus diversos níveis de profundidade;
- Investigar a variação sazonal da CB e do sistema SNB/CNB associada à variabilidade da BiCSE, considerando seus padrões espaciais e fluxos de massa.

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

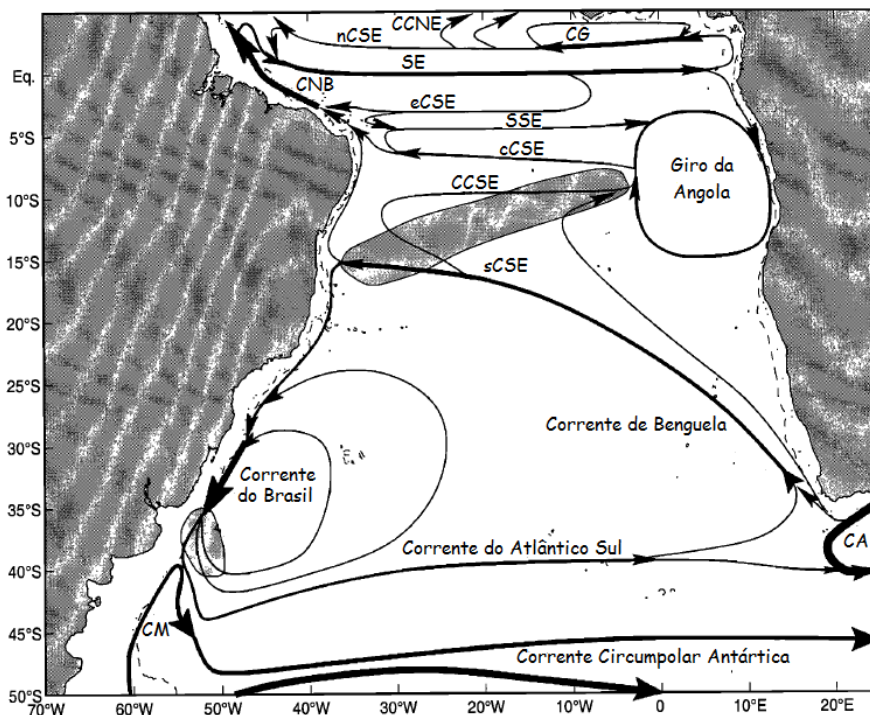
#### 3.1. Oceano Atlântico Sul

O Oceano Atlântico Sul possui ampla conexão com o Oceano Atlântico Norte e com o Oceano Índico, além de receber um grande fluxo do Oceano Pacífico através da estreita Passagem de Drake (Stramma e England, 1999). Em sua região tropical, o padrão de correntes ocorre, principalmente, em resposta à variabilidade sazonal do campo de vento e da migração da ZCIT. A ZCIT caracteriza-se como uma faixa de nuvens densas e índices pluviométricos altos, onde convergem os Ventos Alísios de Nordeste e de Sudeste (Veleda *et al.*, 2011). Ela localiza-se mais ao norte em julho e mais ao sul em janeiro (Stramma e Schott, 1999). O Atlântico Sul é considerado fundamental do ponto de vista das mudanças climáticas, uma vez que contém importantes ramos da circulação termohalina, exporta calor para o Atlântico Norte e possui uma variedade de zonas-chave cujos sinais oceânicos variam em diversas escalas temporais, desde intrasazonais até decenais (Silva *et al.*, 2009).

Classicamente, a circulação geral do Atlântico Sul é, em grande parte, governada pelo Giro Subtropical do Atlântico Sul (GSAS) (Figura 1), uma feição anticiclônica de larga escala centrada em latitudes subtropicais e dirigida pelo vento (Stramma e Schott, 1999). A CSE compõe o domínio norte do giro e é alimentada pelas águas de origem subtropical levadas pela Corrente de Benguela (Stramma, 1991; Rodrigues *et al.*, 2007). A CB corresponde à Corrente de Contorno Oeste (CCO) associada ao giro, estende-se desde a CSE até a Confluência Brasil-Malvinas, na região da Convergência Subtropical (33°S - 38°S), onde se mistura à Corrente das Malvinas (CM) e separa-se da costa num fluxo para leste (Stramma e England, 1999; Silveira *et al.*, 2000; Cirano *et al.*, 2006). Esse fluxo passa a ser denominado Corrente do Atlântico Sul (CAS) e delimita a porção sul do giro. Parte dele recircula no GSAS e uma maior parte segue seu caminho para leste. Nas proximidades da África do Sul, uma parcela da CAS segue em direção ao Oceano Índico, enquanto a outra flui na direção norte, alimentando, juntamente com a Corrente das Agulhas (CA), a Corrente de Benguela que completa o giro. O domínio norte do GSAS apresenta uma migração vertical em direção ao sul com o aumento da profundidade, enquanto o domínio sul não mostra tal dependência (Stramma e England, 1999).

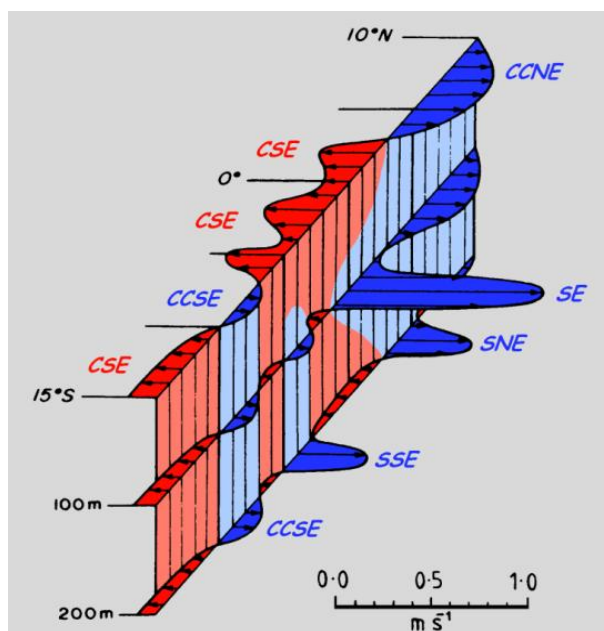
O Oceano Atlântico possui um complexo padrão de correntes zonais que fluem próximas à Linha do Equador, conforme exemplifica a Figura 2 (Silveira *et al.*, 1994; Tomczak e Godfrey, 1994; Stramma e Schott, 1999; Silva *et al.*, 2009). A Subcorrente

Equatorial (SE) é a mais intensa e atinge 1,2 m/s em seu núcleo, a 100 m de profundidade, transportando mais de 15 Sv (Sverdrup; 1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s) dentro de um fluxo de oeste para leste. A Corrente Norte Equatorial representa um fluxo amplo e uniforme para oeste, posicionando-se ao norte de 10°N, com sua velocidade variando entre 0,1 e 0,3 m/s. De caráter altamente sazonal, a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) quase desaparece em fevereiro, quando os Ventos Alísios são mais intensos no Hemisfério Norte. Estendendo-se de 3°N a 25°S, a CSE caracteriza-se como um fluxo amplo e uniforme para oeste, com velocidades entre 0,1 e 0,3 m/s (Stramma *et al.*, 2003). Intercalando-se com a CSE, um escoamento fraco, estreito e variável, de no máximo de 0,1 m/s, caracteriza a Contracorrente Sul Equatorial (CCSE). Tanto a Subcorrente Norte Equatorial (SNE) como a Subcorrente Sul Equatorial (SSE) caracterizam-se por fluxos estreitos e rápidos para leste, de até 0,4 m/s à profundidade de 200 m.



**Figura 1.** Circulação geostrofica de larga escala nos primeiros 100 m de coluna de água do Atlântico Sul durante o outono. As regiões marcadas referem-se aos locais de formação da Água Tropical e da Água Modal do Atlântico Sul. Contracorrente Norte Equatorial (CCNE); Corrente da Guiné (CG); Corrente Sul Equatorial (CSE) e seus ramos norte (nCSE), equatorial (eCSE), central (cCSE) e sul (sCSE); Subcorrente Equatorial (SE); Corrente Norte do Brasil (CNB); Subcorrente Sul Equatorial (SSE); Contracorrente Sul Equatorial (CCSE); Giro da Angola; Corrente de Benguela; Corrente do Brasil; Corrente do Atlântico Sul; Corrente das Agulhas (CA); Corrente das Malvinas (CM); Corrente Circumpolar Antártica. Adaptado de Stramma e England (1999).

De acordo com Stramma e Schott (1999), a CSE subdivide-se em quatro ramos separados por regiões estreitas de sistemas de contracorrentes menos óbvias: o ramo norte (nCSE), o ramo equatorial (eCSE), o ramo central (cCSE), e o ramo sul (sCSE). Como se observa na Figura 1, todos os ramos da CSE seguem na direção norte ao se aproximarem do continente americano, exceto o ramo sul, que se distribui entre 10°S e 25°S (Stramma, 1991) e atinge a Plataforma Continental Brasileira (PCB) entre 10°S e 14°S (Rodrigues *et al.*, 2007), onde se bifurca, formando a CB, cujo fluxo é para sul, e a SNB/CNB, cujo fluxo é para norte (Stramma, 1991; Silveira *et al.*, 1994; Cirano *et al.*, 2006; Rodrigues *et al.*, 2007). Dessa forma, a posição da BiCSE pode ser um indicador da quantidade de água subtropical exportada para os Trópicos e para o Atlântico Norte através do sistema SNB/CNB, bem como da porção de massas de água que recirculará no GSAS por meio da CB. Sendo assim, a partir de então, toda discussão sobre a BiCSE referir-se-á à sCSE.



**Figura 2.** Estrutura do sistema de correntes equatoriais do Oceano Atlântico durante o mês de agosto. Contracorrente Norte Equatorial (CCNE); Corrente Sul Equatorial (CSE); Contracorrente Sul Equatorial (CCSE); Subcorrente Equatorial (SE); Subcorrente Norte Equatorial (SNE); Subcorrente Sul Equatorial (SSE). Adaptado de Tomczak e Godfrey (1994).

As CCOs, em geral, caracterizam-se por fluxos intensos, estreitos e bem definidos ao largo das margens continentais leste. Apesar disso, a CB é descrita na literatura como um fluxo fraco e raso, acima de 200 m. Ela flui na direção sul bordejando a costa brasileira, e aumenta em intensidade à medida que se afasta do Equador (Silveira *et*

*al.*, 2000; Cirano *et al.*, 2006). Suas maiores velocidades são atingidas na borda da plataforma continental (Emílsson, 1961).

Com um núcleo centrado entre 100 e 200 m (Silveira *et al.*, 1994), a SNB/CNB representa uma das CCOs mais intensas do mundo e alimenta as contracorrentes equatoriais através de seu complexo sistema de retroflexão (Stramma e Schott, 1999; Silva *et al.*, 2009). Enquanto flui ao largo da costa Nordeste/Norte do Brasil, a SNB/CNB encontra a pluma do Rio Amazonas e exerce forte controle sobre seu espalhamento (Ruggiero, 2008).

Nos últimos anos, a borda oeste do Oceano Atlântico Tropical vem sendo considerada pela comunidade científica como uma zona fundamental para o entendimento da circulação oceânica global (da Silva *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2009). Sua mais notável característica é o intenso transporte de volume e calor dirigido pela SNB/CNB, que cruza a Linha do Equador ao longo da costa da América do Sul, contrabalanceando, pelo menos em parte, o volume requerido (15 a 20 Sv) pela fria Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) que flui rumo ao Oceano Atlântico Sul (Tomczak e Godfrey, 1994; Stramma e England, 1999, Stramma e Schott, 1999; Schott *et al.*, 2005). Assim, essa região representa uma importante zona de trocas inter-hemisféricas de massa, sal e calor (Müller *et al.*, 1998; Dengler *et al.*, 2004; da Silva *et al.*, 2009; Silva *et al.*, 2009; Veleza *et al.*, 2011), e é uma peça essencial para a circulação de retorno da Célula de Revolvimento Meridional, o que tem implicações na variabilidade climática do planeta (Talley, 2003; Ganachaud, 2003; Lumpkin & Speer, 2003; Schott *et al.*, 2005; Rodrigues *et al.*, 2007). Por outro lado, pouco transporte inter-hemisférico é verificado na borda leste do Oceano Atlântico Equatorial, onde terminam as correntes equatoriais que fluem para leste (Tomczak e Godfrey, 1994). Além disso, os mecanismos de transporte das águas quentes subtropicais através da Linha do Equador são menos conhecidos do que o fluxo de águas frias da APAN em direção ao sul (Silva *et al.*, 2009).

### **3.2. Estrutura Vertical de Massas de Água**

A estrutura vertical do Atlântico Sul em seus primeiros 3000 m é constituída pela sobreposição de massas de água características, definidas de acordo com sua temperatura e salinidade, comumente representadas em um diagrama TS (Figura 3). Na superfície, verifica-se a presença da Água Tropical (AT), sucedida pela Água Central do Atlântico Sul (ACAS), pela Água Intermediária Antártica (AIA) e pela APAN (Stramma e Schott, 1999; Silveira *et al.*, 2000). Ao se deslocarem, essas massas de



água têm suas propriedades alteradas lentamente devido à mistura lateral e vertical umas com as outras. Os limites verticais entre elas não é um consenso na comunidade científica e varia conforme cada autor (Silveira, 2007). Na Tabela 1, estão explicitados os limites verticais propostos por Cirano *et al.* (2006) e Silveira (2007), ressaltando-se que o primeiro trabalho refere-se à região oeste do Atlântico Sul como um todo, enquanto o segundo diz respeito à Bacia de Campos, entre 22°S e 24,5°S. Apesar de não coincidirem de maneira precisa, essas investigações fornecem uma boa noção da disposição vertical das massas de água na região de estudo do presente trabalho. A tabela ainda trás as superfícies isopicnais que separam as massas de água em questão, de acordo com o que propõe Silveira (2007).

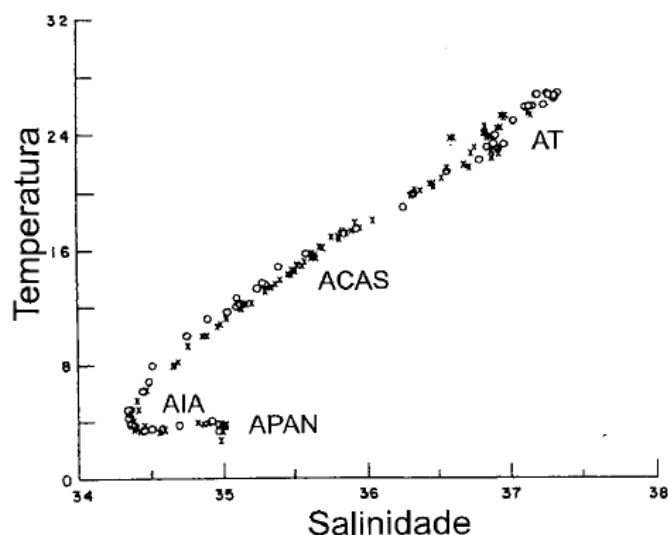
**Tabela 1.** Limites termohalinos, isopicnais e de profundidade das massas de água que compõem o oeste do Atlântico Sul. Os limites termohalinos são de acordo com Silveira *et al.* (2000), os limites isopicnais de acordo com Silveira (2007) e os limites de profundidade de acordo com Cirano *et al.* (2006) e Silveira (2007). Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água Intermediária Antártica (AIA); Água Profunda do Atlântico Norte (APAN).

Massa de Água	Temperatura (°C)	Salinidade (ups)	Nível Isopicnal (kg/m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)	
				Cirano <i>et al.</i> (2006)	Silveira (2007)
AT	> 20	> 36,0	< 25,70	0 - 116	0 - 142
ACAS	6 - 20	34,6 - 36,0	25,70 - 26,90	116 - 657	142 - 567
AIA	3 - 6	34,2 - 34,6	26,90 - 27,53	657 - 1234	567 - 1300
APAN	3 - 4	34,6 - 35,0	27,53 - 27,88	1234 - 3472	1300 - 3260

Em virtude dos elevados níveis de radiação incidente sobre a superfície do Atlântico Tropical e conseqüente déficit de precipitação em relação à evaporação, forma-se nessa região a AT, caracterizada por ser quente e salina, cujos valores de temperatura e salinidade superam 20°C e 36 ups (Tabela 1), respectivamente. Em sua trajetória rumo ao sul, através da CB, essa massa de água perde calor para a atmosfera e mistura-se com águas de menores temperaturas e salinidades, até atingir a Convergência Subtropical (Emílsson, 1961).

Formada na região da Convergência Subtropical, a ACAS flui no nível da picnoclina, possui temperaturas entre 6 e 20°C e salinidades entre 34,6 e 36 ups (Stramma e England, 1999), e é caracterizada por uma relação linear entre a temperatura e a salinidade (Stramma e Schott, 1999), conforme se observa na Figura 3. Após sua formação e afundamento até o nível picnoclínico adequado ao seu ajuste hidrostático, essa massa de água passa a compor o GSAS, fluindo através da CAS e

da Corrente de Benguela, até alcançar a zona da BiCSE onde se divide em dois fluxos: um para norte, através da SNB, e o outro para sul, através da CB (Silveira *et al.*, 2000).



**Figura 3.** Diagrama TS espalhado de radiais oceanográficas em 19°S (círculos) e ao largo de Cabo Frio (cruzes). Valores de temperatura e salinidade expressos em °C e ups, respectivamente. Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água Intermediária Antártica (AIA); Água Profunda do Atlântico Norte (APAN). Extraído de Silveira *et al.* (2000).

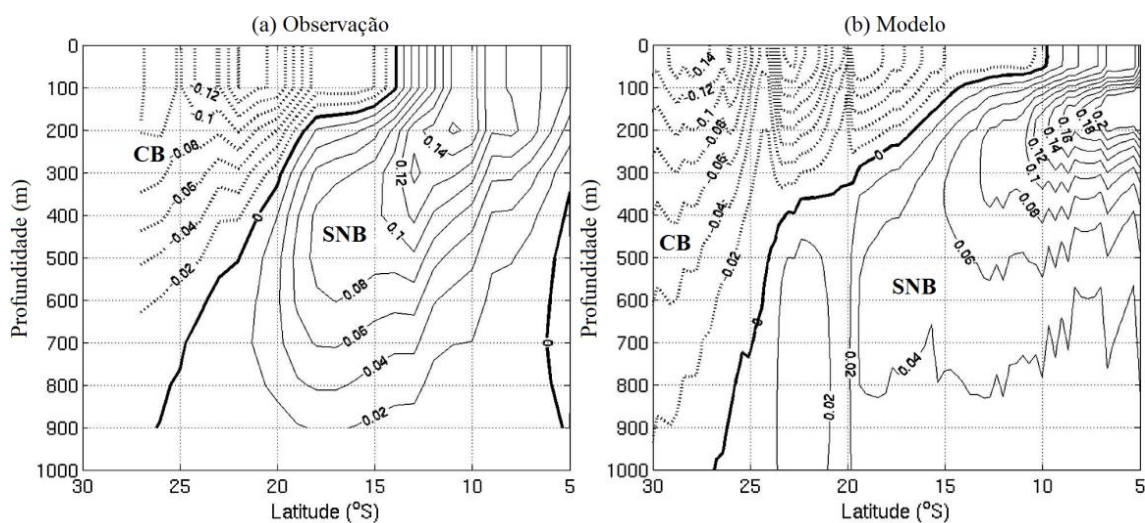
Abaixo da ACAS, encontra-se a AIA, em nível subpicnoclínico. Ela espalha-se em níveis intermediários após sua formação na superfície, na região da Convergência Subantártica, ao norte da Passagem de Drake (Stramma e Schott, 1999; Stramma e England, 1999). Seus valores de temperatura e salinidade são menores do que a ACAS e encontram-se, respectivamente, entre 3 e 6°C, e entre 34,2 e 34,6 ups (Tabela 1). No diagrama TS da Figura 3, ela pode ser reconhecida pelo mínimo de salinidade (Stramma e England, 1999; Silveira *et al.*, 2000). Através de registros de correntômetros, Müller *et al.* (1998) apresentam a AIA como uma CCO bem definida fluindo, ao norte de 24°S, em direção ao Equador e, ao sul de 28°S, em direção ao polo.

A APAN compõe parte da circulação termohalina (Cirano *et al.*, 2006) e apresenta-se como um fluxo organizado para sul ao longo do contorno oeste, estendendo-se até a latitude de 32°S, onde pelo menos parte desse volume retorna em direção à Linha do Equador. Ela se forma nos mares do Labrador e da Noruega (Malanotte-Rizzoli *et*

*al.*, 2000; Dengler *et al.*, 2004), e define-se por temperaturas de 3 a 4°C e por salinidades de 34,6 a 35 ups, de acordo com a Tabela 1 (Silveira *et al.*, 2000).

### 3.3. Bifurcação da Corrente Sul Equatorial

Apesar da posição da BiCSE poder ser inferida a partir da Teoria de Sverdrup, através da isolinha na qual o rotacional da tensão de cisalhamento do vento é nulo e são delimitados os giros de grande escala forçados pelo vento (Soutelino, 2008), essa é uma maneira grosseira de identificá-la (Rodrigues *et al.*, 2007).



**Figura 4.** Média anual da velocidade geostrófica meridional calculada a partir de observações (a) e da velocidade total meridional a partir de modelo numérico (b). As velocidades (m/s) representam médias dentro de uma faixa de 2° de longitude ao largo da costa da América do Sul. Valores positivos (negativos) indicam fluxos para norte (sul) associados à SNB (CB). Corrente do Brasil (CB); Subcorrente Norte do Brasil (SNB). Adaptado de Rodrigues *et al.* (2007).

Uma descrição mais precisa e detalhada da BiCSE, tanto de sua posição média anual quanto de sua variabilidade sazonal, foi realizada pela primeira vez por Rodrigues *et al.* (2007), utilizando dados observados e um modelo numérico com resolução espacial horizontal de 1/3°. Nesse estudo, a posição média anual da BiCSE (Figura 4) foi identificada entre 10°S e 14°S próximo a superfície, migrando para sul com o aumento da profundidade, até atingir 27°S a 1000 m. O deslocamento da BiCSE em direção ao sul com o aumento da profundidade gera uma modificação na feição do GSAS, com seu achatamento em profundidades maiores (Cirano *et al.*, 2006). O trabalho de Rodrigues *et al.* (2007) ainda mostrou uma variação sazonal da latitude da BiCSE de 7° nos primeiros 100 m de coluna de água, cerca de 3° entre 100 m e 400 m, menos de 1° entre 400 m e 600 m, e de 2° abaixo de 600 m.

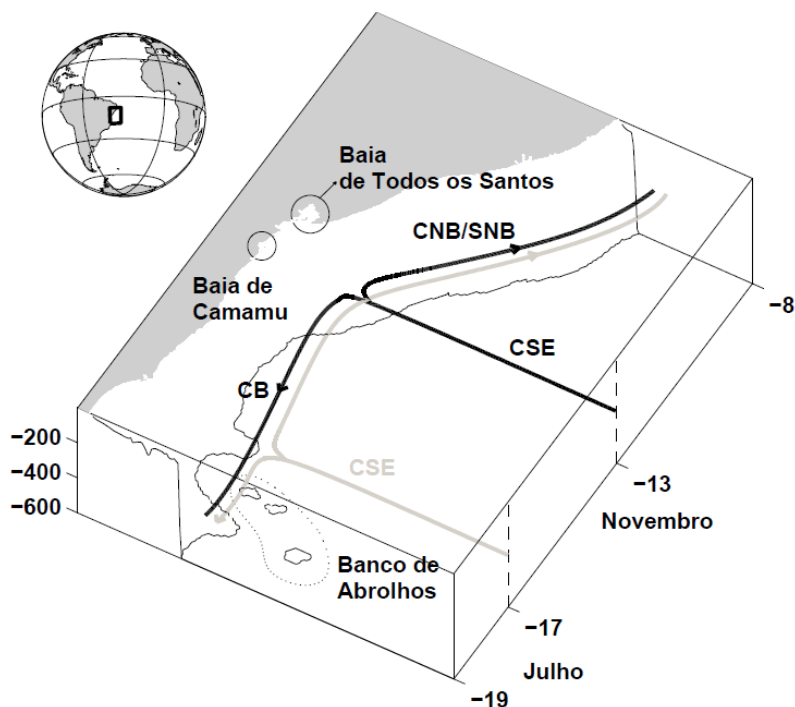
Outros estudos observacionais anteriores caracterizaram uma bifurcação ocorrendo entre 14°S e 16°S na superfície (0 - 100 m), entre 20°S e 24°S na termoclina (400 - 500 m), e entre 26°S e 28°S na camada intermediária (600 - 1200 m) (Stramma e England, 1999; Boebel *et al.*, 1999; Wienders *et al.*, 2000). Já os estudos realizados a partir de modelagem numérica de Malanotte-Rizzoli *et al.* (2000) e Harper (2000) determinaram a posição da BiCSE em 17°S e 18°S na superfície, respectivamente. Cirano *et al.* (2006), através de um modelo global, localizaram a bifurcação entre 9°S e 15°S ao nível da AT, 22°S ao nível da ACAS e entre 25°S e 30°S ao nível da AIA. Mais recentemente, os estudos regionais de Silva *et al.* (2009) e Velede *et al.* (2011), também realizados a partir de modelagem numérica, identificaram a zona da bifurcação aproximadamente em 12°S na superfície e 20°S em 500 m de profundidade. A Tabela 2 traz uma compilação dos principais trabalhos que se dedicaram a descrever a latitude na qual ocorre a BiCSE.

**Tabela 2.** Estimativas da posição média da BiCSE segundo diversos autores.

Autor	Latitude		
	0 - 100 m	100 - 500 m	500-1200m
Stramma (1991)	10°S	-	-
Müller <i>et al.</i> (1998)	-	24°S - 28°S	-
Boebel <i>et al.</i> (1999)	-	-	28°S
Stramma e England (1999)	16°S	20°S	26°S
Stramma e Schott (1999)	10°S - 20°S	20°S	sul de 25°S
Harper (2000)	18°S	-	-
Malanotte-Rizzoli <i>et al.</i> (2000)	17°S	-	-
Silveira <i>et al.</i> (2000)	sul de 10°S	22°S	23°S
Wienders <i>et al.</i> (2000)	14°S	24°S	26°S - 28°S
Cirano <i>et al.</i> (2006)	9°S - 15°S	22°S	25°S - 30°S
Rodrigues <i>et al.</i> (2007)	10°S - 14°S	18°S - 23°S	23°S - 27°S
Soutelino (2008)	15°S	20°S	25°S
Silva <i>et al.</i> (2009)	8°S - 13°S	20°S - 24°S	-
Velede <i>et al.</i> (2011)	12°S	12°S - 20°S	-

Contudo, Rodrigues *et al.* (2007), Silva *et al.* (2009) e Velede *et al.* (2011) ressaltam que a latitude onde a BiCSE ocorre e sua variabilidade não são bem conhecidas. De acordo com esses autores, a bifurcação atinge sua posição mais austral no período compreendido entre maio e julho, quando o sistema SNB/CNB intensifica-se e a CB fica mais fraca. Entre outubro e dezembro, a bifurcação atinge sua posição mais ao norte, o sistema SNB/CNB enfraquece-se e a CB flui com mais

intensidade. Na Figura 5, está representado um esquema da variabilidade sazonal da BiCSE.



**Figura 5.** Esquema da variabilidade sazonal da BiCSE nos primeiros 400 m de coluna de água, de acordo com Rodrigues *et al.* (2007). A posição mais ao norte (13°S) ocorre em novembro (linha preta) e a posição mais ao sul (17°S) em julho (linha cinza). Corrente Sul Equatorial (CSE); Corrente do Brasil (CB); Subcorrente Norte do Brasil (SNB); Corrente Norte do Brasil (CNB). Extraído de Amorim (2011).

A variabilidade da BiCSE acaba influenciando regiões remotas ao longo da CB e da SNB/CNB, como, por exemplo, os vórtices liberados pela SNB/CNB (Johns *et al.*, 2003 *apud* Rodrigues *et al.*, 2007), os meandros formados pela CB próxima a Cabo Frio (RJ) (Veleda *et al.*, 2011) e a Confluência Brasil-Malvinas (Vivier e Provost, 1999 *apud* Rodrigues *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2009). Além disso, parece exercer papel no clima do Nordeste do Brasil, afetando seu regime de precipitações através da interação entre a TSM, do conteúdo de calor na camada de mistura do oceano, da convecção atmosférica e dos Ventos de Leste. A variabilidade da BiCSE pode, por exemplo, influenciar a posição da ZCIT, da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e dos Ventos Alísios (Silva *et al.*, 2009; Veleda *et al.*, 2011).

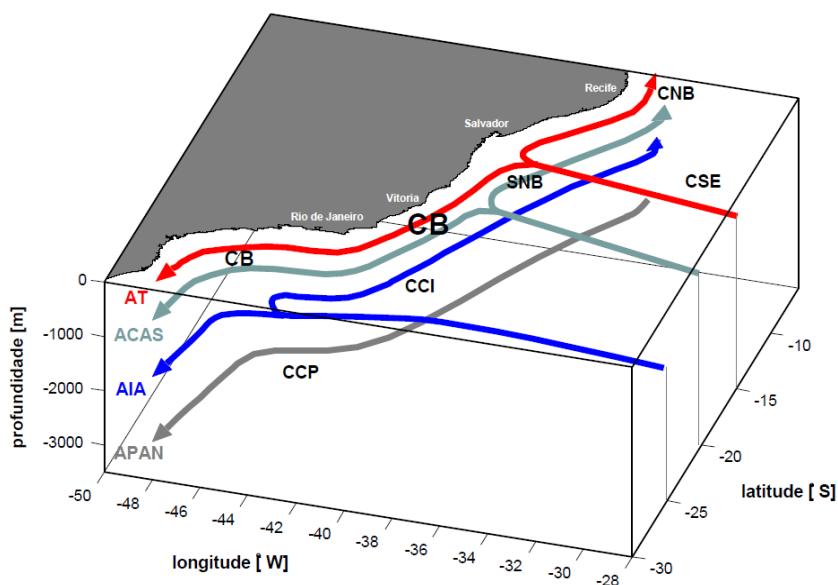
### 3.4. Sistema de Correntes de Contorno Oeste

Para melhor compreensão do padrão de escoamento das CCOs no Atlântico Sul, e seguindo o trabalho sugerido por Stramma e England (1999), Soutelino (2008), em sua

tese, propôs uma divisão do oceano na margem continental brasileira em 4 camadas (Figura 6). A camada superficial corresponde aos primeiros 150 m de coluna de água e refere-se à AT. Entre 150 e 500 m, encontra-se a ACAS, referente à pycnoclina. A AIA compõe a camada intermediária, de 500 a 1000 m. E, finalmente, em nível profundo, estendendo-se até cerca de 3000 m, localiza-se a APAN.

Segundo o padrão de escoamento representado na Figura 6, a CB tem origem na superfície, em 15°S, onde a sCSE bifurca-se. Ao nível da pycnoclina, a posição da bifurcação ocorre mais ao sul, em 20°S, onde a ACAS soma-se à AT para compor a CB e aumentar sua espessura vertical. A partir de 25°S, a CB recebe um novo aporte na direção sul, desta vez, da AIA, em nível intermediário, e passa a ocupar a totalidade dessa região do oceano superior.

Seguindo o caminho inverso, passa-se a descrever o escoamento na direção norte. Em 25°S, origina-se a Corrente de Contorno Intermediária (CCI) a partir da BiCSE no nível da AIA. Em nível pycnoclínico, referente à ACAS, o fluxo para norte caracteriza a SNB a partir de 20°S. Na camada superficial, a porção da AT que segue na direção norte forma a CNB em 15°S e soma-se a SNB.



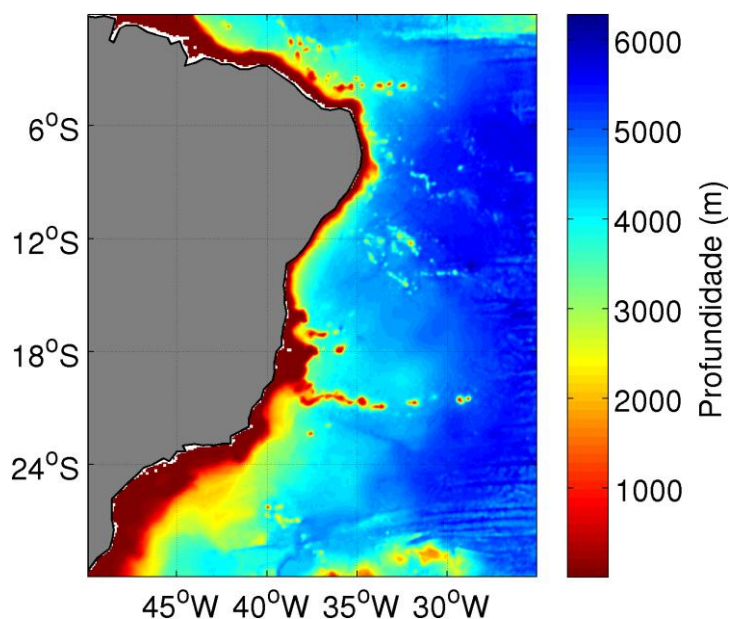
**Figura 6.** Síntese do escoamento do sistema de Correntes de Contorno Oeste ao longo da margem continental brasileira, de acordo com os padrões esquemáticos de larga escala de Stramma e England (1999). Corrente Sul Equatorial (CSE); Corrente do Brasil (CB); Subcorrente Norte do Brasil (SNB); Corrente Norte do Brasil (CNB); Corrente de Contorno Intermediária (CCI); Corrente de Contorno Profunda (CCP); Água Tropical (AT); Água Central do Atlântico Sul (ACAS); Água Intermediária Antártica (AIA); Água Profunda do Atlântico Norte. Extraído de Soutelino (2008).

Ocupando o sopé continental e parte da planície abissal, na camada profunda, encontra-se a APAN. Essa massa de água flui para sul e forma um escoamento único e definido ao longo de todo contorno oeste, denominado Corrente de Contorno Profunda (CCP). Ao sul de 25°S, onde a BiCSE apresenta-se em nível intermediário, constata-se que toda a coluna de água, desde a superfície até 3000 m, flui, como um todo, para sul, através da CB e da CCP (Figura 6).

Apesar da representação esquemática proposta por Soutelino (2008) proporcionar um bom entendimento do sistema de CCOs ao largo da costa brasileira, ela não é definitiva. Conforme foi explicado no Tópico 3.3, a região de ocorrência da BiCSE não é um consenso na literatura e, portanto, a origem das CCOs pode variar de acordo com cada autor.

## 4. METODOLOGIA

O escopo principal do trabalho consistiu em estudar a variabilidade sazonal da BiCSE e correlacionar as feições oceanográficas de larga escala do oeste do Atlântico Tropical (BiCSE, CB e SNB/CNB). As análises globais geradas pelo HYCOM/NCODA foram empregadas porque esse conjunto de dados reúne, em uma série temporal diária de 2003 até o presente, informações consistentes de estimativas do estado termohalino e da circulação global, com resolução espacial capaz de capturar processos de meso-escala (Cummings *et al.* 2009). As análises envolvem a região do Oceano Atlântico compreendida entre a Linha do Equador e 30°S e entre 25°W e 50°W (Figura 7), de tal forma que o domínio pudesse representar a BiCSE, a CB e a SNB/CNB. A partir dos dados diários, uma série temporal mensal para temperatura, salinidade e velocidades zonal e meridional, de janeiro de 2004 a dezembro de 2011, foi produzida, totalizando 96 meses para cada uma das variáveis. O processamento dos dados foi realizado em ambiente MATLAB (MATrix LABoratory).



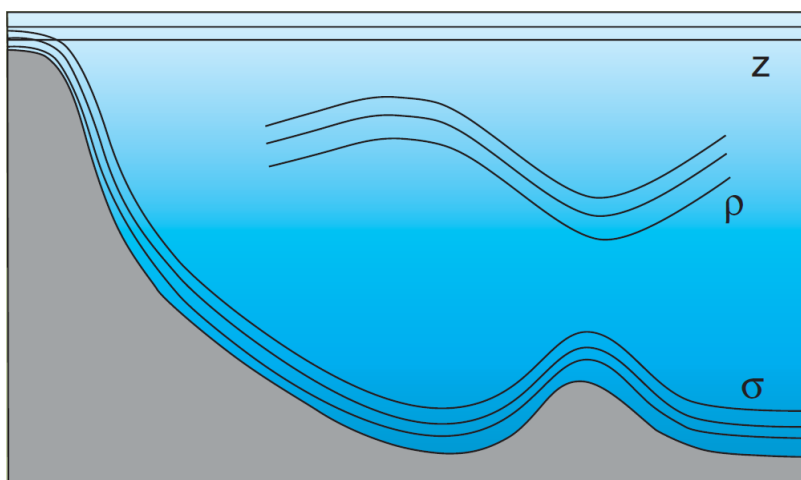
**Figura 7.** Batimetria do HYCOM na área de estudo.

### 4.1. Sistema HYCOM/NCODA

O modelo oceânico global HYCOM, desenvolvido a partir do modelo *Miami Isopycnic-Coordinate Ocean Model* (MICOM), é acoplado a um modelo simplificado de gelo marinho, e utiliza um conjunto de equações primitivas de circulação geral do oceano (balanços de momentum, massa e energia), resolvidas em um sistema de coordenadas verticais híbridas generalizadas (Bleck, 2002), conforme a Figura 8.



Coordenadas isopícnais ( $\rho$ ) são adequadas à modelagem do oceano profundo estratificado. Coordenadas definidas por profundidades (ou pressões) fixas ( $z$ ) resolvem bem a camada de mistura superficial. Já as regiões costeiras rasas são mais bem representadas com coordenadas que acompanham o relevo oceânico ( $\sigma$ - $z$ ), pois permitem a manutenção da resolução vertical do modelo. No HYCOM, esses três sistemas de coordenadas são implementados concomitantemente, através de um gerador de coordenadas híbridas que atua a cada passo de tempo reposicionando os sistemas de coordenadas de forma ótima, de modo que a transição entre cada um deles ocorre suavemente (Chassignet *et al.*, 2006). Assim, o modelo toma partido da vantagem que cada um dos sistemas de coordenadas tem em representar as particularidades de cada região oceânica, o que não pode ser atingido por nenhum deles isoladamente (Chassignet *et al.*, 2009).



**Figura 8.** Sistema de coordenadas verticais híbridas utilizado pelo HYCOM: verticais ( $z$ ), isopícnais ( $\rho$ ) e normalizada pela batimetria ( $\sigma$ ). Extraído de Chassignet *et al.* (2006).

No entanto, Chassignet *et al.* (2006) ressaltam que, embora o HYCOM seja um modelo sofisticado, que inclui uma extensa gama de processos físicos e incorpora técnicas numéricas que são ótimas para regiões oceânicas dinamicamente diferentes, as técnicas de assimilação de dados continuam sendo essenciais para a previsão do estado do oceano, isso por que: (1) muitos fenômenos oceânicos são devidos a processos não-lineares e, portanto, não são uma resposta determinística à forçante atmosférica; (2) existem erros na forçante atmosférica; (3) e os modelos oceânicos são imperfeitos, incluindo limitações em seus algoritmos e na resolução.

O sistema de assimilação NCODA é rodado operacionalmente pelos centros oceanográficos da marinha estadunidense (Cummings *et al.*, 2009), é implementado no HYCOM e utiliza como forçante atmosférica (tensão do vento, velocidade do vento,

fluxo de calor e precipitação) as saídas do *Navy Operational Global Atmospheric Prediction System* (NOGAPS) (Dombrowsky *et al.*, 2009). Os dados assimilados pelo HYCOM/NCODA, através do método de Interpolação Ótima Multivariada, são: altura da superfície do mar (ASM), TSM, temperatura e salinidade em subsuperfície, e gelo marinho (Clummings *et al.*, 2009). A resolução horizontal é de 1/12° (lat x lon) em cada uma das 32 camadas verticais híbridas. Entretanto, os dados são distribuídos em 33 níveis verticais z (Tabela 3). A batimetria adotada tem resolução de 2 minutos (Figura 7), passa por um controle de qualidade e deriva da *Digital Bathymetric Data Base* (DBDB2), elaborada pelo *Naval Research Laboratory* (NRL), dos Estados Unidos (Marks e Smith, 2004).

**Tabela 3.** Níveis verticais do HYCOM/NCODA e suas respectivas profundidades.

<b>Nível</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Profundidade (m)</b>	0	10	20	30	50	75	100	125	150
<b>Nível</b>	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>Profundidade (m)</b>	200	250	300	400	500	600	700	800	900
<b>Nível</b>	19	20	21	22	23	24	25	26	27
<b>Profundidade (m)</b>	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1750	2000	2500
<b>Nível</b>	28	29	30	31	32	33			
<b>Profundidade (m)</b>	3000	3500	4000	4500	5000	5500			

Novas versões do HYCOM/NCODA estão em desenvolvimento e, em breve, novas análises serão disponibilizadas. O sistema de assimilação recentemente implantado foi o 3D-Var e o modelo será configurado com resolução horizontal de 1/25° e 40 níveis verticais (Pat Hogan, NRL, comunicação pessoal).

#### **4.2. World Ocean Atlas 2009**

O WOA09 constitui-se de análises objetivas globais produzidas pelo *Ocean Climate Laboratory* (OCL) a partir de campos climatológicos de temperatura e salinidade, entre outras variáveis. O OCL é uma divisão do *National Oceanographic Data Center* (NODC), da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Entre suas principais missões, estão: melhorar a qualidade das bases de dados do NODC; desenvolver climatologias anuais, sazonais e mensais dos oceanos; estudar a variabilidade interanual e decenal do clima oceânico; construir bases globais de dados oceanográficos qualificadas por sistemas de controle de qualidade de dados; e fomentar o compartilhamento de dados oceanográficos no âmbito internacional (Antonov *et al.*, 2010; Locamini *et al.*, 2010).

As análises e climatologias de temperatura e salinidade do WOA09 são realizadas com dados a partir 1955 e estão organizadas em mapas horizontais com resolução de 1° (lat x lon). Elas são distribuídas entre os mesmos 33 níveis do HYCOM/NCODA (Tabela 3), com exceção das climatologias mensais que vão somente até a cota de 1500 m. O que não constitui um problema para este estudo, já que as análises pretendidas não ultrapassam a referida cota.

De posse desses dados, foram confeccionados mapas termohalinos das médias anuais do HYCOM/NCODA e das climatologias anuais do WOA09. Além disso, calculou-se a raiz do erro quadrático médio (REQM) das médias mensais que compõem o ciclo anual médio do HYCOM/NCODA em relação às climatologias mensais do WOA09. Para atingir essa meta, foi necessário interpolar o espaço do modelo para o espaço das observações, ou seja, interpolou-se horizontalmente a malha do HYCOM/NCODA para a malha do WOA09. Não foi necessário realizar uma interpolação vertical em razão dos sistemas estarem configurados nos mesmos níveis verticais. A escolha dos níveis avaliados buscou representar as diferentes massas de água que compõem a região de estudo, bem como a camada de mistura.

### **4.3. Ocean Surface Current Analysis Real-Time**

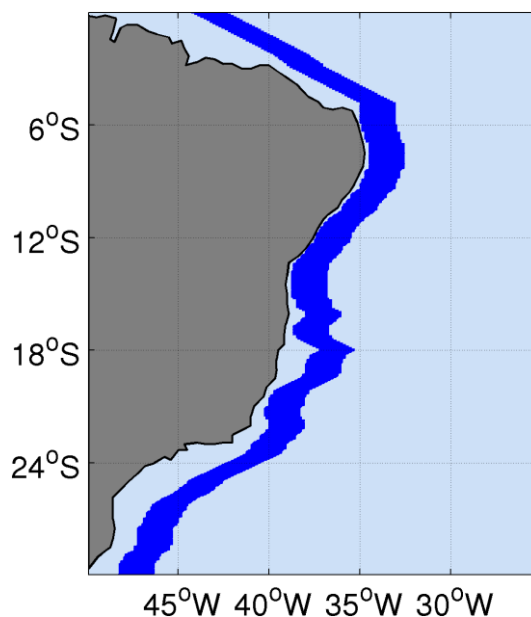
Bonjean e Lagerloef (2002), estudando o Oceano Pacífico Tropical a partir de uma série de dados desde outubro de 1992 até julho de 2000, propuseram um modelo diagnóstico para calcular a velocidade horizontal do oceano em seus 30 m superiores. O método toma partido de observações realizadas por sensores (altímetros, escaterômetros e sensores infravermelhos) embarcados em plataformas espaciais que estimam: ASM, TSM e vento na superfície do mar (VSM); e baseia-se nas equações de balanço geostrófico, dinâmica de Ekman, modelo de Stommel e em um termo complementar associado ao gradiente de empuxo na superfície. O trabalho desses autores resultou no produto denominado OSCAR, que vem sendo desenvolvido pela *Earth & Space Research* (ESR) e, embora tenha sofrido constante desenvolvimento, mantém sua estrutura original (Momin *et al.*, 2013; Sikhakolli *et al.*, 2013).

Os campos de velocidade zonal e meridional produzidos pelo OSCAR são disponibilizados desde 1992 até os dias atuais, com atualizações diárias em tempo quase real (Dohan *et al.*, 2009; Momin *et al.*, 2013). As resoluções espacial e temporal são de 1/3° (lat x lon) e 5 dias, respectivamente.

Através da REQM, as médias mensais com variabilidade interanual de correntes superficiais geradas pelo OSCAR foram confrontadas com os campos médios mensais produzidos pelo sistema HYCOM/NCODA, considerando o período de 2004 a 2011. Porém, para que fosse possível tal comparação, calculou-se a média aritmética da velocidade horizontal nos 4 primeiros níveis do HYCOM/NCODA (0, 10, 20 e 30 m). Como a resolução vertical entre esses níveis é constante (10 m), a média entre eles representa uma boa aproximação de como se comporta a velocidade nessa região superficial do oceano. Após isso, interpolaram-se as saídas do HYCOM/NCODA para o domínio do OSCAR.

#### 4.4. Determinação da posição da Bifurcação da Corrente Sul Equatorial

A identificação da posição da BiCSE foi realizada selecionando-se uma faixa ao largo da costa do Brasil, com uma largura de 2° longitudinais (~200 km), de modo que fosse possível abranger as CCOs (CB e SNB/CNB), conforme ilustra a Figura 9. Tendo em vista que a quebra da PCB situa-se desde 75 m de profundidade, no Setor Equatorial, até 180 m, no Setor Leste/Sudeste/Sul (Neto *et al.*, 2004), o limite oeste da faixa baseou-se na isóbata de 200 m, que marca, então, o início do talude continental.



**Figura 9.** Representação da faixa selecionada ao largo da costa para identificação da posição da BiCSE.

Considerando que a PCB exhibe orientação leste-oeste em alguns pontos, foi necessário corrigir o limite oeste da faixa, de modo que sua posição zonal não variasse mais do que o dobro de sua variação meridional. Ou seja, para cada ponto de

grade que se avançou na latitude, foi permitida uma variação de, no máximo, 2 pontos de grade na longitude. Esse procedimento evitou que a faixa se afastasse da região das CCOs.

Para cada par de latitude e profundidade, calculou-se a média longitudinal da velocidade meridional dentro da faixa, obtendo-se, então, uma seção (latitude x profundidade) de velocidade meridional ao largo da costa. Em seguida, definiu-se a posição da BiCSE como sendo a latitude na qual o valor da velocidade meridional é nulo, conforme sugerido pelos trabalhos de Rodrigues *et al.* (2007), Silva *et al.* (2009) e Veleda *et al.* (2011).

#### **4.5. Análise Estatística**

Para avaliar a qualidade das saídas do sistema HYCOM/NCODA, compararam-se as médias mensais de seu ciclo anual médio de temperatura e salinidade com as análises climatológicas mensais fornecidas pelo WOA09, através da REQM. Aplicou-se esse mesmo procedimento para avaliar as médias mensais, com variabilidade interanual, de velocidade superficial do HYCOM/NCODA em relação às aquelas calculadas pelo OSCAR.

Com a finalidade de verificar o grau de relação entre a posição da BiCSE e os transportes dirigidos pela SNB/CNB e pela CB, utilizou-se o coeficiente de correlação linear de Pearson, aplicando-o à série de médias mensais que compõem o ciclo anual médio do HYCOM/NCODA.

##### **4.5.1. Raiz do Erro Quadrático Médio**

Apesar de sua importância e ampla aplicabilidade, os modelos numéricos apresentam erros sistemáticos em decorrência de limitações das parametrizações empregadas em suas equações primitivas, resolução e condições de contorno e inicial. Os erros ocorrem principalmente durante eventos extremos, quando os modelos tendem a superestimar ou subestimar a intensidade e o posicionamento de sistemas oceanográficos. Dessa maneira, é fundamental avaliar sua capacidade de representar os processos físicos. Uma maneira de fazê-lo é através da REQM, dada pela equação abaixo.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (OBS - MOD)^2}$$

O cálculo de REQM consiste em comparar as saídas do modelo (MOD) com as observações (OBS) no espaço das observações, e pode ser entendido como a amplitude do erro de uma determinada estimativa, expresso sempre em valores positivos. Valores nulos de REQM indicam que o modelo representou perfeitamente as observações, enquanto valores altos indicam um afastamento do modelo em relação às observações (Moura *et al.*, 2010).

#### 4.5.2. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson

Entende-se por correlação linear simples a força ou grau de relação entre duas variáveis quantitativas (x e y). Se todos os valores satisfazem exatamente uma equação linear, diz-se que existe uma correlação perfeita ou que elas estão perfeitamente correlacionadas. Quando os valores das variáveis aumentam ou diminuem simultaneamente, tem-se uma correlação positiva ou direta. Por outro lado, quando os valores de uma das variáveis aumentam enquanto os valores da outra diminuem, tem-se uma correlação negativa ou inversa (Spiegel, 1993).

O coeficiente linear de correlação de Pearson (r) ou, simplesmente, coeficiente de correlação, é dado pela razão entre a covariância de duas variáveis (cov(x,y)) e o produto de seus desvios-padrão (S<sub>x</sub> e S<sub>y</sub>), conforme a equação abaixo.

$$r = \frac{cov(x,y)}{S_x S_y}$$

Desenvolvendo-se a equação anterior, obtém-se:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

O coeficiente de correlação tem caráter adimensional e seus valores podem variar entre -1 e 1.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De agora em diante, num esforço de descrever a variabilidade da BiCSE e sua relação com as CCOs ao largo da costa do Brasil, e avaliar a qualidade das saídas do HYCOM/NCODA, serão analisados e discutidos os principais resultados encontrados durante a realização do presente trabalho.

### 5.1. Estrutura Termohalina

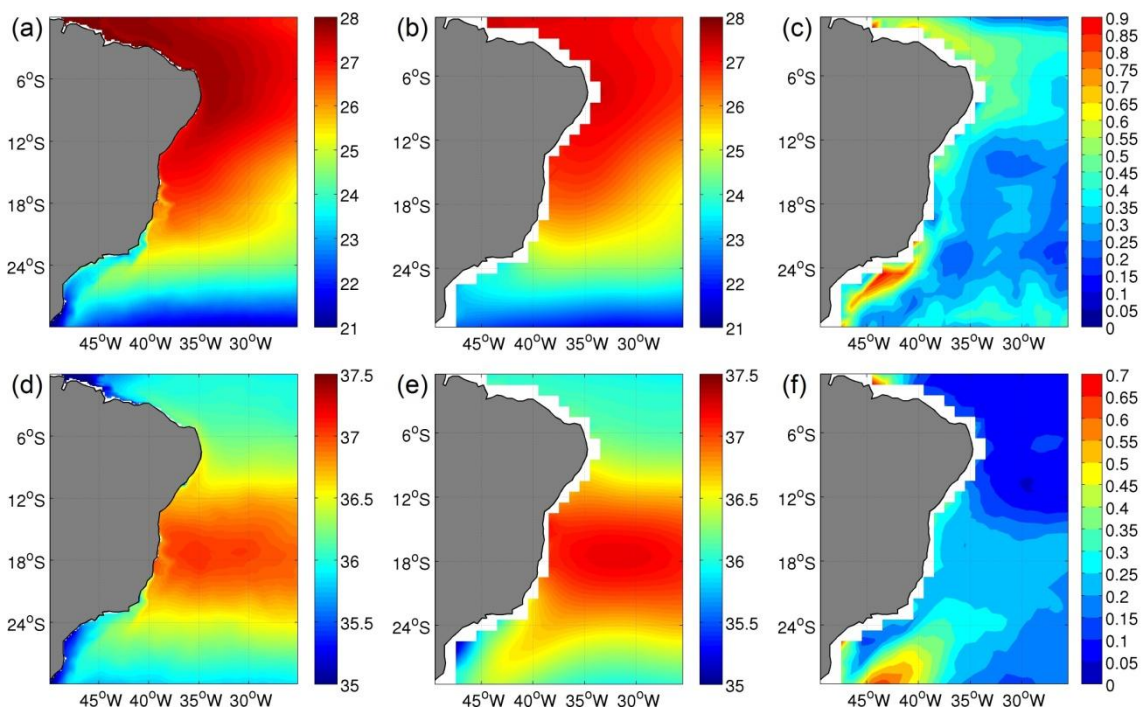
No intuito de verificar a capacidade do sistema HYCOM/NCODA em reproduzir a estrutura termohalina média da área de estudo, compararam-se seus campos médios anuais com aqueles fornecidos pelo WOA09. Adicionalmente, avaliou-se, através da REQM, o desvio entre as médias mensais que constituem o ciclo anual médio dos dois sistemas. A Tabela 4 sintetiza a média e o desvio padrão da REQM da temperatura e da salinidade nos diversos níveis de profundidade avaliados (0, 100, 400, 800 e 1400 m). De maneira geral, a amplitude do erro de ambos os parâmetros é maior na superfície e decresce com o aumento da profundidade.

**Tabela 4.** Média e desvio padrão para cada um dos mapas de raiz do erro quadrático médio (REQM) da temperatura (°C) e da salinidade (ups) do HYCOM/NCODA em relação ao WOA09 em 0, 100, 400, 800 e 1400 m.

Profundidade (m)	REQM da Temperatura (°C)		REQM da Salinidade (ups)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	0,49	0,32	0,30	0,54
100	1,10	0,69	0,22	0,12
400	0,57	0,35	0,08	0,06
800	0,22	0,11	0,06	0,05
1400	0,16	0,08	0,04	0,02

Ao se analisar a Figura 10, referente aos campos de temperatura e salinidade na superfície, observa-se, como um todo, um padrão semelhante entre as saídas do HYCOM/NCODA e do WOA09, condizente com os valores descritos na bibliografia para a AT, de acordo com a Tabela 1, com valores superiores a 20°C e 36 ups (Emílsson, 1961). Emílsson (1961) ainda descreve a AT na costa da Bahia, próxima à sua região de sua formação, como uma água tipo, cujas temperaturas e salinidades excedem, em muito, os valores de 25°C e 36,5 ups, respectivamente. Stramma e Schott (1999) reportam temperaturas de cerca de 27°C na camada de mistura do Atlântico Tropical. A partir de dados de satélite e saídas de um modelo regional, Silva

*et al.* (2009) também observaram valores de TSM superiores a 27°C na região conhecida com Piscina Quente do Atlântico Equatorial, principalmente no verão.



**Figura 10.** Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) na superfície. Temperatura (°C): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).

No caso da temperatura, o HYCOM/NCODA (Figura 10a) produziu valores superiores ao WOA09 (Figura 10b) e que ultrapassam 27°C entre o limite norte do domínio e 15°S. Além disso, no HYCOM/NCODA, observa-se uma língua de águas mais quentes em direção ao sul, que se apresenta muito suavizada na climatologia do WOA09. Segundo o Primeiro Relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC, 2013), os valores de TSM no Oceano Atlântico têm aumentado de forma indiscutível nas últimas décadas, o que pode explicar o fato dessa grandeza ser reproduzida com maiores valores pelo HYCOM/NCODA, já que esse sistema é formado por uma série de dados de 2004 a 2011, enquanto o WOA reúne estimativas de mais de 6 décadas em uma única climatologia.

Em relação à salinidade, a diferença mais marcante é a língua presente no WOA09 (Figura 10e) que se estende mais em direção ao sul quando comparada àquela produzida pelo HYCOM/NCODA (Figura 10d). Segundo Emílsson (1961), a isohalina de 36 ups avança como uma língua na direção sul, bordejando a plataforma continental, até uma latitude próxima de Rio Grande (RS), a cerca de 32°S,



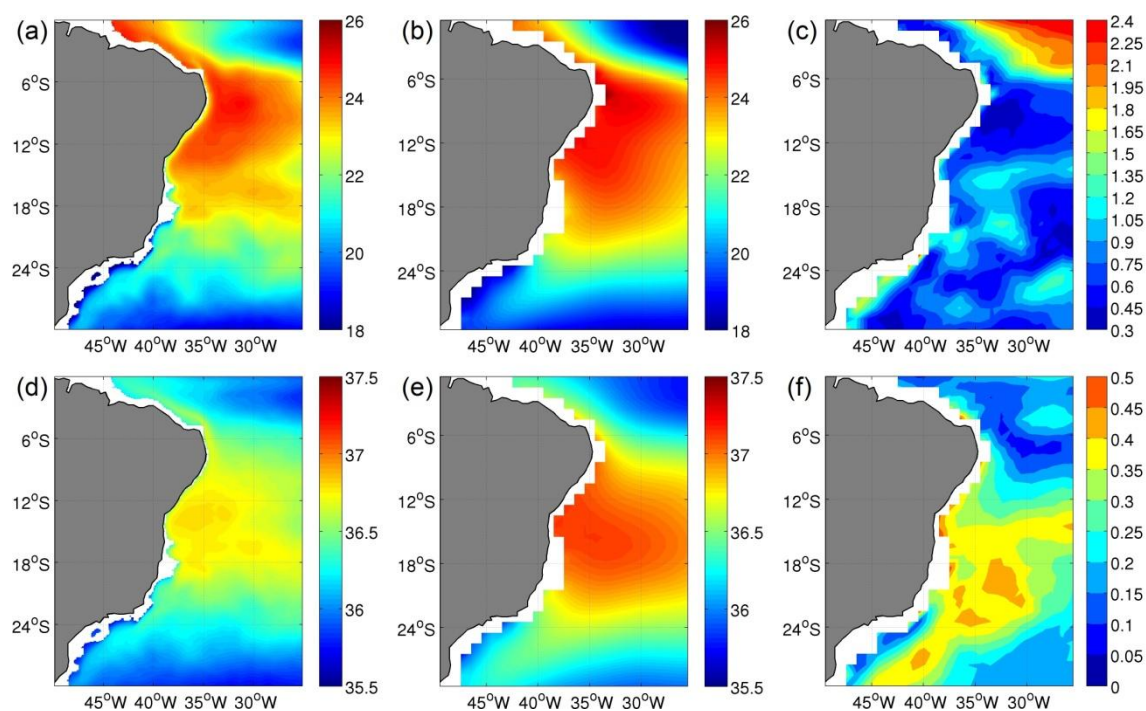
corroborando os resultados aqui encontrados. Cirano *et al.* (2006) também descrevem uma língua de águas mais quentes e salinas avançando em direção ao sul ao nível da AT. Nessa latitude (32°S), a AT passa a receber influência da água doce oriunda da Lagoa dos Patos e do estuário do Rio da Prata. Além disso, a região sul do domínio também recebe influência da Convergência Subtropical, o que é evidenciado nas saídas do HYCOM/NCODA, onde, junto à costa, há a penetração de águas mais frias e menos salgadas em direção ao norte.

Os maiores valores da REQM na superfície concentram-se próximos à costa, nas regiões norte e sul do domínio, tanto no caso da temperatura (Figura 10c) quanto no caso da salinidade (Figura 10f), cujas estatísticas são, respectivamente,  $0,49 \pm 0,32^{\circ}\text{C}$  e  $0,30 \pm 0,54$  ups (Tabela 4). Os erros na região sul dão-se em função da maior proximidade com a dinâmica complexa da Confluência Brasil-Malvinas, enquanto na região norte, eles ocorrem devido à pluma do Rio Amazonas, especialmente no caso da salinidade.

Cirano *et al.* (2006) avaliaram o erro (erro = modelo - observação) da climatologia anual dos campos termohalinos de um modelo numérico global sem assimilação de dados em relação ao WOA05 em diversos níveis. Segundo os valores apresentados por esses autores, em 52 m, o erro da temperatura potencial ficou em torno de  $-1^{\circ}\text{C}$ , chegando a valores menores que  $-2^{\circ}\text{C}$  na região equatorial. Para a salinidade, o erro variou de  $-0,2$  a menos de  $-0,4$  ups. Como esse nível refere-se à AT, pode servir como base de comparação para os erros encontrados pelo presente trabalho na superfície e em 100 m. Assim, o estudo que aqui se discute apresenta erros de temperatura comparativamente menores e de salinidade parecidos na superfície. No trabalho dos autores citados, grande parte do erro relacionado à AT foi encontrado nas mesmas regiões identificadas pelo presente trabalho, muitos dos quais associados à Convergência Subtropical.

O nível de 100 m é aquele que apresentou maior amplitude do erro da temperatura ( $1,10 \pm 0,69^{\circ}\text{C}$ ), concentrando-se na região nordeste do domínio (Figura 11c), onde atinge valores próximos a  $2,4^{\circ}\text{C}$ , mas não ultrapassa  $1,2^{\circ}\text{C}$  em praticamente todo restante. Esse é o nível da termoclina e sua representação por qualquer modelo é um grande desafio, mesmo com a assimilação. Comparando-se a média anual de temperatura do HYCOM/NCODA (Figura 11a) com a climatologia anual do WOA09 (Figura 11b), nota-se que esse último possui maiores gradientes latitudinais e contornos mais bem definidos.

Quanto à salinidade, a diferença mais notável é o fato do HYCOM/NCODA (Figura 11d) haver subestimado os valores em relação ao WOA09, principalmente na região centro-sudoeste do domínio (Figura 11e). Conseqüentemente, os maiores valores da REQM dessa variável concentram-se na referida região, onde atinge 0,45 ups (Figura 11f). De uma forma geral, o erro da salinidade nesse nível (100 m) é de  $0,22 \pm 0,12$  ups (Tabela 4). Novamente, percebe-se, próximo à costa, a penetração, em direção ao norte, de águas com menores temperaturas e salinidades, provenientes de latitudes mais altas e sob influência da Convergência Subtropical (Emílsson, 1961). Outra característica interessante é o padrão meandrante observado na região sul do domínio do HYCOM/NCODA e que não é verificado no WOA09, provavelmente devido ao deslocamento da CAS. Em comparação ao trabalho de Cirano *et al.* (2006), o HYCOM/NCODA apresentou erros semelhantes.

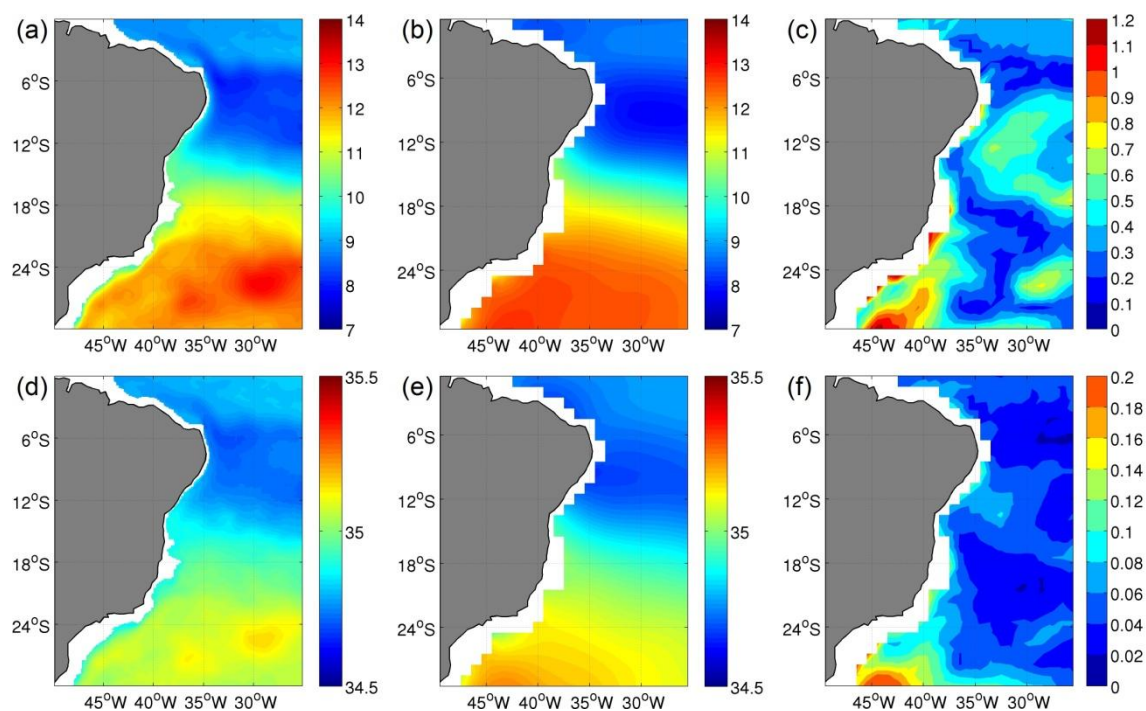


**Figura 11.** Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 100 m. Temperatura (°C): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).

De todo modo, a 100 m de profundidade, ainda no nível da AT, os campos termohalinos do HYCOM/NCODA reproduzem a climatologia de larga escala. A temperatura situa-se acima de 20°C e a salinidade acima de 36 ups (Tabela 1), chegando a valores superiores a 25°C e 36,5 ups próximo a sua região de formação, conforme descrito por Emílsson (1961). Silveira *et al.* (1994) encontraram salinidades maiores que 37 ups nesse nível e Stramma e Schott (1999) descrevem-no como o

ponto de salinidade máxima. À medida que se afasta da região tropical, a AT reduz seus valores termohalinos devido à mistura com outras massas de água, especialmente aquelas oriundas de regiões subtropicais, mais frias e menos salinas. Menores temperaturas e salinidades junto à costa, na região entre 20°S e 26°S, tanto na superfície (Figura 10) quanto em 100 m (Figura 11), também são atribuídas a ressurgência costeira que conduz parte da ACAS em direção à superfície, principalmente nas proximidades de Cabo Frio (RJ).

A Figura 12 representa os campos termohalinos do HYCOM/NCODA e do WOA09 em 400 m, bem como a REQM. Os mapas mostram que esses parâmetros estão de acordo com os valores esperados pela literatura para a ACAS, entre 6 e 20°C, e entre 34,6 e 36 ups (Stramma e England, 1999; Silveira *et al.*, 2000), conforme verificado na Tabela 1.



**Figura 12.** Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 400 m. Temperatura (°C): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).

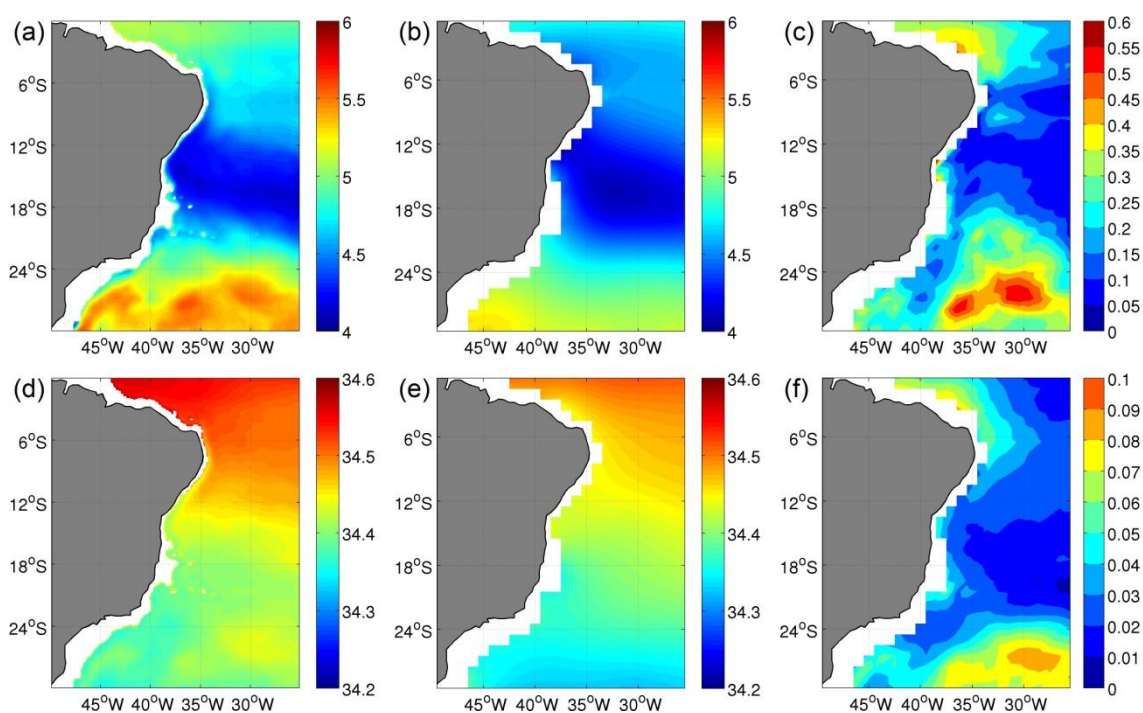
No caso da temperatura, os dois sistemas (Figuras 12a e 12b) apresentam um padrão de distribuição bem semelhante, inclusive há uma faixa de temperaturas ao redor de 10°C que se estende de 14°S a 20°S em ambos os casos. Entretanto, continuações dessa faixa podem ser observadas no HYCOM/NCODA bem próximas a costa em direção ao norte e, principalmente, em direção ao sul, o que não pode ser

constatado no WOA09. Cirano *et al.* (2006) também identificaram o espalhamento dessa propriedade da ACAS em 295 m, junto à margem continental, tanto em direção ao norte, através da SNB, quanto em direção ao sul, através da CB. Valores da REQM (Figura 12c) superiores a 1°C são verificados na região sudoeste do domínio, apesar de não ultrapassarem 0,6°C em sua maior parte. No geral, o valor da REQM é  $0,57 \pm 0,35^\circ\text{C}$ , de acordo com a Tabela 4. No trabalho de Cirano *et al.* (2006), grande parte do erro é atribuída à influência da Convergência Subtropical, chega a 1°C numa faixa zonal entre 25°S e 30°S, a -1°C na região costeira entre 20°S e 25°S, e apresenta o máximo de 2°C em outra faixa zonal entre 5°S e 10°S e, portanto, são comparativamente maiores do que os erros encontrados no trabalho que aqui se expõe.

Nesse nível (400 m), o padrão de distribuição da salinidade é semelhante à temperatura, sendo a região sul aquela que apresentou as diferenças mais perceptíveis entre modelo e observações, de modo que as saídas do HYCOM/NCODA (Figura 12d) foram ligeiramente subestimadas em comparação ao WOA09 (Figura 12e). Os maiores índices de erro, no entanto, não ultrapassam 0,2 ups em todo o domínio (Figura 12f), e apresentam uma média de  $0,08 \pm 0,06$  ups (Tabela 4). Coincidindo com Cirano *et al.* (2006), boa parte dos erros termohalinos na região da ACAS (295 m) encontra-se sob influência da Convergência Subtropical. Esses autores reportam um erro de -0,2 ups que se estende zonalmente entre 20°S e 30°S, chegando a -0,4 ups em 25°S.

Avançando para 800 m de profundidade, no nível da AIA, tanto as médias anuais de temperatura quanto de salinidade do HYCOM/NCODA (Figuras 13a e 13d, respectivamente) excederam os resultados encontrados na climatologia anual do WOA09 (Figuras 13b e 13e, respectivamente), ainda que tenham demonstrado padrões parecidos e pouca diferença. De acordo com o que pode ser constatado na Figura 13 e com os índices termohalinos apresentados por Silveira *et al.* (2000), os valores encontram-se dentro dos limites esperados para a AIA (3 - 6°C e 34,2 - 34,6 ups), conforme se verifica na Tabela 1. Silveira *et al.* (1994) ainda pontuam que as menores salinidades do Atlântico Sul são encontradas ao nível da AIA, onde registraram o mínimo de 34,5 ups em 700 m. Adicionalmente, Cirano *et al.* (2006) relatam os menores valores de salinidade propagando-se em direção ao norte ao longo da costa brasileira.

Os valores mais importantes da REQM dos campos termohalinos ao nível da AIA (Figuras 13c e 13f) estão concentrados nas porções noroeste e sudeste-sul, chegando a cerca de 0,5°C no caso da temperatura e mantendo-se inferiores a 0,1 ups no caso da salinidade. As médias da REQM são baixas nesse nível ( $0,22 \pm 0,11^\circ\text{C}$  e  $0,06 \pm 0,05$  ups), o que demonstra que o modelo representou-o bem. Cirano *et al.* (2006), avaliando o erro de seu modelo ao nível da AIA (989 m), encontrou erros na ordem de 0,4 a 0,8°C e de até 0,1 ups na faixa zonal entre 25°S e 30°S, de -0,2°C ao longo da margem continental e de -0,1 ups no noroeste do domínio. O que, de certa forma, são comparáveis com os erros aqui apresentados.

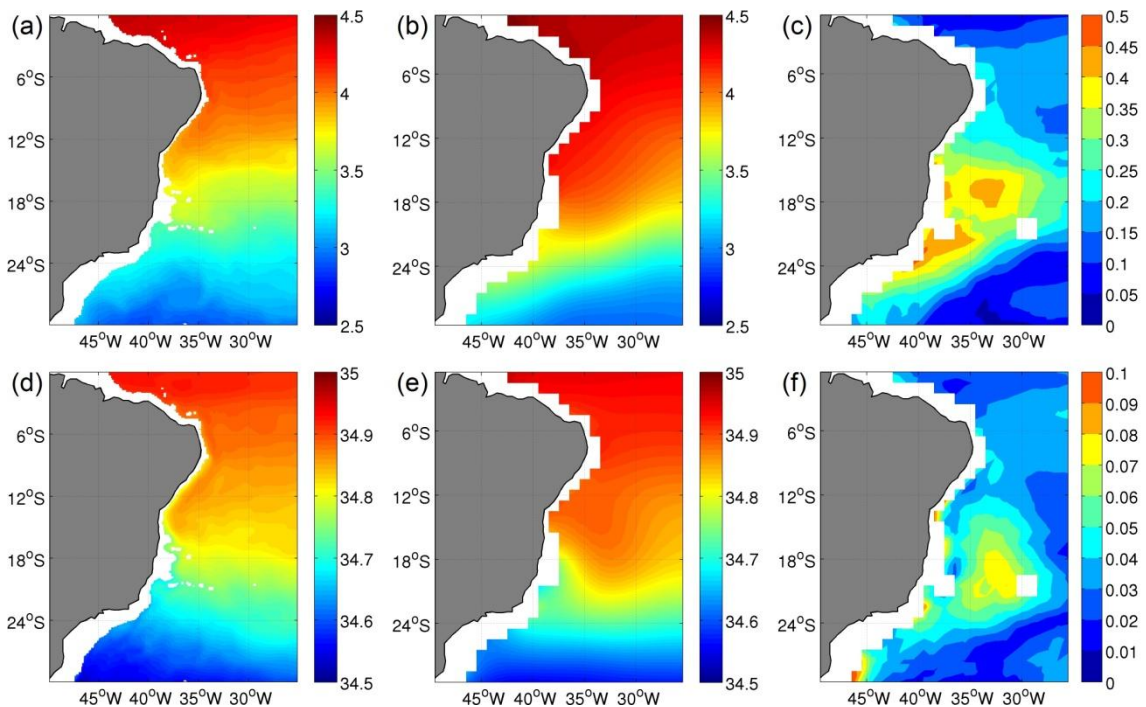


**Figura 13.** Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 800 m. Temperatura (°C): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).

Conforme se observa na Figura 14, em 1400 m, a salinidade volta a aumentar devido à presença da APAN (Silveira *et al.*, 1994). De acordo com a Tabela 1, os valores termohalinos situam-se, em grande parte do domínio, dentro dos índices esperados para essa massa de água, entre 3 e 4°C, e entre 34,6 e 35 ups (Silveira *et al.*, 2000). Na figura, observa-se, ainda, que as isolinhas do WOA09 estão mais deslocadas para o sul comparadas às isolinhas do HYCOM/NCODA.

De maneira geral, esse foi o nível (1400 m) no qual o modelo afastou-se menos das análises do WOA09 em termos absolutos. A Tabela 4 relaciona médias da REQM

de  $0,16 \pm 0,08^{\circ}\text{C}$  para a temperatura e  $0,04 \pm 0,02$  ups para a salinidade. Os maiores erros de temperatura (Figura 14c) encontram-se na região centro-oeste, mas não ultrapassam  $0,5^{\circ}\text{C}$ . O erro da salinidade (Figura 14f) restringiu-se ao centro do domínio e a pequenos pontos mais próximos à região costeira, mantendo-se com valores inferiores a 0,1 ups. No estudo de Cirano *et al.* (2006) foram registrados, ao nível da APAN, em 1931 m, erros superiores a  $0,2^{\circ}\text{C}$  em grande parte do domínio e que chegam a  $0,6^{\circ}\text{C}$  na margem continental em  $20^{\circ}\text{S}$ . O erro da salinidade encontrado por esses autores apresentou valores, em módulo, de 0,02 ups em boa parte da área de estudo, atingindo 0,04 ups na região sul, entre  $25^{\circ}\text{S}$  e  $30^{\circ}\text{S}$ .

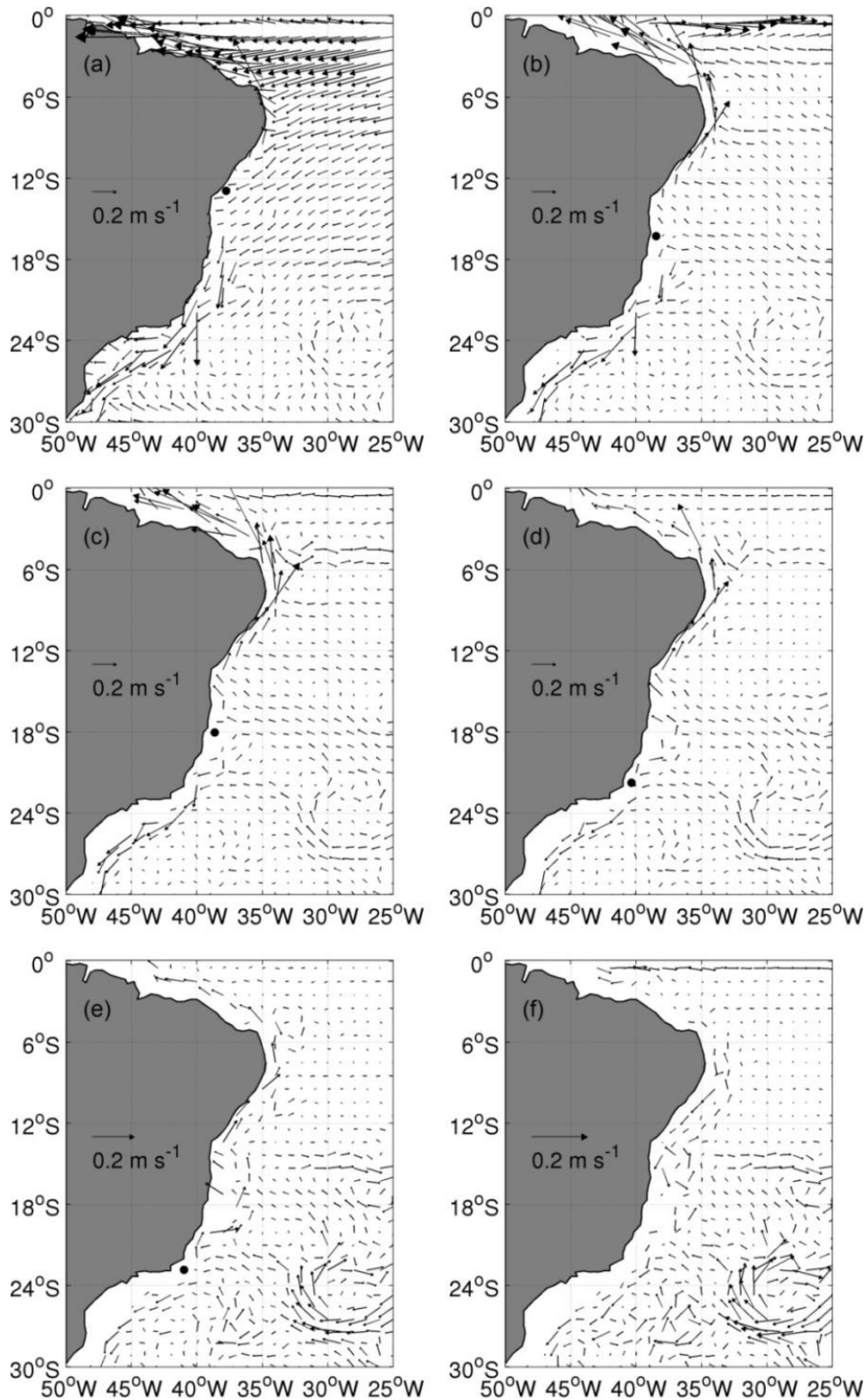


**Figura 14.** Média anual e raiz do erro quadrático médio (REQM) em 1400 m. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ): HYCOM/NCODA (a), WOA09 (b) e REQM (c). Salinidade (ups): HYCOM/NCODA (d), WOA09 (e) e REQM (f).

## 5.2. Velocidade Horizontal

Neste tópico, serão discutidas as médias anuais dos campos de velocidade horizontal do sistema HYCOM/NCODA de 2004 a 2011, em diversos níveis de profundidade (0, 100, 200, 400, 800 e 1400 m). A avaliação desses campos permite entender os padrões de circulação no oeste do Atlântico Sul, bem como fornece uma primeira impressão do posicionamento da BiCSE e de seu deslocamento para sul à medida que aumenta a profundidade. Além disso, calculou-se a REQM das médias

mensais, com variabilidade interanual, de velocidade nos 30 m superficiais do HYCOM/NCODA em relação ao OSCAR.



**Figura 15.** Velocidade média anual (m/s) do HYCOM/NCODA na superfície (a), 100 (b), 200 (c), 400 (d), 800 (e) e 1400 m (f) de profundidade. Os pontos pretos representam a posição da BICSE estimada visualmente.

Na Figura 15a, na superfície, observa-se um intenso sistema de correntes zonais na região equatorial. Mais ao sul, identifica-se um fluxo amplo para oeste ao redor de 0,2 m/s entre 6°S e 16°S, correspondente à sCSE (Tomczak e Godfrey, 1994; Stramma *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2009). Ao se aproximar da costa, uma parte da sCSE segue na direção do Equador, compondo a CNB que apresenta velocidades muito altas, coincidentes com os valores calculados por Stramma (1991), e que excedem 0,9 m/s em 4°S. Ao sul de 13°S, a circulação junto à costa passa a orientar-se na direção do Polo Sul, indicando que esta é a latitude na qual se encontra a BiCSE na superfície. A partir de 16°S, a CB apresenta-se mais definida e mais rápida e contabiliza velocidades de até 0,7 m/s, conforme indicou Soutelino (2008) em seu trabalho ao revisar a literatura. Rodrigues *et al.* (2007), a partir do cálculo da velocidade geostrófica utilizando dados observados, encontrou a sCSE entre 8°S e 20°S e posicionou a BiCSE em 14°S entre 0 e 100 m. Entretanto, esses autores ressaltam que o cálculo não leva em consideração a dinâmica de Ekman, o que faria com que a BiCSE ocorresse em 13°S.

A 100 m de profundidade (Figura 15b), é possível notar um sistema de contra correntes zonais próximo à Linha do Equador, referente ao núcleo da SE, onde, segundo Tomczak e Godfrey (1994), chega a atingir 1,2 m/s. A SE é alimentada por uma porção da SNB que sofre retroflexão e, então, cruza todo o Oceano Atlântico na direção leste enquanto perde força (Stramma e Schott, 1999). Nesse nível, a SNB afasta-se mais da costa e é mais intensa do que a CNB na superfície. Por outro lado, a CB tem sua velocidade reduzida com o aumento da profundidade. Com relação à bifurcação, verifica-se sua migração em direção ao sul à medida que se afasta da superfície, situando-se próxima a 16°S no nível de 100 m. Stramma e England (1999) também a descrevem ocorrendo em 16°S nessa profundidade, enquanto Rodrigues *et al.* (2007) a encontram em 14°S. Entretanto, outros trabalhos como os de Harper (2000) e Malanotte-Rizzoli *et al.* (2000) chegam a identificá-la mais ao sul, chegando até 18°S (Tabela 2).

Com o avanço da profundidade, a BiCSE segue migrando na direção sul, porém, com menos intensidade que nos primeiros 100 m. Em 200 m (Figura 15c), ela encontra-se nas proximidades de 18°S. Rodrigues *et al.* (2007) estimaram, através de observações, a bifurcação ocorrendo em 18,6°S nesse nível. A SNB, apesar de ainda apresentar fluxos vigorosos, mostra-se ligeiramente mais lenta do que em 100 m. Os sistemas de correntes e contra correntes equatoriais também perdem força nessa profundidade, principalmente a SE.



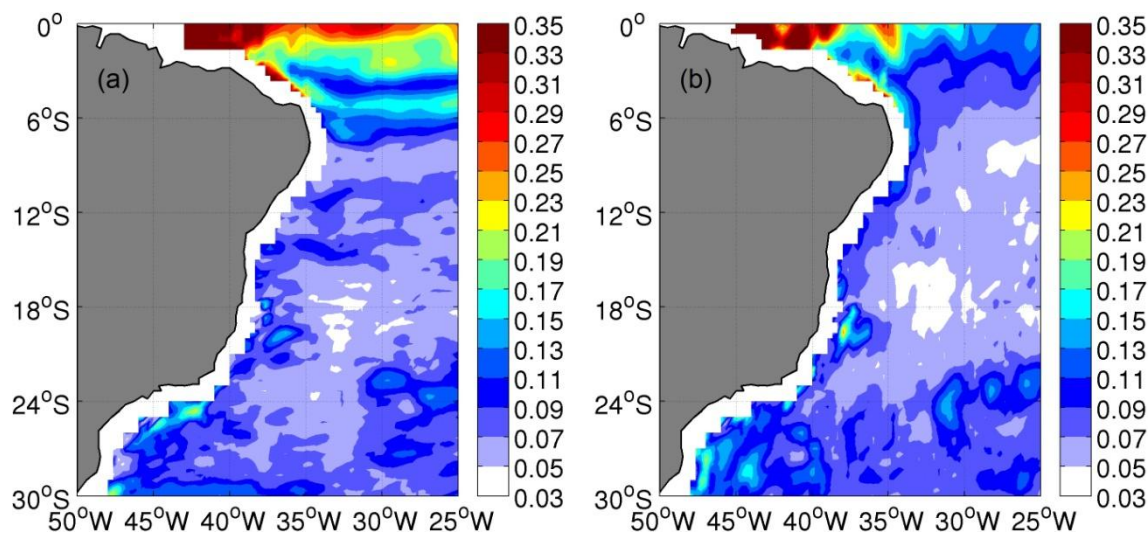
Em 400 m (Figura 15d), o padrão de circulação é bem similar àquele observado em 200 m. A diferença encontra-se na diminuição das velocidades das correntes e no posicionamento da BiCSE que, nesse caso, apresenta-se em 22°S, migrando ainda mais em direção ao polo. Stramma e England (1999), a partir de saídas de modelo, reportam velocidades da SNB superiores a 0,5 m/s nesse nível, como se pode constatar na Figura 15d. Nessa profundidade, o trabalho de Rodrigues *et al.* (2007) encontrou a posição da bifurcação em 21°S. De uma forma geral, a maior parte dos trabalhos já realizados posiciona a BiCSE, nesse nível, em latitudes próximas às que acabam de ser citadas, conforme detalha a Tabela 2.

Entre 400 e 800 m de profundidade, identifica-se uma grande redução na magnitude dos vetores de velocidade. A posição da bifurcação sofre pouca variação e é possível identificá-la em 23°S a 800 m, de acordo com a Figura 15e. Ao norte dessa latitude, verifica-se o fluxo da CCI fluindo em direção ao Equador. Boebel *et al.* (1999) apresenta essa corrente fluindo entre 0,2 e 0,4 m/s. Aqui, o posicionamento da BiCSE divergiu 2,5° do que foi proposto por Rodrigues *et al.* (2007) que, através do cálculo de velocidade geostrófica, registrou a bifurcação a 25,5°S. Entretanto, boa parte dos estudos relata a BiCSE ao sul de 23°S no nível da AIA (Tabela 2).

Ao nível da APAN, em 1400 m (Figura 15f), o padrão de circulação na margem continental brasileira é praticamente todo em direção ao sul e constitui a CCP (Stramma e England, 1999). Nesse nível, portanto, já não se nota mais a presença da BiCSE. Próximo a 20°S, a CCP é interrompida devido à presença da Cadeia Vitória-Trindade e reorganiza-se após transpor essa barreira, conforme descrito por Stramma e England (1999).

A Figura 16 expõe a REQM da velocidade na superfície do HYCOM/NCODA em relação ao OSCAR que, no geral, está abaixo de 0,15 m/s. Tanto o erro da componente zonal (Figura 16a), quanto o erro da componente meridional (Figura 16b) apresentaram uma distribuição similar, com exceção da extremidade nordeste da área de estudo, onde a componente zonal apresentou erros significativamente mais altos. Na região noroeste, foram produzidos erros maiores que no resto do domínio em ambos os casos, e que chegam a ultrapassar 0,7 m/s. No entanto, cabe ressaltar que tais erros ocorreram fora da região de interesse para estudo da BiCSE e das CCOs. Na região da CB, ao sul de 18°S, é possível observar erros na ordem de 0,2 m/s, coincidentes com a zona em que esta corrente sofre aceleração, conforme mostra a Figura 15a. Nota-se também que o erro varia conforme o sentido do fluxo: onde o

sentido é predominantemente norte-sul, o erro da componente meridional é maior; onde o sentido predominante é de leste para oeste, o erro da componente zonal é maior. De acordo com a Tabela 5, os erros da velocidade zonal e meridional são, em média,  $0,12 \pm 0,08$  e  $0,11 \pm 0,08$  m/s, respectivamente.



**Figura 16.** Raiz do erro quadrático médio (m/s) das velocidades zonal (a) e meridional (b) do HYCOM/NCODA em relação ao OSCAR nos 30 m superficiais do oceano.

Comparando-se os erros explicitados na Figura 16 com as velocidades das correntes superficiais expostas na Figura 15a, percebe-se que há uma diferença relativamente grande entre as saídas do HYCOM/NCODA e do OSCAR, principalmente nas regiões das correntes equatoriais e das CCOs. Tais discrepâncias ocorrem, basicamente, devido às limitações das análises em reproduzir a intangível realidade e às limitações dos satélites em estimar as variáveis oceânicas sem erros (Chassignet *et al.*, 2006; Cummings *et al.*, 2009; Dohan *et al.*, 2009).

**Tabela 5.** Média e desvio padrão para os mapas de raiz do erro quadrático médio (REQM) das componentes zonal e meridional da velocidade (m/s) do HYCOM/NCODA em relação ao OSCAR nos 30 m superficiais do oceano.

Velocidade (m/s)	Média da REQM	Desvio Padrão da REQM
Componente zonal	0,12	0,08
Componente meridional	0,11	0,08

Dada a heterogeneidade dos oceanos, nenhum método de observação das correntes superficiais através de satélites é universalmente aplicável (Dohan *et al.*, 2009). No caso do OSCAR, um sistema que se utiliza de estimativas de TSM para calcular a velocidade superficial do oceano, uma fonte de contaminação dos dados é a presença de nebulosidade que afeta a precisão dos sensores infravermelhos

(Robinson, 2010). Isso é especialmente visível na região costeira ao sul de 16°S e na região equatorial que, conforme Silva *et al.* (2009) e Veleza *et al.* (2011), estão sob influência da ZCAS e da ZCIT, respectivamente, estando sujeitas, portanto, a uma intensa formação de nuvens durante diversas semanas ao longo do ano.

Outra possível fonte de erros está relacionada às limitações dos altímetros. Dohan *et al.* (2009) e Silva *et al.* (2009), por exemplo, advertem sobre as dificuldades desses radares em determinar ASM em regiões costeiras sob domínio das CCOs, que tem variabilidade temporal de 1 a 4 dias e escala espacial na ordem de 100 km, e que não podem ser detectadas de maneira satisfatória pelos referidos sensores. Dohan *et al.* (2009) ainda argumentam que os altímetros apresentam outras limitações em reproduzir as feições de zonas costeiras, como: alteração na forma de onda causada pela massa de terra, interferência em decorrência da umidade atmosférica, e *aliasing* provocado pela maré; o que explica, em grande parte, os erros observados na pluma do Rio Amazonas. Além disso, a ASM não é a variável de interesse para se estimar a variabilidade da circulação de superfície e sim as anomalias em relação à topografia dinâmica média. Entretanto, essa superfície não é bem conhecida, principalmente em regiões com forte presença de feições meso-escala.

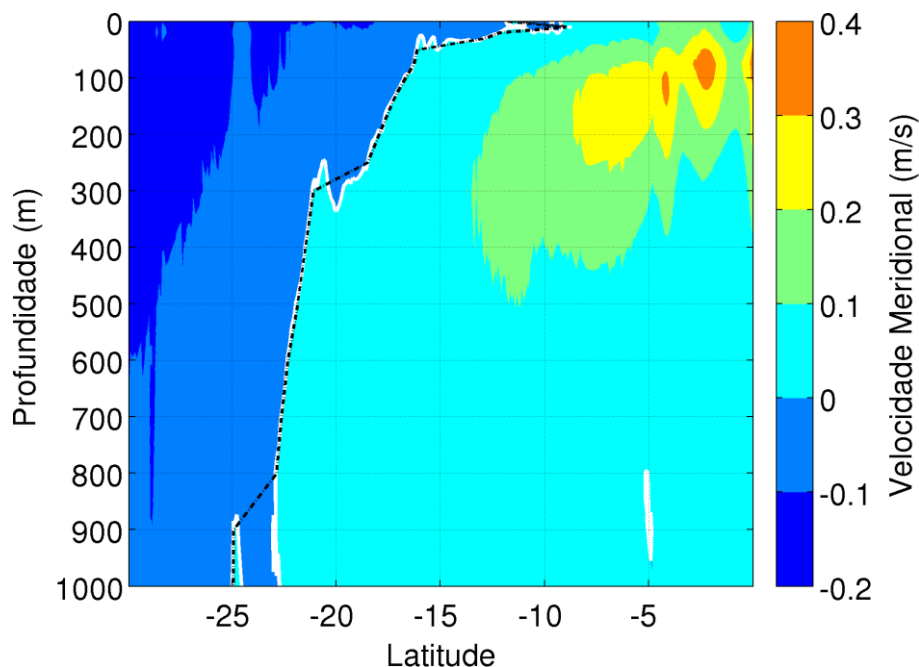
Apesar dos erros, é preciso destacar a importância de diferentes sistemas observacionais e previsores no estudo dos oceanos. Quanto mais fontes alternativas para acessar a variabilidade oceânica e quanto mais se avança no desenvolvimento dessas técnicas, maior será o nível de conhecimento da dinâmica oceânica e mais acurados serão os prognósticos de seu estado futuro.

### **5.3. Bifurcação da Corrente Sul Equatorial**

Aqui, analisar-se-á a variabilidade sazonal da BiCSE com base no ciclo anual médio calculado a partir de saídas do sistema HYCOM/NCODA de 2004 a 2011. As análises foram realizadas, fundamentalmente, a partir de seções verticais de velocidade meridional ao largo da costa brasileira, conforme descrito no Tópico 4.4.

Em uma primeira análise, a Figura 17 expõe a posição média anual da BiCSE, onde fica evidente sua dependência com a profundidade, o que condiz com a literatura (Stramma e England, 1999; Rodrigues *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2009; Veleza *et al.*, 2011). Essa migração mostra-se mais abrupta nos 300 m superiores do oceano. Na superfície e próximo a ela, a bifurcação ocorre próxima a 10°S, cerca de 17°S em 100 m, 18°S em 200 m e atinge as proximidades de 21°S a 300 m. Entre 300 e 800 m, a

variação da posição da bifurcação é pequena, de aproximadamente 2°, atingindo latitudes próximas de 23°S em 800 m. A partir de 800 m, ela volta a migrar de maneira mais intensa, até atingir 25°S em 1000 m. Assim, o deslocamento da posição da BiCSE, desde a superfície até 1000 m, é de 15°.

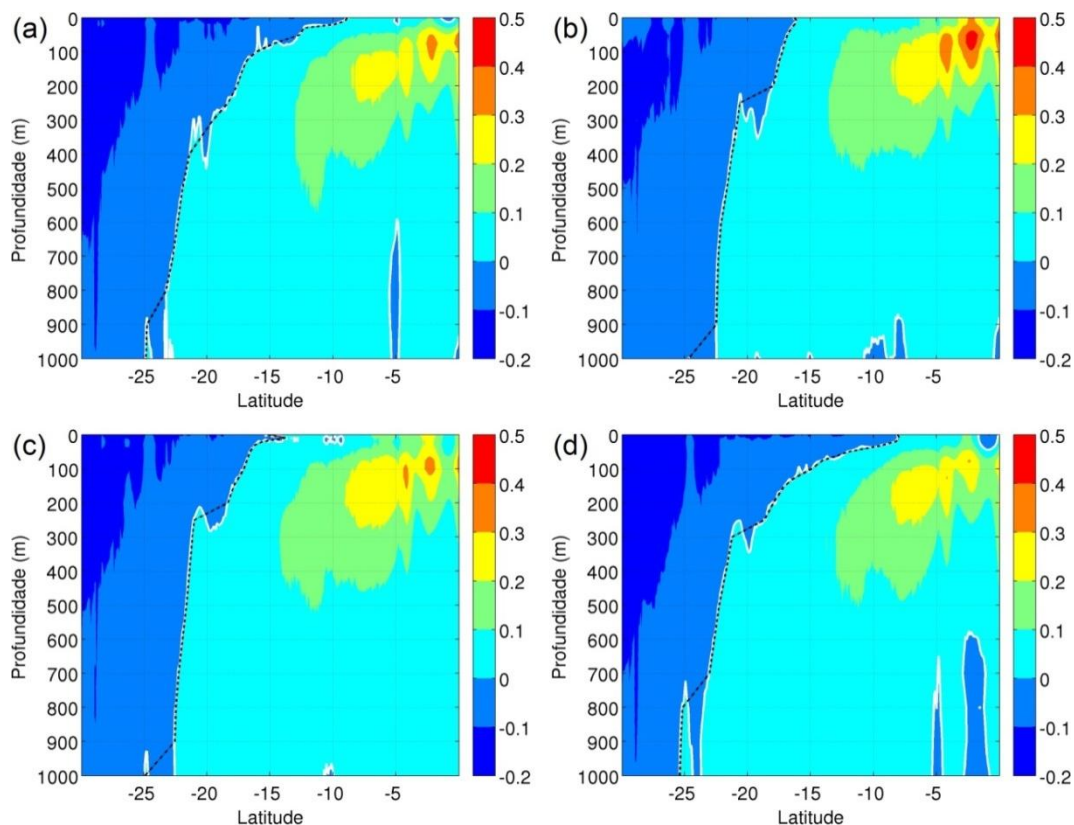


**Figura 17.** Média anual da velocidade meridional (m/s) na região ao largo da costa brasileira destacada na Figura 9. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). A linha branca representa velocidade nula e a linha preta tracejada indica a posição estimada da BiCSE.

Rodrigues *et al.* (2007) verificaram um padrão similar (Figura 4), no qual, segundo suas observações de velocidade geostrofica, a bifurcação apresentou-se em 14°S na superfície, 18,6°S em 200 m, 21°S em 400 m, 23,6°S em 600m, 25,5°S em 800 m, 26°S em 900 m e 27°S em 1000 m, variando, no total, 13°. Os resultados de saídas de modelo numérico desses autores mostraram a bifurcação ocorrendo em 10°S na superfície, 14°S em 100 m, 23°S em 400 m e atingindo 27° em 1000 m, o que resultou, então, em um deslocamento de 17° no sentido sul à medida que aumenta a profundidade. Cirano *et al.* (2006), identificaram a BiCSE entre 9°S e 15°S no nível da AT, 25°S no nível da ACAS e entre 25°S e 30°S no nível da AIA. Num trabalho mais recente, Veleza *et al.* (2011) posicionaram a bifurcação em 12°S a 100 m de profundidade e 20°S a 500 m.

Ainda em relação à Figura 17, é possível identificar os fluxos meridionais da CB e da SNB/CNB. A SNB apresenta seu núcleo entre 100 e 200 m e aproxima-se da

superfície ao norte de 5°S onde, de acordo com Silveira *et al.* (1994), passa a receber contribuição da CNB. A CB apresenta-se como uma corrente de superfície lenta, aumentando em velocidade e estrutura vertical ao sul de 25°S, onde recebe aporte da CCI, de acordo com Soutelino (2008).

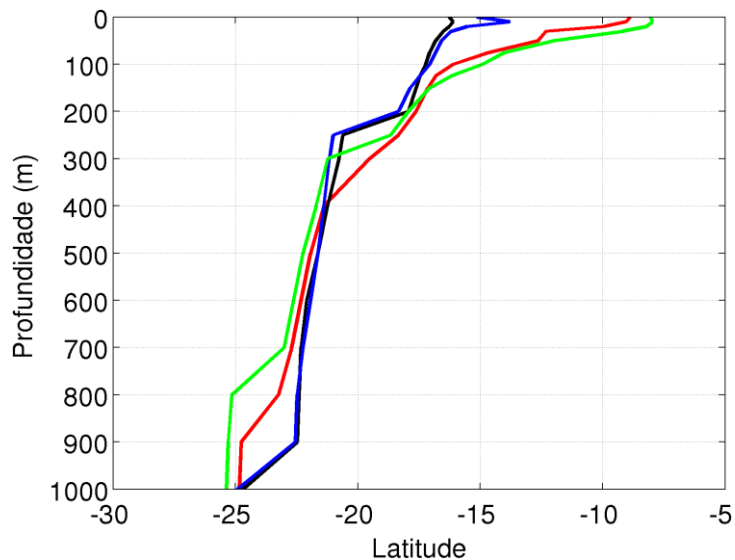


**Figura 18.** Média sazonal da velocidade meridional (m/s) na região ao largo da costa brasileira destacada na Figura 9: verão (a), outono (b), inverno (c) e primavera (d). Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). A linha branca representa velocidade nula e a linha preta tracejada indica a posição estimada da BiCSE.

Sazonalmente, a BiCSE atinge sua posição mais ao norte na superfície durante a primavera (outubro, novembro e dezembro), coincidindo com as mínimas velocidades da SNB/CNB e fluxos mais intensos da CB, como pode ser observado na Figura 18d. Durante o verão (Figura 18a), definido pelos meses de janeiro, fevereiro e março, a região da bifurcação move-se na direção sul e atinge seu limite austral no outono (abril, maio e junho), quando a CB fica mais fraca e o sistema SNB/CNB intensifica-se e aproxima-se da superfície, conforme a Figura 18b. No inverno (Figuras 18c), compreendido nos meses de julho, agosto e setembro, a bifurcação regressa em direção ao Equador.

Analogamente, Silva *et al.* (2009) encontraram a bifurcação mais ao norte na primavera (8°S na superfície e 20°S em 500 m), quando a CB está mais forte e a SNB/CNB mais fraca. Enquanto no outono essa configuração inverte-se, com a BiCSE mais ao sul (13°S na superfície e 24°S em 500 m), a CB mais fraca e a SNB/CNB mais forte.

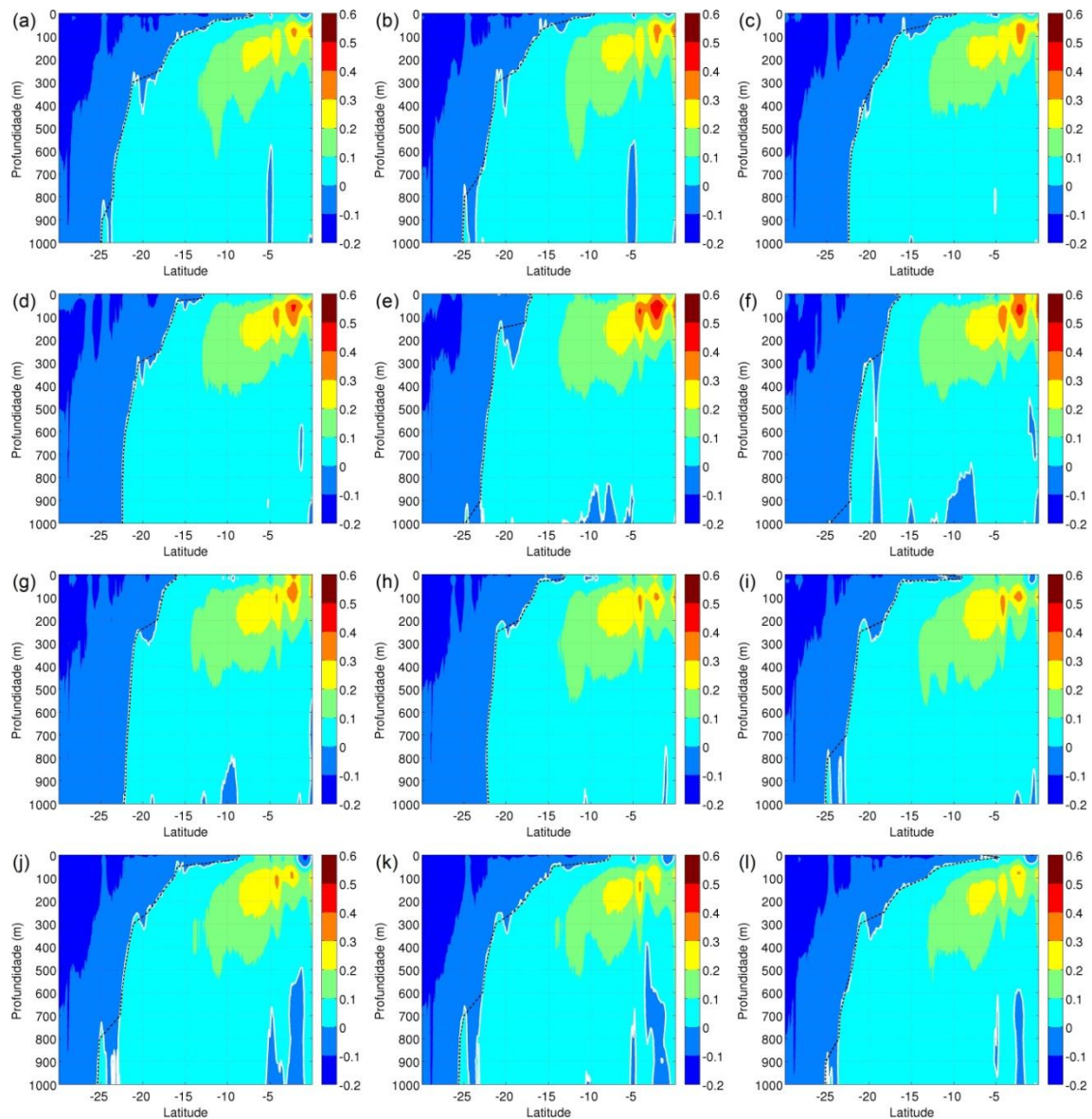
Na Figura 19, verifica-se que a maior parte da variabilidade sazonal da BiCSE encontra-se nos primeiros 200 m de coluna de água (Rodrigues *et al.*, 2007), atingindo, na superfície, 8°S na primavera (linha verde) e cerca de 16°S no outono (linha preta). Entre 200 e 400 m de profundidade, a variabilidade é menor. De 400 a 700 m, sua posição praticamente não varia. E de 700 a 1000 m ela volta a sofrer variação, porém, com um comportamento antagônico ao observado na superfície, com sua posição mais ao sul na primavera (linha verde), quando atinge 26°S, e mais ao norte no outono-inverno (linhas preta e azul), quando chega às imediações de 22,5°S.



**Figura 19.** Perfis verticais sazonais da posição estimada da BiCSE em função da latitude: verão (vermelho), outono (preto), inverno (azul), primavera (verde).

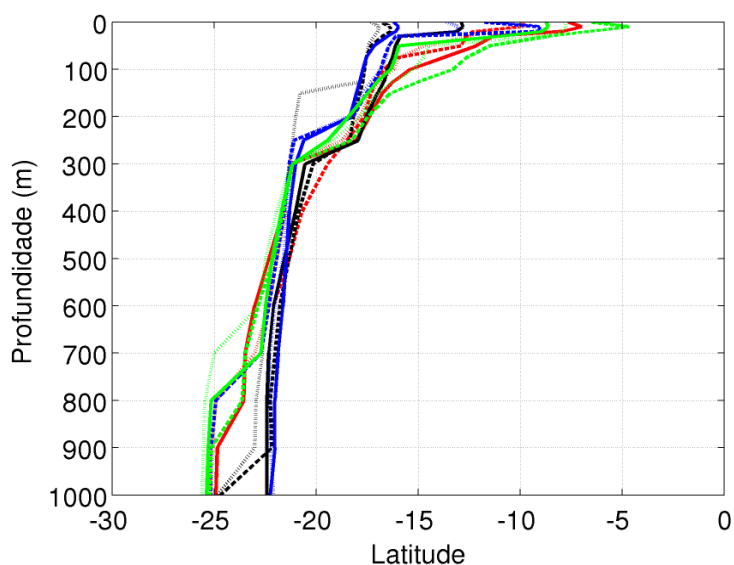
Dentro de uma variabilidade intra-anual, o mês de dezembro (Figura 20i) é aquele no qual a BiCSE atinge sua posição mais ao norte, quando chega a 5°S na superfície. É, justamente nesse mês, que o sistema SNB/CNB atua com menos intensidade, e a CB flui com velocidades maiores que no restante do ano. De janeiro (Figura 20a) a abril (Figura 20d), a bifurcação move-se em direção ao Polo Sul e, durante este período, observa-se que a SNB/CNB sofre aceleração e aproximação da superfície, enquanto a CB perde velocidade. Em maio (Figura 20e), a posição da bifurcação atinge seu limite sul na superfície (17°S), a SNB/CNB apresenta seus maiores valores

de velocidade ao longo do ano e a CB fica lenta e pouco profunda em comparação com os demais meses. Em seguida, a partir do mês de junho (Figura 20f), a BiCSE faz seu regresso em direção ao Equador. Durante esse movimento, a CB volta a intensificar-se, ao passo que o sistema SNB/CNB perde velocidade e afasta-se da superfície do oceano. Em dezembro, a bifurcação chega, novamente, em seu limite norte.



**Figura 20.** Média mensal da velocidade meridional (m/s) na região ao largo da costa brasileira destacada na Figura 9: janeiro (a), fevereiro (b), março (c), abril (d), maio (e), junho (f), julho (g), agosto (h), setembro (i), outubro (j), novembro (k) e dezembro (l). Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul). A linha branca representa velocidade nula e a linha preta tracejada indica a posição estimada da BiCSE.

Esses resultados não coincidem precisamente com o que foi proposto por Rodrigues *et al.* (2007) que caracterizaram a bifurcação ocorrendo mais ao norte em novembro e mais ao sul em julho. Porém, para esses autores, a BiCSE influencia de maneira similar a intensidade da CB e da SNB/CNB. Por outro lado, Veleda *et al.* (2011), com dados de um modelo regional, descreveram um ciclo parecido com o que acaba de ser descrito aqui. Segundo esses autores, em 200 m, a BiCSE encontra sua posição mais austral (19°S) em maio e junho e, em novembro e dezembro, ela encontra sua posição mais ao norte (13°S). O mesmo trabalho confirma ainda a relação da posição da bifurcação com as CCOs.

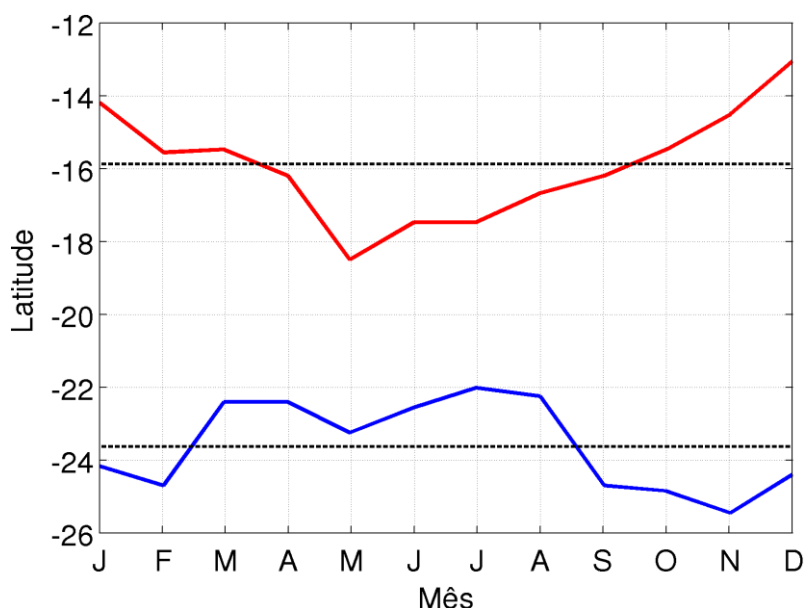


**Figura 21.** Perfis verticais mensais da posição estimada da BiCSE em função da latitude: janeiro (linha vermelha contínua), fevereiro (linha vermelha pontilhada), março (linha vermelha tracejada), abril (linha preta contínua), maio (linha preta pontilhada), junho (linha preta tracejada), julho (linha azul contínua), agosto (linha azul pontilhada), setembro (linha azul tracejada), outubro (linha verde contínua), novembro (linha verde pontilhada) e dezembro (linha verde tracejada).

A Figura 21, onde estão plotados todos os perfis mensais da BiCSE conjuntamente, tem a intenção de mostrar onde se concentra a maior parte de sua variabilidade. Na imagem, é possível perceber que essa variabilidade ocorre, principalmente, nos primeiros 200 m de coluna de água, confirmando as descrições de Rodrigues *et al.* (2007). Nos 500 m seguintes, ocorre pouca variação e, a partir de 700 m, a posição da bifurcação volta a apresentar variação intra-anual, porém, com uma amplitude menor do que aquela verificada na superfície. Sendo assim, avaliou-se o comportamento intra-anual da BiCSE, calculando-se sua posição média entre 0 e 200 m e entre 700 e 1000 m de profundidade, conforme explicitado na Figura 22.



A amplitude da variação da posição da bifurcação é  $7^\circ$  entre a superfície e 100 m (gráfico omitido) e de  $5,5^\circ$  nos primeiros 200 m (linha vermelha da Figura 22), o que corrobora os resultados de Rodrigues *et al.* (2007), que encontraram uma variabilidade de  $7^\circ$  nos primeiros 100 m de coluna de água. O gráfico da Figura 22 mostra apenas um ponto de máximo e um ponto de mínimo entre 0 e 200 m, com a média situando-se próxima a  $16^\circ\text{S}$ , de maneira condizente com a bibliografia (Tabela 2). O ponto de mínimo, referente ao limite sul ( $18,5^\circ\text{S}$ ), ocorre no mês de maio, enquanto o ponto de máximo, referente ao limite norte ( $13^\circ\text{S}$ ), ocorre no mês de dezembro, indicando sua sazonalidade, conforme mostrado também por Veleda *et al.* (2011).



**Figura 22.** Ciclo anual da posição da BICSE entre 0 e 200 m (linha vermelha) e entre 700 e 1000 m (linha azul), além de suas respectivas posições médias (linhas pretas tracejadas).

A linha azul da Figura 22, referente ao intervalo entre 700 e 1000 m, evidencia um comportamento distinto da superfície. Primeiramente, porque o gráfico possui dois pontos de máximo (aproximadamente  $22,5^\circ\text{S}$  e  $22^\circ\text{S}$ , referentes aos limites norte) e dois pontos de mínimo (aproximadamente  $24,5^\circ\text{S}$  e  $25,5^\circ\text{S}$ , referentes aos limites sul) e, além disso, a BICSE posiciona-se mais ao norte nos meses de outono-inverno e mais ao sul nos meses de primavera-verão, num padrão inverso ao da superfície. A amplitude do deslocamento da bifurcação é de  $3,5^\circ$  nesse nível, enquanto Rodrigues *et al.* (2007) descreveram uma amplitude de apenas  $2^\circ$  entre 600 e 1000 m. Por outro lado, esses autores também identificaram que a variabilidade da BICSE no fundo segue um padrão diferente da superfície. A posição média da bifurcação nesse nível é, aproximadamente,  $23,5^\circ\text{S}$  e está de acordo com os valores sugeridos pela literatura, conforme a Tabela 2.

#### 5.4. Seções de Velocidade e Transporte de Volume Meridional

Por último, são expostas seções zonais da média anual da velocidade meridional produzida pelo HYCOM/NCODA desde 2004 até 2011. As seções foram realizadas em 6°S, 10°S, 18°S e 22°S. Além disso, foram avaliados os ciclos anuais médios de transporte de volume dirigidos pelas CCOs (SNB/CNB e CB), entre 0 e 400 m, ao largo da costa brasileira nas referidas latitudes, buscando encontrar uma relação com o ciclo anual médio da BiCSE entre 0 e 200 m. A Tabela 6 traz o coeficiente de correlação entre o transporte de volume dirigido pelas CCOs e a posição da BiCSE. Ela mostra que a correlação é negativa e com um grau elevado em todas as latitudes avaliadas, variando de -0,72, em 6°S, a -0,95, em 10°S.

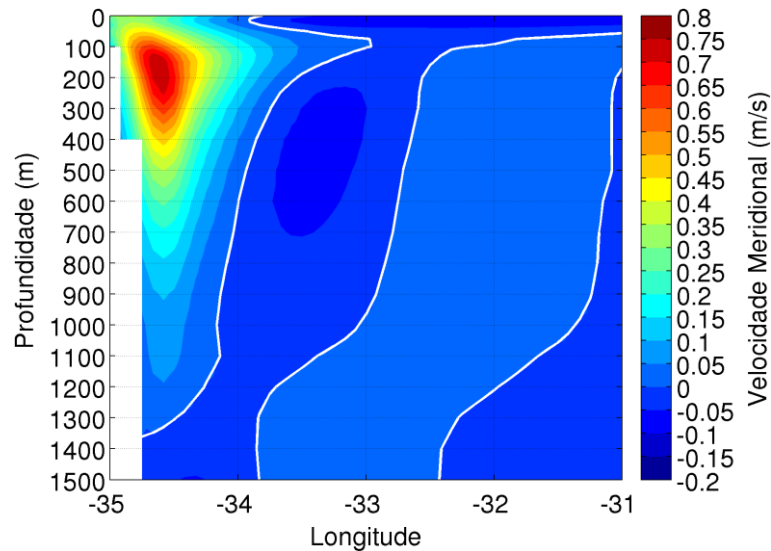
**Tabela 6.** Coeficiente de correlação ( $r$ ) entre o transporte dirigido pelas CCOs (0 - 400 m) e a posição da BiCSE (0 - 200 m). SNB/CNB: 6°S e 10°S; CB: 18°S e 22°S.

	6°S	10°S	18°S	22°S
$r$	-0,72	-0,95	-0.85	-0,90

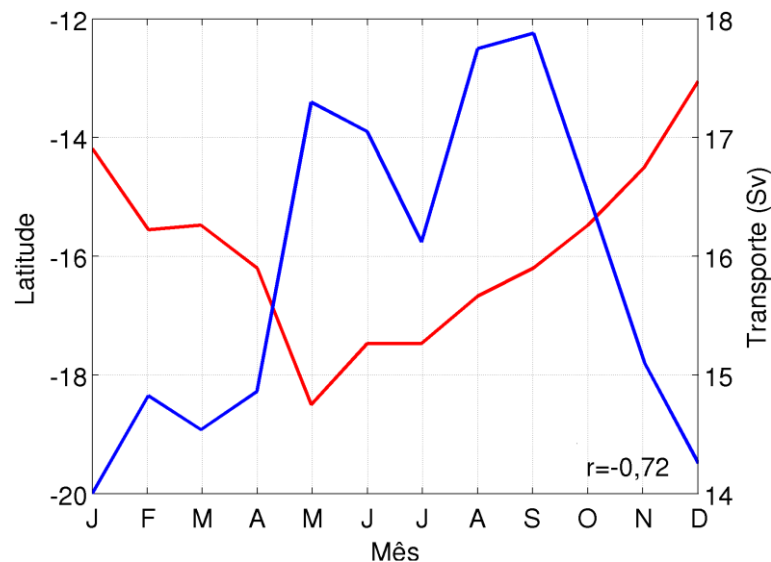
A Figura 23 representa o sistema SNB/CNB em um corte vertical zonal em 6°S. Essa corrente estende-se desde a superfície a mais de 1000 m de profundidade, incluindo, também, a CCI (Schott *et al.*, 2005). Seu núcleo está centrado próximo a 200 m, onde atinge velocidades de quase 0,8 m/s, o que a caracteriza como uma CCO veloz e robusta (Veleda *et al.*, 2011). Stramma (1991) e Silveira *et al.* (1994), em seus trabalhos clássicos, registraram velocidades superiores a 0,9 m/s, entre 100 e 200 m, em 4°S. A leste da SNB/CNB, é possível notar ainda uma contra corrente entre 200 e 700 m, fluindo lentamente na direção sul, coincidente com os resultados de Silva *et al.* (2009). Em 100 m, a SNB/CNB expande-se horizontalmente, o que pode ser verificado, também, nos trabalhos de Silveira *et al.* (1994) e Rodrigues *et al.* (2007).

Avaliando-se o ciclo anual do transporte da SNB/CNB em 6°S (Figura 24), percebe-se que seus fluxos mais intensos ocorrem no outono-inverno, com o máximo de quase 18 Sv em setembro. Um segundo pico ocorre no mês de maio, justamente quando a BiCSE atinge sua posição mais austral na superfície. Quando a bifurcação move-se na direção norte, o volume de água transportada pela SNB/CNB tende a diminuir, atingindo o mínimo de 14 Sv em janeiro. Stramma (1991), a partir de dados obtidos durante uma série de cruzeiros oceanográficos, encontrou resultados semelhantes de transporte de volume (14-18 Sv) ao norte de 10°S, nos 500 m superficiais do oceano. Nesse mesmo nível, Silveira *et al.* (1994) computaram um escoamento coincidente, na ordem de 18,4 Sv entre maio e julho. Entre 0 e 1000 m,

esses últimos autores informam um transporte de 21,6 Sv, mostrando que a maior parte do escoamento concentra-se na superfície, o que se verifica também na Figura 23. Schott *et al.* (2005) registraram um transporte médio de 17,6 Sv ao nível da AT juntamente com a ACAS, Cirano *et al.* (2006) constataram uma média anual de 18 Sv entre 0 e 657 m, e o trabalho de Rodrigues *et al.* (2007) informa 14 Sv nos primeiros 400 m de coluna de água.



**Figura 23.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 6°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul).



**Figura 24.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela SNB/CNB (linha azul) em 6°S (0 - 400 m / 35°W - 34°W), e da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para norte (valores positivos).

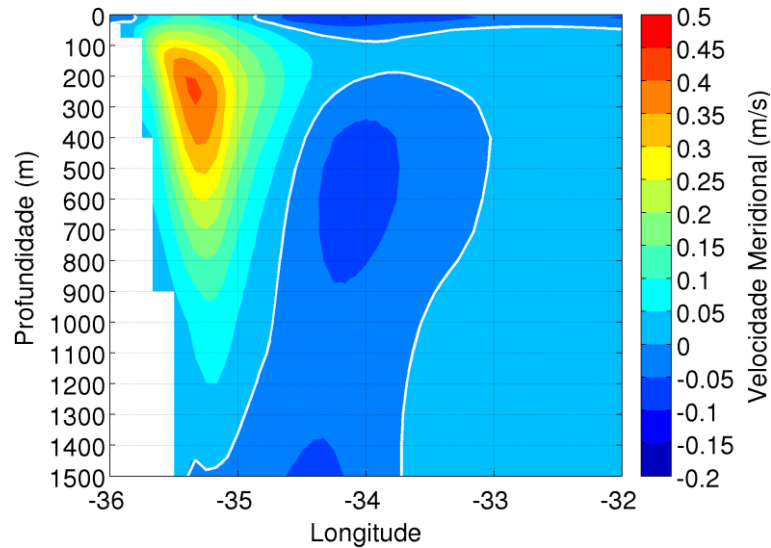
De forma geral, o gráfico da Figura 24 evidencia que, quando a posição da bifurcação está mais ao norte, a SNB/CNB enfraquece-se e, quando a bifurcação está mais ao sul, a SNB/CNB ganha intensidade. Entretanto, além da BiCSE, outros mecanismos parecem influenciar o ciclo da SNB/CNB, já que, principalmente no período outono-inverno, esses dois sistemas têm um comportamento distinto. Uma possível influência é a contribuição da cCSE que se soma a SNB/CNB próximo a essa latitude, conforme propõe Silveira *et al.* (1994).

Observando-se a seção zonal em 10°S (Figura 25), nota-se que o fluxo na direção norte está mais afastado da superfície em comparação a 6°S, constituindo, então, apenas a SNB, cujo núcleo localiza-se entre 200 e 300 m, com velocidades inferiores a 0,5 m/s, sendo, portanto, menos intenso que em 6°S (Silveira *et al.*, 1994). Nessa mesma latitude, Silveira *et al.* (1994) encontraram o núcleo da SNB em 150 m, fluindo a, aproximadamente, 0,5 m/s. Veleda *et al.* (2011), lançando mão de uma série de medições de correntômetros realizadas por mais de 4 anos, além de modelagem numérica, identificaram, em 11°S, um fluxo médio paralelo a costa que se estende da superfície a mais de 1000 m, apresentado seu núcleo próximo a 250 m com velocidades na ordem de 0,5 m/s na direção norte-nordeste. A contra corrente para sul observada em 6°S também é encontrada em 10°S com velocidades parecidas, porém, mais profunda, entre 300 e 900 m (Silveira *et al.*, 1994; Veleda *et al.*, 2011). Silva *et al.* (2009) propõem que esse fluxo na direção sul seja formado a partir da deflexão da cCSE e Veleda *et al.* (2011) sugerem que esse é um mecanismo através do qual se reduz parte do transporte de calor inter-hemisférico.

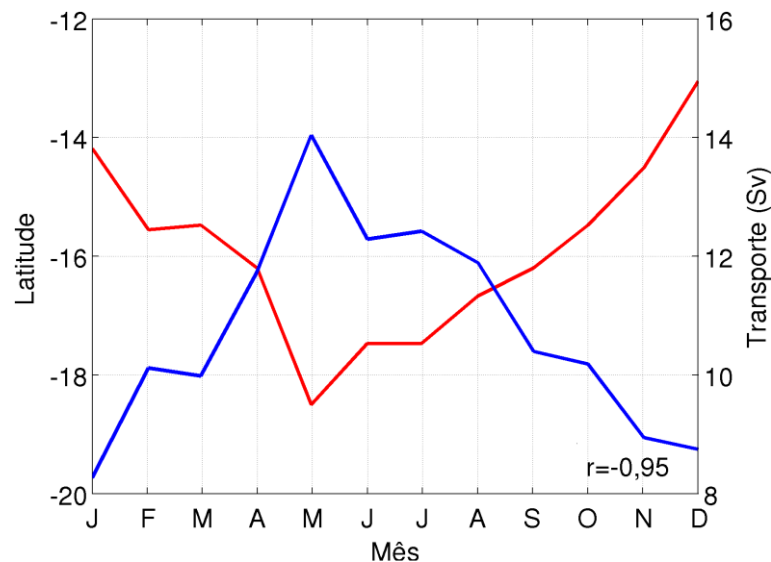
Em maio, quando a bifurcação está mais ao sul (18,5°S), a SNB em 10°S atinge seu máximo de 14 Sv, entre 0 e 400 m (Figura 26). Silveira *et al.* (1994) informam um registro parecido, de 16,2 Sv, entre 0 e 500 m, no mesmo período do ano. Em seguida, a SNB reduz gradativamente sua intensidade, de forma análoga com a qual a BiCSE desloca-se em direção à Linha do Equador, inclusive com um período de estabilização entre junho e julho. Em dezembro e janeiro, a SNB apresenta seu transporte mínimo, inferior a 9 Sv, na mesma época em que a bifurcação encontra-se em sua posição mais setentrional. A partir de então, a SNB volta a aumentar, enquanto a BiCSE regressa em direção ao sul.

Rodrigues *et al.* (2007) descreveram uma variabilidade similar nessa latitude (10°S). Em seu estudo, a SNB entre 0 e 400 m registrou cerca de 11 Sv em maio e 4 Sv em novembro, num ciclo sazonal semelhante ao que acaba de ser apresentado,

apesar do fluxo mínimo haver sido registrado, no presente trabalho, em janeiro. Em 8°S, Silva *et al.* (2009) identificaram a intensidade máxima da SNB em maio e a mínima em dezembro, expressando valores de 11 a 17 Sv entre a superfície e 400 m. Veleda *et al.* (2011) encontraram as máximas velocidades da SNB em julho (0,7 m/s) e as menores em novembro (0,35 m/s), corroborando, de certa forma, os resultados aqui apresentados. Schott *et al.* (2005), avaliando o transporte de volume em 11°S, reportaram um escoamento médio de 14,5 Sv entre a AT e a ACAS.

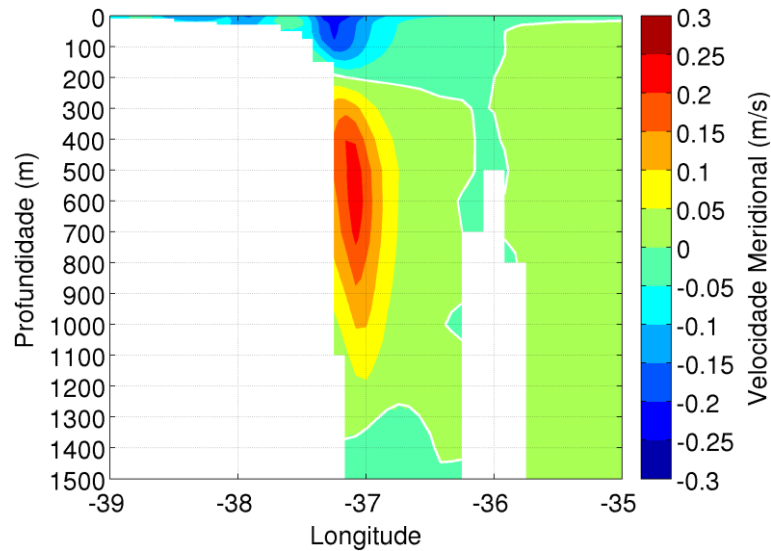


**Figura 25.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 10°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul).

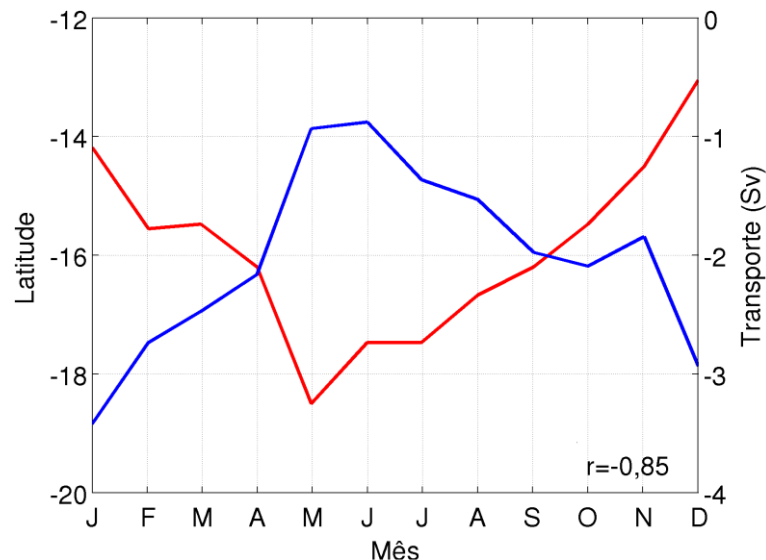


**Figura 26.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela SNB (linha azul) em 10°S (0 - 400 m / 36°W - 34,5°W), e da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para norte (valores positivos).

A relação da BiCSE com a SNB/CNB é muito mais evidente em 10°S (Figura 26) do que em 6°S (Figura 24). Segundo Stramma *et al.* (2003), a maior parte da variabilidade da SNB/CNB em 5°S parece estar relacionada a processos equatoriais, mas não com a variabilidade da BiCSE. Por outro lado, Schott *et al.* (2005) atribuem a variabilidade da SNB em 11°S, em grande parte, à migração sazonal da posição da BiCSE.



**Figura 27.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 18°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul).



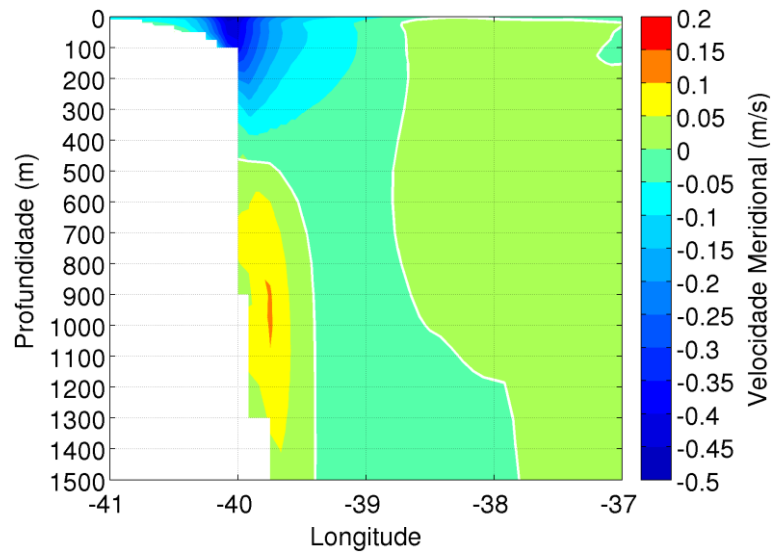
**Figura 28.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela CB (linha azul) em 18°S (0 - 400 m / 39°W - 36,5°W), e da posição da BiCSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para sul (valores negativos).

A seção zonal representada na Figura 27, referente a 18°S, mostra um escoamento em direção ao polo, restrito aos primeiros 200 m de profundidade, e que constitui a CB (Silveira, 2007). A CB é conhecida por ser uma CCO lenta e rasa, fluindo, nessa latitude, a pouco mais 0,2 m/s em seu núcleo na superfície, confirmando os valores registrados por Silva *et al.* (2009). Nessa latitude, ela é bem estreita e exibe algum espalhamento sobre a plataforma continental. Em subsuperfície, há um fluxo estreito para norte, correspondente a CCI, que se estende de 200 a cerca de 1200 m e apresenta velocidades superiores a 0,2 m/s em seu núcleo, entre 400 e 700 m. Na imagem, destacam-se duas importantes feições topográficas: o Monte Submarino Hotspur, em 36°W, e o Banco de Abrolhos a oeste (IBGE, 2011), ao qual é atribuída a instabilidade e, conseqüente, meandramento e desprendimento de vórtices mais ao sul pela CB (Emilsson, 1961).

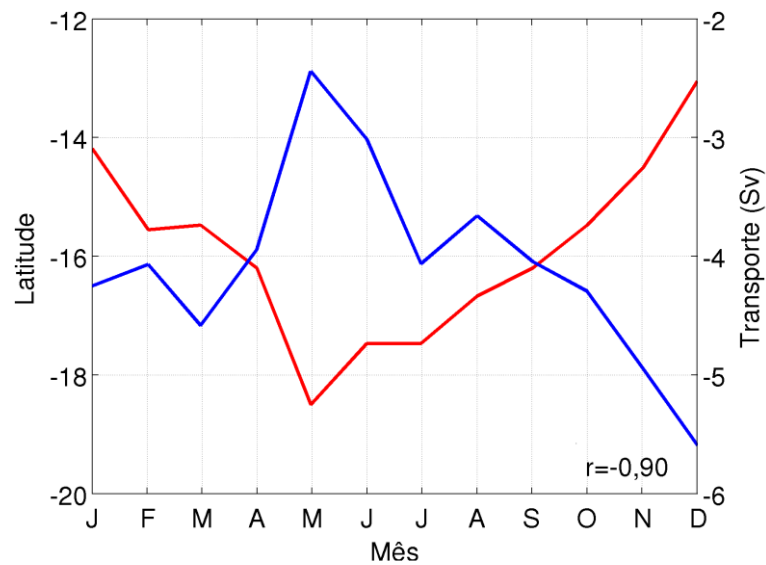
Anualmente, a CB em 18°S também apresenta um comportamento semelhante à BiCSE, conforme verificado na Figura 28. Em maio e junho, a CB transporta pouco menos de 1 Sv para sul e, a partir de então, começa a aumentar, com uma ligeira diminuição em novembro, até atingir mais de 3 Sv em janeiro. Essa variação é coincidente com a excursão que a BiCSE faz na direção norte durante o mesmo período. Entre janeiro e maio, a CB volta a diminuir, conforme a bifurcação afasta-se do Equador. Esses resultados corroboram os valores encontrados por Rodrigues *et al.* (2007) para a CB entre 0 e 400 m, que transporta 2 Sv em julho e 4 Sv em novembro, mostrando ainda um ciclo anual semelhante ao apresentado por este trabalho. Nesse mesmo nível, Silva *et al.* (2009) contabilizam um transporte médio de 2,8 Sv dirigido pela CB em 19°S, com sua máxima intensidade em janeiro e mínima em maio. Silveira (2007), entretanto, destaca que as estimativas de transporte da CB concentram-se nas regiões de Cabo Frio (RJ) e da Confluência Brasil-Malvinas, com poucas aferições para as demais regiões.

Em 22°S (Figura 29), na altura do Cabo de São Tomé, a CB apresenta-se mais regular, aprofunda-se e tem sua velocidade aumentada, atingindo quase 0,5 m/s em seu núcleo na superfície, o que corrobora os valores de 0,55 m/s e 0,5 m/s encontrados por Signorini (1978 *apud* Silveira, 2007), e Evans e Signorini (1985 *apud* Silveira, 2007), respectivamente. Esse resultado também confirma as descrições de Müller *et al.* (1998) que destaca que a CB aumenta em velocidade e espessura vertical à medida que escoar em direção à Convergência Subtropical. Nessa latitude, ela mantém-se dentro de uma região estreita, ao longo da borda da plataforma continental e acima de 400 m (Evans e Signorini, 1985 *apud* Stramma e Schott, 1999; Rodrigues

et al., 2007; Silveira, 2007). Emílsson (1961) ainda descreve que essa corrente atinge sua maior velocidade justamente na quebra da plataforma continental. O mesmo autor afirma que, a partir dessa latitude, o fluxo da CB é mais estável.



**Figura 29.** Média anual da velocidade meridional (m/s). Seção zonal em 22°S. A linha branca representa velocidade nula. Valores positivos (negativos) indicam movimento na direção norte (sul).



**Figura 30.** Ciclo anual do transporte de volume meridional realizado pela CB (linha azul) em 22°S (0 - 400 m / 40,5°W - 39,5°W), e da posição da BICSE entre 0 e 200 m (linha vermelha). O cálculo do transporte leva em consideração apenas os fluxos para sul (valores negativos).

Abaixo de 500 m, ocupando a região do talude ao nível da AIA e de acordo com Silveira (2007), verifica-se um fluxo lento na direção norte, referente à CCI, que não ultrapassa 0,1 m/s e mostra-se mais fraco do que em 18°S. Segundo esse autor,



ocorre uma inversão no sentido das correntes em 450 m, exatamente como na Figura 29. E, além disso, revisando alguns registros pretéritos, ele encontrou valores máximos de velocidade da CCI entre 0,17 e 0,3 m/s na direção nordeste. Os resultados do próprio autor indicam o núcleo da CCI ocorrendo entre 800 e 1000 m, conforme também se verifica no presente estudo.

Emílsson (1961) reporta que a CB apresenta-se mais fraca e irregular no inverno, e, durante o verão, ela fica mais rápida, podendo atingir mais de 0,4 m/s. Além disso, Silveira (2007), numa revisão da literatura, compila valores de transportes de volume total entre 2 e 10 Sv, no intervalo de 0 a 600 m, próximo a 22°S. O resultado obtido pelo próprio autor é de  $5,6 \pm 1,4$  Sv entre 0 e 450 m. Essa variabilidade é observada na Figura 30, onde a CB tem seu transporte mínimo (2,5 Sv) em maio e máximo (5,5 Sv) em dezembro, de forma a coincidir com a posição mais austral e mais boreal da BiCSE, respectivamente. A partir de maio, a CB aumenta enquanto a bifurcação move-se para norte e, a partir de dezembro, ocorre a situação inversa, a CB diminui enquanto a bifurcação desloca-se para sul. Rodrigues *et al.* (2007) encontrou um transporte médio de 6 Sv realizado pela CB entre a superfície e 400 m.

No entanto, o ciclo desses dois sistemas (CB e BiCSE) não são tão parecidos quanto em 18°S, já que o transporte de volume da CB, em 22°S, oscila em março e agosto, provavelmente sob influência, também, de outros sistemas oceanográficos mais distantes da região da BiCSE. Silveira *et al.* (2000) descrevem que, a partir de 22°S, a CB inicia seu meandramento e formação de vórtices devido a uma brusca mudança na orientação da linha de costa. Ao se dirigir para água mais profunda, afastando-se da plataforma continental, espera-se que a CB comece a meandar devido ao princípio de conservação da vorticidade.

## 6. CONCLUSÕES

Com base em saídas do sistema HYCOM/NCODA de 2004 a 2011, o presente trabalho buscou descrever a variabilidade sazonal da BiCSE e sua relação com o sistema de CCOs ao largo da costa brasileira, enfatizando os transportes de volume da CB e da SNB/CNB. Adicionalmente, com a finalidade de avaliar a qualidade das estimativas do HYCOM/NCODA, comparou-se sua estrutura termohalina com a climatologia produzida pelas análises objetivas do WOA09. Compararam-se também os campos médios mensais de correntes superficiais do HYCOM/NCODA com aqueles gerados pelo OSCAR de 2004 a 2011.

De uma forma geral e a grosso modo, a campos termohalinos fornecidos pelo HYCOM/NCODA em 0, 100, 400, 800 e 1400 m mostraram-se coerentes com os valores previstos pelo WOA09 e pela literatura, de maneira que o HYCOM/NCODA reproduziu os limites termohalinos esperados para as massas de água que compõem a região de estudo (AT, ACAS, AIA e APAN). Calculou-se a REQM do ciclo anual médio do HYCOM/NCODA em relação à climatologia mensal do WOA09. A maior parte do erro foi encontrada próxima à superfície do oceano, diminuindo com o aumento da profundidade. Os erros de temperatura mostraram-se maiores que os erros de salinidade, variando de  $0,16 \pm 0,08^\circ\text{C}$  em 1400m, ao nível da APAN, a  $1,10 \pm 0,69^\circ\text{C}$  em 100 m, ao nível da AT. A REQM da salinidade variou de  $0,04 \pm 0,02$  ups em 1400 m, ao nível da APAN, a  $0,30 \pm 0,54$  ups na superfície, ao nível da AT.

Grande parte dos erros termohalinos foi verificada na região sudoeste-sul do domínio, estando possivelmente relacionada à intensa dinâmica na região da Confluência Brasil-Malvinas. Parte do erro esteve associada também com a região noroeste do domínio, principalmente próximo à superfície, na pluma do Rio Amazonas. Cirano *et al.* (2006) postulam que os erros observados devem-se à incapacidade do modelo em reproduzir feições de mesoescala devido à sua insuficiente resolução espacial. Parte do erro também pode justificar-se devido à diferença das séries do HYCOM/NCODA, de 2004 a 2011, e do WOA09, que inclui observações de temperatura e salinidade desde 1955.

O cálculo da REQM da velocidade zonal e meridional do HYCOM/NCODA na superfície em relação ao OSCAR mostrou uma importante discrepância entre essas duas fontes, principalmente na região equatorial e no domínio das CCOs. Tais erros são atribuídos, primeiramente, às imperfeições dos modelos como, por exemplo, em suas parametrizações físicas empregadas nas equações primitivas e resoluções

espacial e temporal (Chassignet *et al.*, 2006; Cummings *et al.*, 2009). No caso do OSCAR, uma fonte de erros está relacionada às limitações que os sensores (altímetros, escaterômetros e sensores infravermelhos) embarcados em satélites apresentam ao estimar o estado do oceano em sua superfície. Nesse sentido, é importante salientar que variáveis obtidas através de sensoriamento remoto, como ASM, TSM e VSM, são parâmetros utilizados pelo OSCAR para diagnosticar a circulação na superfície do oceano. Dessa forma, erros nas estimativas dos satélites conduzem, fatalmente, a um prognóstico errôneo das correntes superficiais. Contudo, esse sistema representa uma importante ferramenta no sentido de fornecer uma visão da circulação superficial do oceano, por isso, constantes melhorias devem ser desenvolvidas, implementadas e sistematicamente avaliadas.

Os campos médios de velocidade horizontal do HYCOM/NCODA em diversos níveis forneceram uma primeira impressão sobre o posicionamento da BiCSE e sua dependência com a profundidade. Visualmente, esses campos indicaram a bifurcação em 13°S na superfície, 16°S em 100 m, 18°S em 200 m, 22°S em 400 m e 23°S em 800 m. Além disso, esse sistema foi eficiente em representar as CCOs (CB e SNB/CNB) e correntes equatoriais como a sCSE em superfície e o núcleo da SE em 100 m. Em 1400 m, verificou-se um escoamento único e bem definido na direção sul, correspondente à CCP que transporta a APAN.

Neste trabalho, a BiCSE foi estudada a partir de saídas do HYCOM/NCODA, principalmente com base em uma seção de velocidade meridional ao largo da costa brasileira com largura de 2° longitudinais. A posição da bifurcação foi definida como sendo a latitude na qual a velocidade meridional é nula. Avaliando a média anual, novamente se observou a migração da bifurcação em direção ao sul à medida que se avança em profundidade. Na superfície, a BiCSE foi encontrada em 10°S, atingindo 25°S em 1000 m, o que evidenciou um achatamento de 15° no domínio norte do GSAS. Esse achatamento mostrou-se mais abrupto próximo a superfície, entre 0 e 300 m (11°), com variação bem suave entre 300 e 800 m (2°), e com uma variação pequena entre 800 e 1000 m (2°). Tais resultados mostraram-se em concordância com a literatura pertinente (Tabela 2).

Num ciclo sazonal, a BiCSE posicionou-se, na superfície, mais ao norte na primavera e mais ao sul no outono. A excursão que a bifurcação realiza durante os meses de verão e inverno reflete-se nos transportes das CCOs, de maneira que posições mais austrais da BiCSE implicam em menores intensidades da CB e maiores

intensidades da SNB/CNB, enquanto posições da BiCSE mais ao norte implicam na situação inversa, ou seja, fluxos mais intensos da CB e menos intensos no caso da SNB/CNB.

Em relação a seu ciclo anual médio, a BiCSE demonstrou maior variabilidade em duas faixas de profundidade: entre 0 e 200 m, e entre 700 e 1000 m. Entretanto, o comportamento da bifurcação mostrou-se de maneiras distintas nesses dois níveis. Entre 0 e 200 m, a amplitude da migração da BiCSE foi de  $5,5^\circ$ , posicionando-se mais ao norte ( $13^\circ\text{S}$ ) em dezembro e mais ao sul ( $18,5^\circ\text{S}$ ) em maio, com sua posição média em  $16^\circ\text{S}$ . Entre 700 e 1000 m, a BiCSE apresentou uma variabilidade sazonal inversa àquela observada na superfície. Sua amplitude foi de  $3,5^\circ$ , encontrando-se mais ao norte ( $\sim 22,5^\circ\text{S}$ ) nos meses de outono-inverno e mais ao sul ( $\sim 25^\circ\text{S}$ ) nos meses de primavera-verão. A posição média nesse nível foi, aproximadamente,  $23,5^\circ\text{S}$ .

Por fim, com base em resultados do HYCOM/NCODA de 2004 a 2011, comparou-se a variabilidade da BiCSE entre 0 e 200 m com os transportes de volume dirigidos, através de seções zonais, pela SNB/CNB ( $6^\circ\text{S}$  e  $10^\circ\text{S}$ ) e pela CB ( $18^\circ\text{S}$  e  $22^\circ\text{S}$ ) entre 0 e 400 m. O coeficiente de correlação calculado entre a BiCSE e as CCOs mostrou forte correlação negativa em todas as seções zonais avaliadas, variando de  $-0,72$ , em  $6^\circ\text{S}$ , a  $-0,95$ , em  $10^\circ\text{S}$ . Os resultados confirmaram a literatura e mostraram que, quando a BiCSE posiciona-se mais ao sul, a intensidade da CB diminui enquanto a SNB/CNB aumenta, e, quando a BiCSE encontra-se mais ao norte, a CB fica mais forte enquanto a SNB/CNB enfraquece-se. Adicionalmente, foi possível perceber que, quanto mais próximas as CCOs estiverem da região da bifurcação, maior será sua relação com a variabilidade da BiCSE. Em regiões mais afastadas da bifurcação, outros sistemas oceanográficos parecem, também, exercer influência na variabilidade das CCOs.

Levando-se em consideração a utilização das análises do HYCOM/NCODA, o presente trabalho ofereceu uma avaliação da variabilidade sazonal da BiCSE e de sua relação com o transporte das CCOs que não foi realizada anteriormente por nenhum autor. Essas análises tendem a representar a realidade mais acuradamente que os modelos em rodadas livres e, portanto, podem constituir um estudo diagnóstico mais preciso que os realizados anteriormente.

Como etapas futuras deste trabalho, sugere-se a investigação da variabilidade interanual da BiCSE associada aos transportes meridionais das CCOs e ainda um estudo sobre a contribuição da variabilidade atmosférica à variabilidade da BiCSE.

Tendo em vista a advecção de águas quentes tropicais realizada pelas CCOs ao largo da costa do Brasil, pode haver uma grande influência da variabilidade da BiCSE sobre a precipitação e o clima das regiões Nordeste e Sudeste, devido à importância da evaporação oceânica na convecção profunda da atmosfera. Portanto, outro aspecto que pode ser explorado futuramente, seguindo o presente trabalho, é a variabilidade climática nas escalas sazonal a interanual e, ainda, cenários de mudança climática.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, F. N. **A dinâmica sazonal da Plataforma Continental Leste Brasileira entre 10°S e 16°S**. Tese de Doutorado. Instituto Oceanográfico (IO), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo (SP), 2011, 165 p.

ANTONOV, J. I.; SEIDOV, D.; BOYER, T. P.; LOCARNINI, R. A.; MISHONOV, A. V.; GARCIA, H. E.; BARANOVA, O. K.; ZWENG, M. M.; JOHNSON, D. R. **World Ocean Atlas 2009, Volume 2: Salinity**. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 2010, 184 p.

BIGG, G. R.; JICKELLS, T. D.; LISS, P. S.; OSBORN, T. J. The role of the oceans in climate. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 10, p. 1127-1159, 2003.

BLECK, R. An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. **Ocean Modelling**, v. 4, n. 1, p. 55-88, 2002.

BOEBEL, O.; DAVIS, R. E.; OLLITRAULT, M.; PETERSON, R. G.; RICHARDSON, P. L.; SCHMID, C.; ZENK, W. The intermediate depth circulation of the western South Atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 21, p. 3329-3332, 1999.

BONJEAN, F.; LAGERLOEF, G. S. E. Diagnostic model and analysis of the surface currents in the tropical Pacific Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 32, n.10, p. 2938-2954, 2002.

BOURLÈS, B.; LUMPKIN, R.; MCPHADEN, M. J.; HERNANDEZ, F.; NOBRE, P.; CAMPOS, E.; YU, L.; PLANTON, S.; BUSALACCHI, A.; MOURA, A. D.; SERVAIN, J.; TROTTE, J. The PIRATA Program: History, accomplishments, and future directions. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 89, n. 8, p. 1111-1125, 2008.

CHASSIGNET, E. P.; HURLBURT, H. E.; METZGER, E. J.; SMEDSTAD, O. M.; CUMMINGS, J. A.; HALLIWELL, G. R.; BLECK, R.; BARAILLE, R.; WALLCRAFT, A. J.; LOZANO, C.; TOLMAN, H. L.; SRINIVASAN, A.; HANKIN, S.; CORNILLON, P.; WEISBERG, R.; BARTH, A.; HE, R.; WERNER, F.; WILKIN, J. US GODAE: Global ocean prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). **Oceanography**, v. 22, n. 2, p. 64-75, 2009.

CHASSIGNET, E. P.; HURLBURT, H. E.; SMEDSTAD, O. M.; HALLIWELL, G. R.; HOGAN, P. J.; WALLCRAFT, A. J.; BARAILLE, R.; BLECK, R. The HYCOM (HYbrid

Coordinate Ocean Model) data assimilative system. **Journal of Marine Systems**, v. 65, n. 1-4, p. 60-83, 2007.

CHASSIGNET, E. P.; HURLBURT, H. E.; SMEDSTAD, O. M.; HALLIWELL, G. R.; WALLCRAFT, A. J.; METZGER, E. J.; BLANTON, B. O.; LOZANO, C.; RAO, D. B.; HOGAN, P. J.; SRINIVASAN, A. Generalized vertical coordinates for eddy-resolving global and coastal ocean forecasts. **Oceanography**, v. 19, n. 1, p. 20-31, 2006.

CIRANO, M.; MATA, M. M.; CAMPOS, E. J. D.; DEIRÓ, N. F. R. A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação global OCCAM. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 2, p. 209-230, 2006.

CUMMINGS, J.; BERTINO, L.; BRASSEUR, P.; FUKUMORI, I.; KAMACHI, M.; MARTIN, M. J.; MOGENSEN, K.; OKE, P.; TESTUT, C. E.; VERRON, J.; WEAVER, A. Ocean data assimilation systems for GODAE. **Oceanography**, v. 22, n. 3, p. 96-109, 2009.

DENGLER, M.; SCHOTT, F. A.; EDEN, C.; BRANDT, P.; FISCHER, J.; ZANTOPP, R. J. Break-up of the Atlantic deep western boundary current into eddies at 8°S. **Nature**, v. 432, p. 1018-1020, 2004.

DOHAN, K.; BONJEAN, F.; CENTURIONI, L.; CRONIN, M.; LAGERLOEF, G.; LEE, D. K.; LUMPKIN, R.; MAXIMENKO, N. A.; NIILER, P. P.; UCHIDA, H. Measuring the global ocean surface circulation with satellite and in situ observations. In: Proceedings of OceanObs'09: Sustained Ocean Observations and Information for Society (Vol. 2), 2009, Venice, Italy.

DOMBROWSKY, E.; BERTINO, L.; BRASSINGTON, G. B.; CHASSIGNET, E. P.; DAVIDSON, F.; HURLBURT, H. E.; KAMACHI, M.; LEE, T.; MARTIN, M. J.; MEI, S.; TONANI, M. GODAE systems in operation. **Oceanography**, v. 22, n. 3, p. 80-95, 2009.

EMÍLSSON, I. The shelf and coastal waters off Southern Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 11, n. 2, p. 101-112, 1961.

GANACHAUD, A. Large-scale mass transports, water mass formation, and diffusivities estimated from World Ocean Circulation Experiment (WOCE) hydrographic data. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C7, DOI:10.1029/2002JC001565, 2003.

HARPER, S. 2000. Thermocline ventilation and pathways of tropical–subtropical water mass exchange. **Tellus**, v. 52, n. 3, p. 330–345, 2000.

HOPELEWSKI, C. F.; HALPERT, M. S. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. **Monthly Weather Review**, v. 115, n. 8, p. 1606-1626, 1987.

HYBRID COORDINATE OCEAN MODEL (HYCOM). Data Server. National Ocean Partnership Program (NOPP). Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil**. Rio de Janeiro (RJ), 2011. 176 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report - Changes to the Underlying Scientific/Technical Assessment**. Geneva, Switzerland, 2013.

LOCARNINI, R. A.; MISHONOV, A. V.; ANTONOV, J. I.; BOYER, T. P.; GARCIA, H. E.; BARANOVA, O. K.; ZWENG, M. M.; JOHNSON, D. R. **World Ocean Atlas 2009, Volume 1: Temperature**. Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 2010. 184 p.

LUMPKIN, R.; SPEER, K. Large-scale vertical and horizontal circulation in the North Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 33, n. 9, p. 1902-1920, 2003.

MALANOTTE-RIZZOLI, P.; HEDSTROM, K.; ARANGO, H.; HAIDVOGEL, D. B. Water mass pathways between the subtropical and tropical ocean in a climatological simulation of the North Atlantic ocean circulation. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 32, n. 3, p. 331–371, 2000.

MARKS, K. M.; SMITH, W. H. F. Not all bathymetry grids are created equal. **Marine Geophysical Researches**, 2004. 25 p.



MOMIN, I. M.; MITRA, A. K.; MAHAPATRA, D. K.; RAJAGOPAL, E. N.; HARENDUPRAKASH, L. Indian Ocean simulation results from NEMO global ocean model. **Indian Journal of Geo-Marine Sciences**, v. 42, n. 4, p. 425-430, 2013.

MOURA, R. G.; HERDIES, D. L.; MENDES, D.; MENDES, M. C. D. Avaliação do modelo regional ETA utilizando as análises do CPTEC e NCEP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 46-53, 2010.

MÜLLER, T. J.; IKEDA, Y.; ZANGENBERG, N.; NONATO, L. V. Direct measurements of western boundary currents off Brazil between 20°S and 28°S. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. C3, p. 5429-5437, 1998.

NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. **Introdução à Geologia Marinha**. Rio de Janeiro (RJ): Editora Interciência, 2004. 279 p.

OCEAN SURFACE CURRENT ANALYSES REAL-TIME (OSCAR). Earth & Space Research (ESR). Physical Oceanography Distributed Active Archive Centre (PO.DAAC). Jet Propulsion Laboratory. National Aeronautics and Space Administration (NASA).

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (PBMC). **Base Científica das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo**. Brasília (DF), 2013. 24 p.

ROBINSON, I. S. **Discovering the Ocean from Space: The unique applications of satellite oceanography**. Berlin: Springer; Chichester, UK: Praxis, 2010. 638 p.

RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M.; WIMBUSH, M. Seasonal variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study. **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, p. 16-30, 2007.

RUGGIERO, G. A. **Estudo numérico do efeito da pluma do Rio Amazonas na dinâmica da porção oeste do Oceano Atlântico Equatorial**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande (RS), 2008, 99 p.

SCHOTT, F. A.; DENGLER, M.; ZANTOPP, R.; STRAMMA, L.; FISCHER, J.; BRANDT, P. The shallow and deep western boundary circulation of the South Atlantic at 5°-11°S. **Journal of Physical Oceanography**, v.35, n. 11, p. 2031-2053, 2005.

SERVAIN, J.; CLAUZET, G.; WAINER, I. C. Modes of tropical Atlantic climate variability observed by PIRATA. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 5, DOI: 10.1029/2002GL015124, 2003.

SIKHAKOLLI, R.; SHARMA, R.; BASU, S.; GOHIL, B. S.; SARKAR, A.; PRASAD, K. V. S. R. Evaluation of OSCAR ocean surface current product in the tropical Indian Ocean using in situ data. **Journal of Earth System Science**, v. 122, n. 1, p. 187-199, 2013.

DA SILVA, A. C.; SANTOS, M. L. S.; ARAUJO, M. C.; BOURLÈS, B. Observações hidrológicas e resultados de modelagem no espalhamento sazonal e espacial da pluma de água Amazônica. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 2, p. 361-370, 2009.

SILVA, M.; ARAUJO, M.; SERVAIN, J.; PENVEN, P.; LENTINI, C. A. D. High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic. **Ocean Modelling**, v. 30, n. 4, p. 256–269, 2009.

SILVEIRA, I. C. A. **O Sistema Corrente do Brasil na Bacia de Campos, RJ**. Tese de Livre Docência. Instituto Oceanográfico (IO), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo (SP), 2007, 160 p.

SILVEIRA, I. C. A.; MIRANDA, L. B.; BROWN, W. S. On the origins of the North Brazil Current. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C11, p. 22501-22512, 1994.

SILVEIRA, I. C. A.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171-183, 2000.

SOUTELINO, R. G. **A origem da Corrente do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico (IO), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo (SP), 2008, 101 p.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. Pedro Consentino, tradutor. 3ª ed. São Paulo (SP): Pearson Makron Books, 1993. 643 p.

STRAMMA, L. Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. **Journal of Marine Research**, v. 49, n. 2, p. 281-294, 1991.

STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C9, p. 20863-20883, 1999.

STRAMMA, L.; FISCHER, J.; BRANDT, P.; SCHOTT, F. Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic. **Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean**, Elsevier Oceanography Series, v. 68, p. 1-22, 2003.

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. **Deep-Sea Research**, v. 46, p. 279-303, 1999.

TALLEY, L. D. Shallow, intermediate, and deep overturning components of the global heat budget. **Journal of Physical Oceanography**, v. 33, p. 530-560, 2003.

TOMCZAK, M.; GODFREY, J. S. **Regional Oceanography: An Introduction**. Oxford: Pergamon, 1994. 422 p.

VELEDA, D. R. A.; ARAUJO, M.; SILVA, M.; MONTAGNE, R.; ARAÚJO, R. Seasonal and interannual variability of the southern South Equatorial Current Bifurcation and meridional transport along the eastern Brazilian edge. **Tropical Oceanography**, v. 39, n. 1, p. 27-59, 2011.

WIENDERS, N.; ARHAN, M.; MERCIER, H. Circulation at the western boundary of the South and Equatorial Atlantic: Exchanges with the ocean interior. **Journal of Marine Research**, v. 58, n. 6, p. 1007–1039, 2000.

WORLD OCEAN ATLAS 2009 (WOA09). Ocean Climate Laboratory (OCL). National Oceanographic Data Center (NODC). National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).