

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA

FERNANDO MATTOS SANTANA BATISTA

**Estudo do escoamento baroclínico do sistema de
correntes de contorno ao longo da costa nordeste
brasileira.**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do
Instituto de Geociências da Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, como requisito final para obtenção do
grau de Bacharel em Oceanografia.

ORIENTADOR:

PROF. DR. ILSON CARLOS ALMEIDA DA SILVEIRA

RIO DE JANEIRO,

Junho de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA

Batista, F.M.S.

ESTUDO DO ESCOAMENTO BAROCLÍNICO DO SISTEMA DE CORRENTES DE
CONTORNO AO LONGO DA COSTA NORDESTE BRASILEIRA

Rio de Janeiro, RJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, Centro de
Tecnologia e Ciências, Instituto de Geociências, Departamento de Oceanografia e
Hidrologia, 2006.

Monografia: Bacharelado em Oceanografia.

Palavras-chave: Atlântico Sul Tropical, Subcorrente Norte do Brasil, circulação.

Fernando Mattos Santana Batista

Estudo do escoamento baroclínico do sistema de correntes de contorno ao longo da costa nordeste brasileira.

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, como requisito final para obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia.

APROVADO EM 19/06/2006, PELA BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira da Silva

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Oceanografia

M.Sc. Alexandre Luiz Coelho

Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação,
Departamento de Instrução

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus pais e avós pela educação que me deram, pelo incentivo a estudar oceanografia, pelo apoio, carinho e amor, sem os quais não poderia estar agora aqui escrevendo.

Agradeço muito também ao Prof. Ilson, meu orientador, por ter me aceitado como orientando, me orientado da melhor forma possível, apesar das dificuldades, e por ter me apoiado nas minhas decisões quando foi preciso.

Agradeço às Meninas do Rio (Rafael, Diogo e Paulo) por toda a ajuda dada, ensinamentos que recebi como de um professor, e momentos de conversa e risos, que me faziam esquecer a saudade do Rio. Também agradeço ao HeyJow pela grande ajuda com programação, à Sueli pela receptividade e ajuda, e a todos do laboratório, que de uma forma ou outra sempre me ajudaram.

Não posso deixar de lembrar do meu caro professor e amigo Luis Carlos, que me recebeu na oceanografia como um pai, confiou em meu potencial, foi responsável por grande parte dos meus estágios, e por fim lutou comigo para que pudesse me formar no tempo necessário, sempre brincalhão.

Agradeço também a todos os professores do Departamento de Oceanografia da UERJ, em especial à professora Sílvia, com a qual nunca tive aula mas que me ajudou muito quando precisei, ao professor Kurtz, pelas ótimas aulas de campo e pelo profissionalismo ensinado, e ao professor José Lailson, pelo rigor científico que sempre nos exigiu e que tentarei seguir em toda a minha vida profissional.

Agradeço ao meu irmão, pentelho, porém companheiro e amigo, sempre divertindo a casa e me tirando do sério. Ao Dedé, melhor amigo, de infância, banda e surf, pelos bons papos, momentos de confiança, a quem considero um irmão.

Quero agradecer muito aos amigos que fiz durante o curso, principalmente ao pessoal da panela Rodrigo, Érika e Bete, eternos amigos e companheiros de pizza, à magrela Fernanda Aparecida, à Margarida, ao Rafael homem de Deus, à Bia e ao Saulo e à todos que tenho muito carinho. Ao Daniel, por mostrar que nada é impossível, e me inspirar nesta reta final.

Por fim tenho muito a agradecer à Soyla, companheira de estudo, amiga e, sobretudo,

namorada, pelos incentivos, puxões de orelha, companhia e amor a mim dedicado, por fazer de mim uma pessoa melhor e mais feliz. Também te amo!

Ah, um muito obrigado a todos que esqueci de agradecer, e que devem ser muitos, pois, como quem já me conhece sabe, sou muito esquecido...

Atenciosamente

Fernando

Abstract

The western Tropical South Atlantic is a dynamically rich region, and is an important key for the interhemispheric mass and heat exchange. Because of this, it is important to understand the oceanic circulation of this portion of the ocean. Then, CTD data, from *Comissão Oceano Nordeste II*, executed by Brazilian Navy's N.Oc Antares, was processed to investigate the North Brazil Undercurrent (NBUC) baroclinic flow, as the generation sites of South Equatorial Undercurrent (SEUC) and South Equatorial Countercurrent (SECC). The NBUC was observed in all the studied area. from 10°S to 4°30'S. Indications of the feed of NBUC by the Intermediate Boundary Current was found. Along its flow through the study area, the NBUC turns into a shallower and broader current, increasing volume in over-pycnoclinic deeps, and losing in under-pycnoclinic deeps. NBUC transport was estimated as 17,9 Sv in 10°S latitude and 21,3 Sv em 5°S. An apparent convergence was observed east of 34°W between 8° 15'S and 7°S, which was concluded to be the clockwise and the counterclockwise turns of the south and central branches of the South Equatorial Current, respectively, that originates the SECC. In the northeastern part of the studied area, the SEUC was found underpycnoclinally, and so indications of its feed by the SNB. Finishing, some border vortices was found near the shelf break.

Resumo

A margem ocidental do Oceano Atlântico Sul Tropical é dinamicamente rica, e é uma importante chave para a troca inter-hemisférica de massa e calor. Por isso é importante entender a circulação desta parte do oceano. Desse modo então, este trabalho utilizou dados de CTD da Comissão Oceano Nordeste II, do N.Oc. Antares, da Marinha do Brasil, para investigar o escoamento baroclínico da Sub-corrente Norte do Brasil (SNB), bem como os sítios de geração da Contra-corrente Sul Equatorial e da Sub-corrente Sul Equatorial. A SNB foi amostrada em toda a extensão da área de estudo, de 10°S à 4°30'S. Foram encontrados indícios de que a Corrente de Contorno Intermediária alimente a SNB ao sul de 10°S. Ao longo de sua passagem pela área de estudo, a SNB se torna progressivamente mais rasa e larga, sofrendo um incremento de volume nas profundidades supra-picnoclínicas e redução profundidades sub-picnoclínicas. Seu transporte de volume foi estimado em 17,9 Sv em 10°S e 21,3 Sv em 5°S. Observou-se também uma aparente convergência, sobretudo nos níveis superficiais, à leste de 34°W entre 8° 15'S e 7°S, que se concluiu ser na verdade a formação da CCSE, originada então da junção de uma volta horária da sCSE com um volta anti-horária da cCSE, ao se virarem para leste. No limite nordeste da área de estudo foi encontrada, em profundidades sub-picnoclínicas, a Sub-corrente Sul Equatorial (SSE), bem como indícios da alimentação desta pela SNB. Por fim, próximo à quebra da plataforma, foram encontrados vórtices de borda em algumas radiais hidrográficas, com assinatura presente no campo de densidades.

Lista de Figuras

Lista de Figuras

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Representação esquemática da circulação do oceano Atlântico Tropical. (modificado de <i>Urbano (2005) apud Stramma et al. (2003)</i>) | 1 |
| 2 | Diagrama das componentes zonais das correntes equatoriais do Atlântico Tropical. (<i>Peterson & Stramma, 1991</i>) | 2 |
| 3 | Topografia dinâmica relativa à 1000m em: a) 0m; b) 100m e; c) 200m. A figura mostra as retroflexões ciclônicas e anti-ciclônicas da sCSE e da cCSE, a geração da CCSE e a alimentação da SSE pela sCSE, cCSE e SNB no Atlântico Sul. Os contornos estão em $m^2 s^{-2}$ (<i>Silveira et al., 1994</i>) | 3 |
| 4 | Distribuição de velocidades zonais em $35^\circ W$, média de 13 seções. Dados amostrados por perfiladores acústicos. Nas áreas sombreadas, fluxo para leste. (<i>Schott et al., 2003</i>) | 5 |
| 5 | seções de velocidade baroclínica absoluta calculada pelo POMsec: a) em $11^\circ S$ e; b) em $19,5^\circ S$. Valores positivos para norte. (<i>Soutelino, 2005</i>). | 6 |
| 6 | Seções de velocidade medida em a) $35^\circ W$, e b) $41^\circ W$. O sombreado indica correntes para leste. (<i>Goes et al., 2005</i>) | 8 |
| 7 | Diagrama esquemático com a circulação da CNB e suas retroflexões nas camadas de (a) 0 m a ~ 100 m, e (b) ~ 100 m a ~ 300 m. (<i>Schott et al., 1998</i>) | 8 |
| 8 | Malha de estações hidrográficas da ONEII, realizada pelo NOc Antares. A numeração corresponde às radiais. | 12 |
| 9 | Aplicação dos pesos na janela móvel tipo <i>Hanning</i> . (<i>Mattos, 2003</i>) | 14 |
| 10 | Curva T-S média dos dados (linha azul) na região da Água Central do Atlântico Sul ($8^\circ C < T < 18^\circ C$) envolta em seu desvio médio quadrático (tracejado azul), comparada com um envelope climatológico de <i>Sverdrup et al. (1942)</i> (linha vermelha). | 15 |

| | | |
|----|--|----|
| 11 | Exemplo do uso bem sucedido de $\sigma_1 = 32.15 \text{ kg m}^{-3}$ como nível de movimento nulo. As secções são em $5^\circ 30'S$ com: a) medições de LADCP e b) velocidades baroclínicas relativas. Os valores positivos indicam velocidades para norte. Encontram-se marcados com pontos as densidades $\sigma_\theta = 27,05 \text{ kg m}^{-3}$ e $\sigma_1 = 32,15 \text{ kg m}^{-3}$. (<i>Stramma et al.</i> , 1995) | 18 |
| 12 | Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 1. Valores positivos indicam velocidades em direção ao Equador. | 21 |
| 13 | Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 2. Valores positivos indicam velocidades em direção ao Equador. | 21 |
| 14 | Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondentes à Radial 3. | 22 |
| 15 | Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 4. | 23 |
| 16 | Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 5. | 23 |
| 17 | Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 6. | 25 |
| 18 | Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 7. | 25 |
| 19 | Distribuição da densidade potencial na Radial 2, mostrando a inclinação negativa das isopícnais para leste. | 28 |

Lista de Tabelas

Lista de Tabelas

- 1 Transporte de volume da SNB nas radiais deste trabalho, comparado com o transporte de *Silveira et al.* (1994). Valores em Sverdrups ($1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Em parênteses o percentual do transporte total. 27

Sumário

| | |
|---|-------------|
| Abstract | vi |
| Resumo | vii |
| Lista de Figuras | viii |
| Lista de Tabelas | x |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Correntes Equatoriais do Atlântico Sul | 1 |
| 1.2 Sistema Sub-corrente Norte do Brasil / Corrente Norte do Brasil | 4 |
| 2 Objetivos | 10 |
| 3 Conjunto de dados | 11 |
| 3.1 Aquisição dos dados | 11 |
| 3.2 Tratamento básico dos dados | 12 |
| 3.2.1 Média em caixa | 13 |
| 3.2.2 Alisamento por janela móvel | 13 |
| 3.3 Controle de qualidade dos dados de salinidade | 14 |
| 4 Métodos | 16 |
| 4.1 Seções de Velocidades Baroclínicas Relativas | 16 |
| 4.1.1 O Método Dinâmico | 16 |
| 4.1.2 O Nível de Movimento Nulo | 18 |
| 4.2 Transporte de volume | 19 |
| 5 Resultados e Discussão | 20 |
| 6 Considerações Finais | 30 |
| 6.1 Conclusões | 30 |
| 6.2 Sugestões para estudos futuros | 31 |
| Refêrencias | 32 |

1 Introdução

A região tropical do Oceano Atlântico, sobretudo a porção oeste, é dinamicamente rica, sendo o local de origem de diversas feições da circulação deste oceano, e de grande importância para a troca inter-hemisférica de massa e calor (*Silveira et al., 1994*)(*Goes et al., 2005*).

No Atlântico Sul Tropical predominam as correntes que compõe o Giro Equatorial (Figura 1). Deste giro, de rotação ciclônica, fazem parte as seguintes correntes zonais: Subcorrente Equatorial (SE), a Subcorrente Sul Equatorial (SSE), a Contra-corrente Sul Equatorial (CCSE), e a porção central e norte da Corrente Sul Equatorial (CSE). Ao sul do Giro Equatorial encontra-se o Giro Subtropical do Atlântico Sul, de rotação anti-horária, composto em sua parte norte pela porção sul da CSE. Na margem oeste encontramos ainda a Subcorrente Norte do Brasil (SNB) e Corrente Norte do Brasil (CNB), de características meridionais.

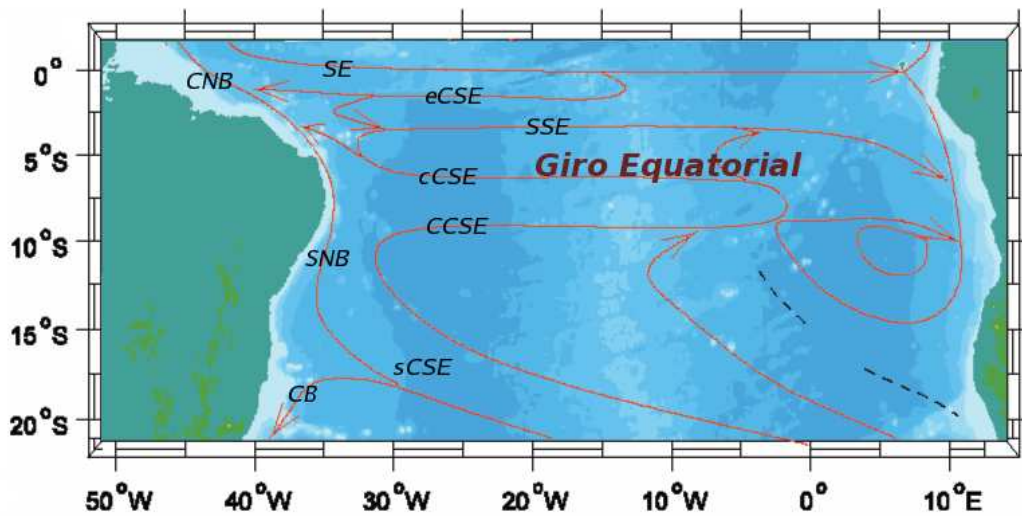


Figura 1: Representação esquemática da circulação do oceano Atlântico Tropical. (modificado de *Urbano (2005) apud Stramma et al. (2003)*)

1.1 Correntes Equatoriais do Atlântico Sul

A CSE é uma corrente larga, de vários ramos, que flui de leste para oeste e se estende desde a latitude de 3°N até pelo menos 15°S (*Tomczak & Godfrey, 2001*). *Molinari (1982)* classificou a CSE no Atlântico Sul em três ramos: sul (sCSE); central (cCSE); e norte,

separados por fluxos para leste: a Contra-corrente Sul Equatorial (CCSE) e a Sub-corrente Sul Equatorial (SSE). O ramo norte foi ainda desmembrado posteriormente por *Stramma & Schott* (1999) em ramo equatorial (eCSE), entre a SSE e a SE e ramo norte (nCSE), ao norte da SE. A Figura 2 sumariza a circulação zonal do sistema de correntes equatorial do Atlântico Tropical.

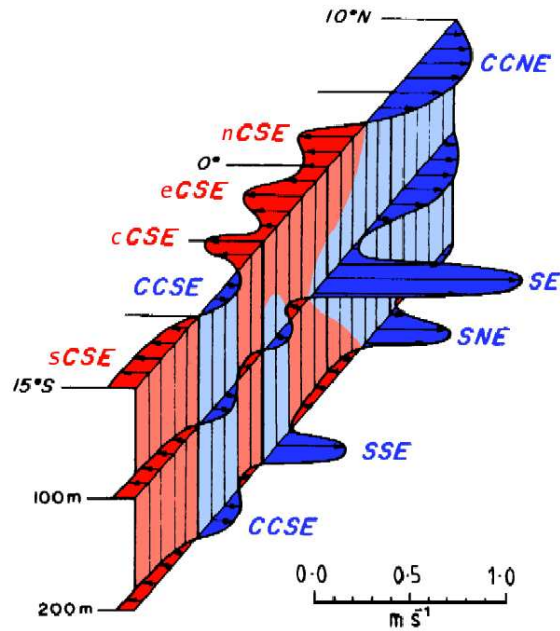


Figura 2: Diagrama das componentes zonais das correntes equatoriais do Atlântico Tropical. (*Peterson & Stramma, 1991*)

A sCSE é descrita por *Stramma* (1991) como um fluxo largo e lento entre 10° S e 25° S a leste de 30° W, transportando aproximadamente 20 Sv ($1 \text{ Sv} = 1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Ao se aproximar da costa brasileira, ao sul de 10° S, a sCSE se bifurca para sul para formar a Corrente do Brasil (CB), e para norte, formando a SNB.

Entre a sCSE e a cCSE, flui a CCSE. Esta corrente foi observada em seções de velocidade geostrófica fluindo para leste entre 6°S e 9°S por *Molinari* (1982), com em média 4 Sv, e um núcleo subsuperficial em 275 m, apesar de ser frequentemente observada em superfície. *Arnaut* (1987) também observou evidências baroclínicas da CCSE em análises climatológicas. Entretanto, seus dados de deriva de navios mostraram um fluxo para oeste superficialmente no lugar da CCSE, provavelmente devido à deriva de Ekman.

Ao norte da CCSE encontramos o ramo central da CSE. Concentrada nos primeiros 100m de profundidade, seu transporte varia de 7 a 26 Sv (*Molinari, 1982*) entre 4°S e 7°S.

Há registros de que esta corrente se bifurca em CB e CNB ao encontrar a costa brasileira na altura do Cabo de São Roque ($5^{\circ}30'S$), baseados em dados de deriva superficial (*Molinari*, 1983). Entretanto, *Stramma* (1991) afirma que não há evidências geostróficas de que a CB seja originada de uma ramificação da cCSE, e que o fluxo superficial para sul, encontrado na região, é resultado do transporte de Ekman, provocado pelos ventos alíseos que atuam na região equatorial. Este último autor afirma ainda, baseado em suas análises, que não há uma ramificação da cCSE. Entretanto, *Silveira et al.* (1994), analisando mapas de topografia dinâmica, calculados a partir de dados hidrográficos quase-sinóticos, encontra uma bifurcação baroclínica da cCSE, corroborando os resultados de *Rennel* (1832), o primeiro a relatar esta bifurcação. Após a bifurcação, o ramo sul da cCSE efetua uma curva anticiclônica e se junta à uma parte da sCSE que também gira para leste, formando então a CCSE, já descrita. O ramo norte da cCSE segue superficialmente para oeste e se junta ao escoamento subsuperficial da SNB para finalmente formar a CNB. Ainda segundo o autor, a parte norte das camadas inferiores da cCSE (~ 200 m) pode efetuar uma curva ciclônica e reforçar a SSE (Figura 3).

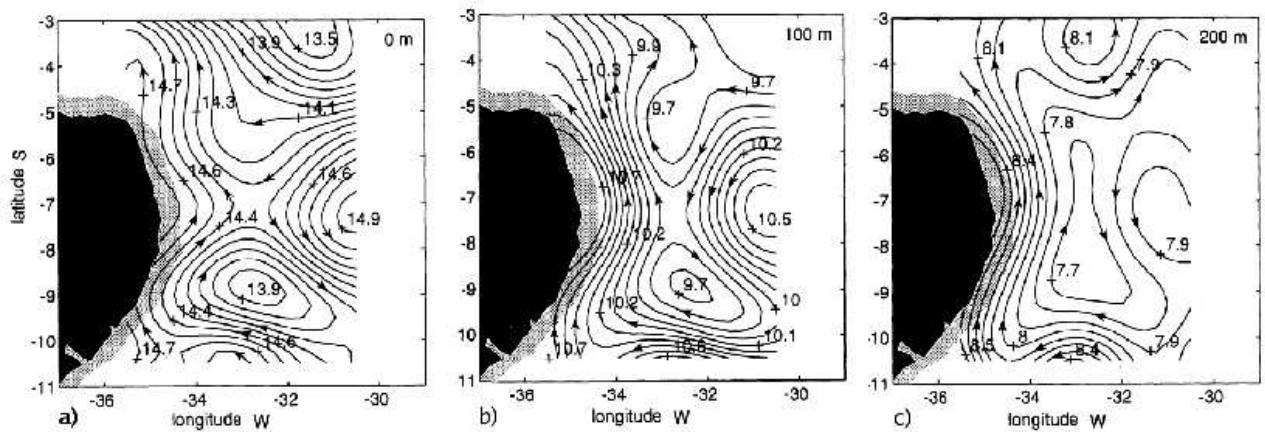


Figura 3: Topografia dinâmica relativa à 1000m em: a) 0m; b) 100m e; c) 200m. A figura mostra as retroflexões ciclônicas e anti-ciclônicas da sCSE e da cCSE, a geração da CCSE e a alimentação da SSE pela sCSE, cCSE e SNB no Atlântico Sul. Os contornos estão em $m^2 s^{-2}$ (*Silveira et al.*, 1994)

Sob a cCSE e a eCSE, dividindo-as subsuperficialmente, encontramos a SSE. Esta flui subsuperficialmente entre 150 m e 500 m de profundidade, com núcleo em 230 m. Possui velocidades máximas entre 20 e 30 $cm s^{-1}$, tanto estimadas geostroficamente como amostradas por perfiladores acústicos (*Stramma*, 1991; *Schott et al.*, 1998). Fluindo

zonalmente entre 2,5°S e 4°A Figura 2 sumariza a circulação zonal do sistema de correntes equatorial do Atlântico Tropical. S, teve seu transporte avaliado, através do meridiano de 35°W, em 4,5 Sv, com dados de perfiladores acústicos por efeito Doppler, ADCP e IADCP (*Stramma et al.*, 2005). A SSE se origina das águas equatoriais da CSE, e é posteriormente alimentada, a leste de 35°W, pela curva ciclônica da cCSE, anteriormente citada, e da sCSE (Figura 3c), com possíveis contribuições da SNB (*Silveira et al.*, 1994; *Stramma & Schott*, 1999).

O último ramo da CSE de relevância para este trabalho é o equatorial (eCSE). Por fluir geralmente sobre a SSE, não existem, entre 0 m e 100 m de profundidade, limites bem definidos entre esta e a cCSE, a leste de 35°W. Ao norte, a eCSE é delimitada pela SE. Seu transporte é avaliado em 7 Sv por *Schott et al.* (2003), valor próximo dos 9 Sv encontrados por *Goes et al.* (2005) (este último autor identifica a eCSE como cCSE) . A oeste de 35°W, a eCSE passa a se fundir à CNB, ficando muito difícil diferenciar os dois fluxos (Figura 4).

Ao norte da eCSE e no limite norte da região de interesse para o presente trabalho, encontra-se a SE. Alimentada por uma retroflexão da CNB em 45°W e por correntes mais ao norte, a SE tem um núcleo subsuperficial a 100 m de profundidade e flui para leste entre 2°S e 2°N, transportando 22,3 Sv ao cruzar 35°W (*Schott et al.*, 1998).

1.2 Sistema Sub-corrente Norte do Brasil / Corrente Norte do Brasil

O Sistema SNB/CNB flui contornando a margem continental do litoral nordeste e norte brasileiro, em direção ao Equador. O local exato de geração da SNB não é ainda muito bem conhecido, apesar de haver o consenso de isso acontecer ao sul de 10°S (*Silveira et al.*, 1994; *Stramma et al.*, 1995). *Soutelino* (2005) analisou duas seções verticais de velocidades baroclínicas absolutas, calculadas com uma versão seccional do *Princeton Ocean Model* (POMsec) a partir de dados de hidrografia . As Seções em 11°S e 19,5°S eram perpendiculares ao talude, e se estendiam além do sistema de correntes de contorno. O autor sugere que a SNB se origina da junção da sCSE com a Corrente de Contorno Intermediária (CCI), que flui para norte, contornando o talude continental a 700 m de profundidade e com velocidade de 25 cm s⁻¹ e 4,3 Sv. O posicionamento do núcleo da

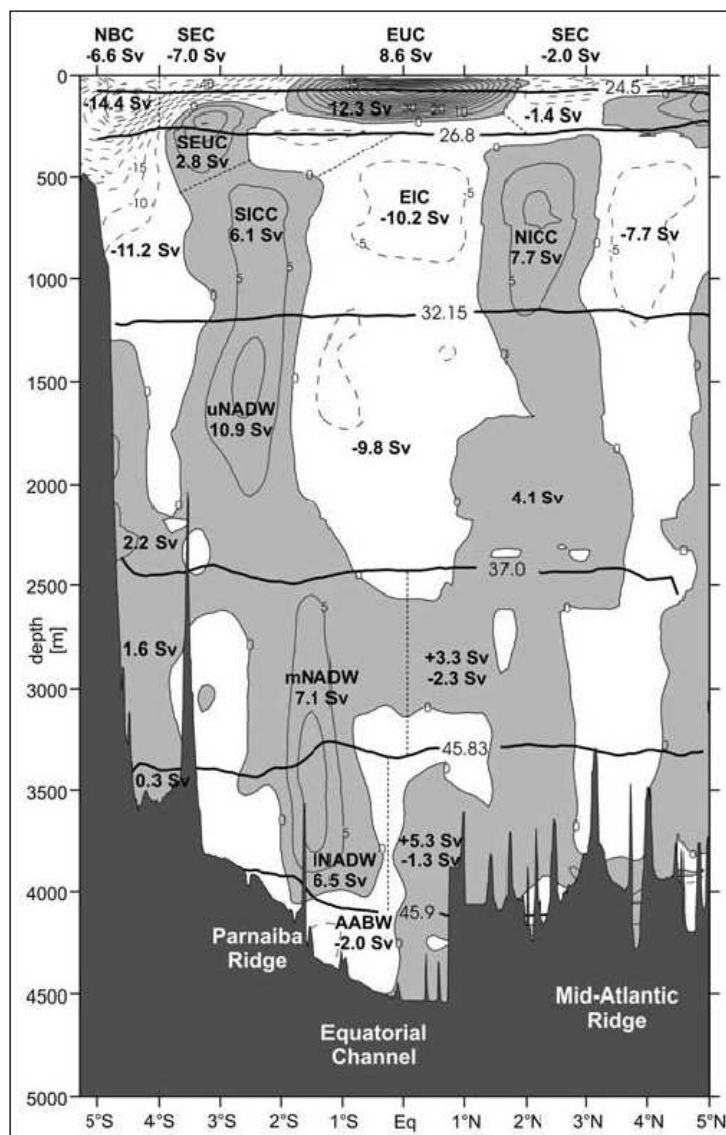


Figura 4: Distribuição de velocidades zonais em 35°W, média de 13 seções. Dados amostrados por perfiladores acústicos. Nas áreas sombreadas, fluxo para leste. (Schott *et al.*, 2003)

CCI, em 19,5°S, e da SNB, em 11°S é um indício deste fato (Figura 5).

Após sua formação, a SNB apresenta um fluxo subsuperficial. Em seu núcleo, a 200 m de profundidade, as velocidades podem ultrapassar os 90 cm s⁻¹, decaindo rapidamente para a superfície. Entretanto a 1100 m de profundidade ainda pode-se encontrar velocidades de 10 cm s⁻¹ para norte (*Stramma et al.*, 1995). Em 10°S, o seu transporte de volume, relativo a $\sigma_1=32,15$ kg m⁻³, foi avaliado em 22,2 Sv para os primeiros 1000 m de coluna d'água por *Stramma et al.* (1995), condizente com o valor de 24,5 Sv encontrado por *Silveira et al.* (1994) e 23,3 Sv por *Schott et al.* (1998).

Mais ao norte, seções de transporte baroclínico em 5°S mostram que a SNB pouco varia seu transporte total (0-1000 m) entre 10°S e 5°S: 23,3 Sv e 24,7 Sv, respectivamente (*Schott et al.*, 1998). Entretanto uma análise mais detalhada mostra que há um aumento do transporte baroclínico nas camadas superiores ($\sigma_\theta < 26,8$ kg m⁻³) de 11,1 Sv (10°S) para 14,6 Sv (5°S), e uma redução nas inferiores ($\sigma_\theta = 26,8$ kg m⁻³ até 1000 m) de 12,1 Sv (10°S) para 10 Sv (5°S). O aumento do transporte nas camadas superiores da SNB nesta latitude é devido à contribuição da CSE, principalmente do ramo norte da cCSE, que alcança a SNB entre 4°S e 7°S. Nas camadas inferiores, a SNB perde volume para a SSE em 4°S a 5°S e 34°W, como mostra a Figura 3c, da topografia dinâmica a 200 m de *Silveira et al.* (1994). Em 5°30'S, *Stramma et al.* (1995) encontrou uma projeção da SNB fluindo para norte a 150m de profundidade, com 70 km de extensão, e diz que uma possível explicação é que a porção mais oriental do núcleo sub-superficial contribui para a SSE.

Após atravessar a latitude de 5°S, a SNB contorna a costa brasileira e se orienta para noroeste. Nesta região várias seções hidrográficas e de perfiladores acústicos foram realizadas em 35°W. *Schott et al.* (2003) apresenta uma promediação de 13 seções, compostas de dados de perfiladores acústicos de casco, e de perfiladores Pegasus e LADCP (Figura 4). Nesse ponto a SNB já se encontra fundida à cCSE, e a eCSE encontra-se em fase de fusão, aumentando consideravelmente o transporte na camada superior (de 7,6 Sv em 5°S para 16,1 Sv, segundo *Stramma et al.* (2005)). Por isso, o fluxo deixa de ser chamado de Sub-corrente Norte do Brasil para ser denominado Corrente Norte do Brasil. *Schott et al.* (2003) encontra dificuldades em estabelecer a fronteira superficial entre a CNB e a eCSE, e a estima em 4°S. Desse modo, a média do transporte total da CNB neste último

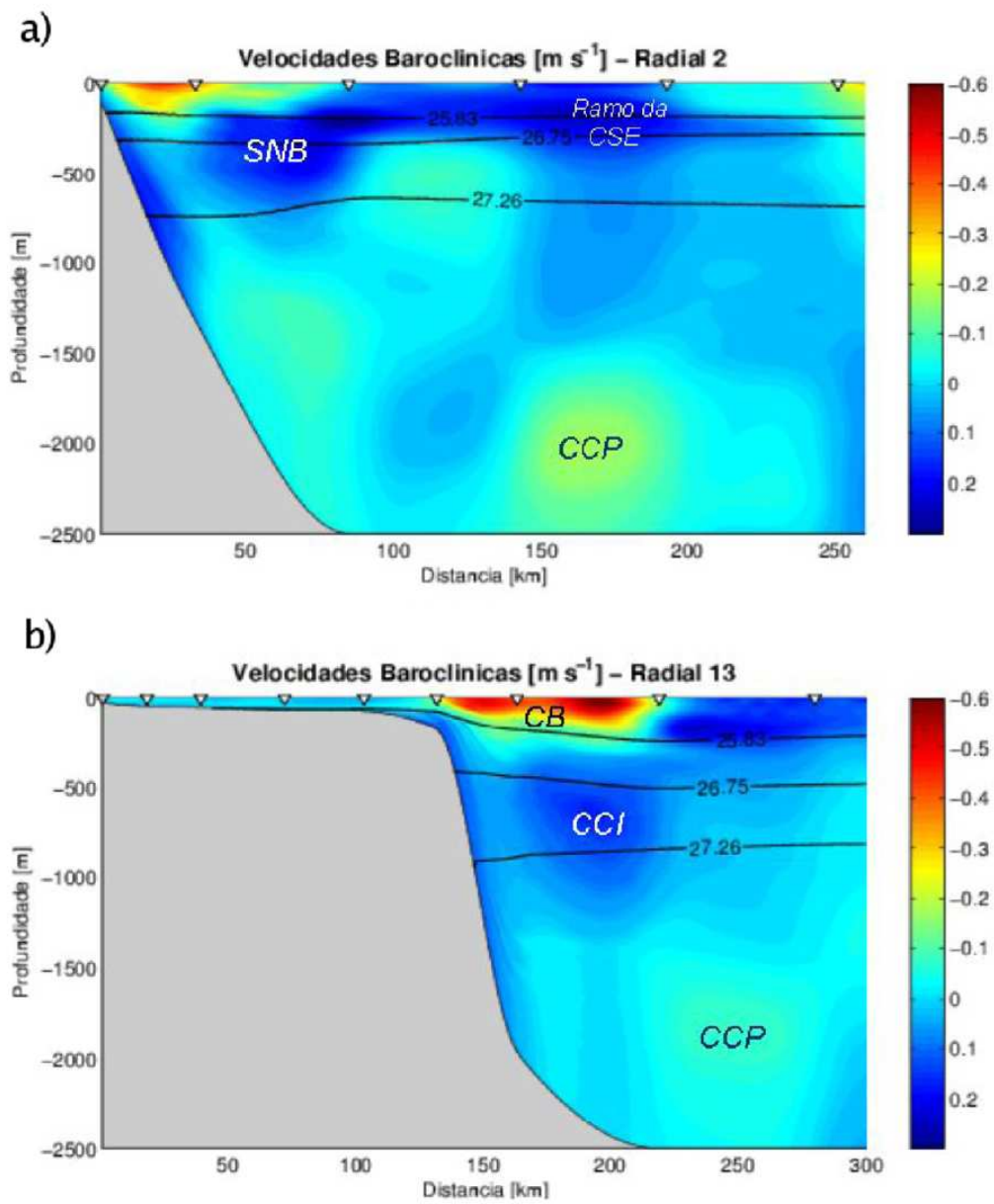


Figura 5: seções de velocidade baroclínica absoluta calculada pelo POMsec: a) em 11°S e; b) em $19,5^\circ\text{S}$. Valores positivos para norte. (Soutelino, 2005).

trabalho é 32,2 Sv relativo a $\sigma_1 = 32.15 \text{ kg m}^{-3}$. Entretanto, se somarmos este valor ao fluxo da eCSE (7 Sv), já quase indissociável da CNB, chegamos ao valor de 39,2 Sv fluindo ao longo da costa em direção ao Equador.

Em 41°W (Figura 6b), a CNB apresenta seu maior transporte acima de $\sigma_\theta = 26,8 \text{ kg m}^{-3}$ (~250 m) registrado (33,8 Sv, contra 20,2 em 35°W e 16,8 em 44°W), segundo cálculos de *Goes et al.* (2005). Infelizmente os dados analisados atingiam no máximo 400 m de profundidade, impossibilitando o cálculo do transporte total (0-1000) e sua comparação com o transporte total de outras seções.

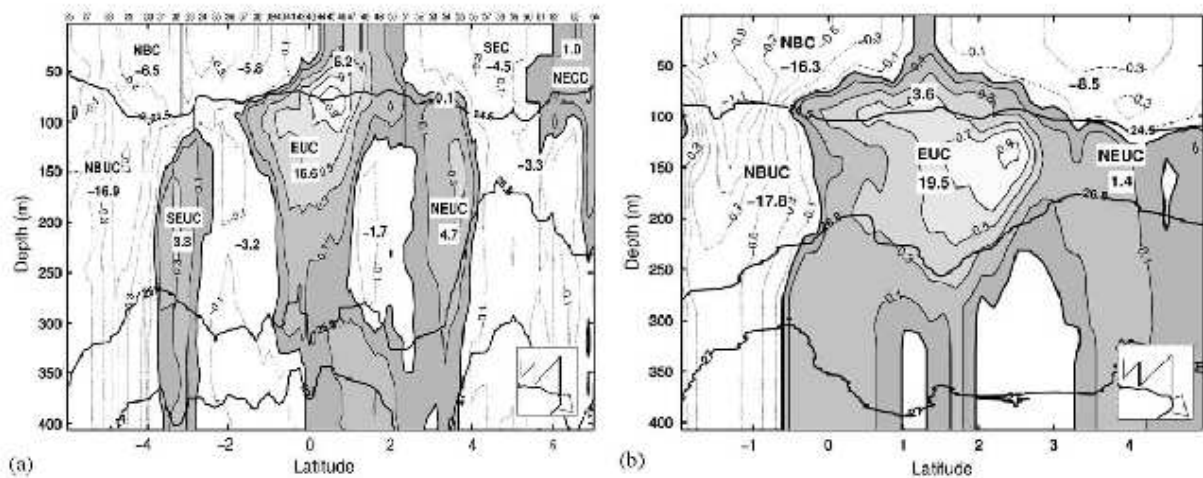


Figura 6: Seções de velocidade medida em a) 35°W, e b) 41°W. O sombreado indica correntes para leste. (*Goes et al.*, 2005)

A noroeste de 44°W, a CNB perde volume ao sofrer retroflexão para leste-nordeste em diversos níveis de profundidade e alimentar a SE (Figura 7). Esta retroflexão foi primeiramente descrita por *Johns et al.* (1990), e posteriormente estudada por *Silveira et al.* (2000) e *Goes et al.* (2005). O transporte médio total (0-1000 -m) da CNB nesta longitude é de 34,1 Sv, menor que seu transporte em conjunto com a eCSE de 40,2 Sv em 35°W (*Schott et al.*, 1998).

Analisando as informações apresentadas até aqui, é notável que as correntes zonais do Atlântico Sul Tropical formam um padrão de circulação complexo, que alimenta (e é alimentado por) as correntes de contorno tropicais, o sistema SNB/CNB. Por isso o escoamento baroclínico do sistema SNB/CNB apresenta grandes mudanças de volume, intensidade e profundidade ao longo de seu curso. Entretanto, poucos estudos foram

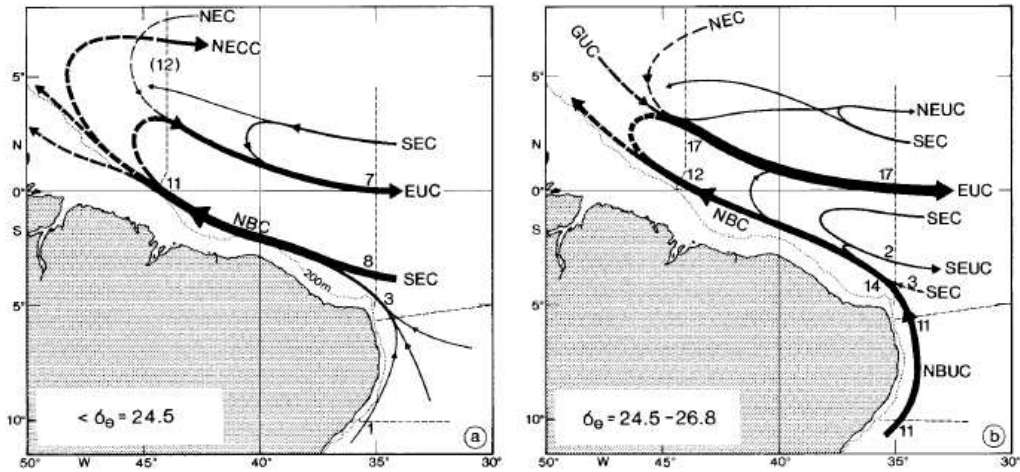


Figura 7: Diagrama esquemático com a circulação da CNB e suas retroflexões nas camadas de (a) 0 m a ~100 m, e (b) ~100 m a ~300 m. (Schott *et al.*, 1998)

realizados na área compreendida entre 5°S e 10°S, onde apenas *Silveira et al.* (1994) analisa de forma quase-sinótica os sítios de geração da SSE e da CCSE e o escoamento baroclínico do sistema SNB/CNB ao longo da costa nordeste brasileira, baseado em dados de garrafa de Nansen. Dessa forma, expõe-se a seguir o objetivo deste trabalho.

2 Objetivos

O presente trabalho tem por objetivo estudar o escoamento baroclínico do sistema SNB/CNB ao longo da costa nordeste do Brasil, assim como os sítios de geração da SSE e da CCSE, na região compreendida entre 5°S e 10°S . Para tanto faz-se necessário:

- Efetuar o cálculo das velocidades baroclínicas relativas a partir de seções hidrográficas;
- Estimar o transporte de volume associado aos escoamentos encontrados;

Para que se alcance os objetivos acima descritos, será preciso lançar mão de secções de dados hidrográficos, aqusitados em uma grade quase-sinótica, ao largo do litoral nordeste brasileiro.

3 Conjunto de dados

A Marinha do Brasil efetua regularmente levantamentos hidrográficos no domínio oceânico ao largo de toda costa brasileira. Para atender os objetivos deste trabalho, foram utilizados dados de temperatura e condutividade, de um destes levantamentos, obtidos com um perfilador CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*). Os dados utilizados foram coletados ao largo de costa nordeste, durante a Comissão Oceano Nordeste II (ONEII) executada pelo N.Oc. Antares, da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), Marinha do Brasil. A comissão foi efetuada entre 05 de novembro e 09 de dezembro de 2004, e abrangiu uma área que vai do sul do estado de Alagoas até o norte do estado do Ceará, entre as latitudes de $0^{\circ}48,0'$ S e $11^{\circ}30,0'$ S e longitudes de $033^{\circ}30,0'$ W e $040^{\circ}00,0'$ W.

A grade hidrográfica quase-sinótica de amostragem com CTD foi composta por 94 estações hidrográficas, contabilizando 13 seções normais ao talude, apresentadas na Figura 8. Destas 13, utilizou-se somente as radiais de 1 a 7. Estas estão localizadas, a maioria, ao sul de 5° , região de escasses de estudos.

3.1 Aquisição dos dados

A aquisição dos dados de temperatura, condutividade e pressão foi realizada com um CTD do fabricante *SeaBird*, modelo *SBE 9Plus*, numa frequência de 24Hz. O CTD estava equipado com um par de sensores de temperatura, um par de sensores de condutividade e um sensor de pressão. Onde havia duplicidade de sensores, foram utilizados neste trabalho os dados daquele com data de calibração mais recente. Adicionalmente foram coletadas, por garrafas da rosette acoplada ao CTD, amostras de águas de profundidades pré-determinadas para análise de salinidade em laboratório, a fim de aferir a calibração dos sensores de condutividade do CTD. Entretanto, até o presente momento, estas análises não foram concluídas pelo Centro de Hidrografia da Marinha. Então foi utilizada outra forma de verificar a qualidade dos dados. Mas antes, devemos proceder com o tratamento básico dos dados.

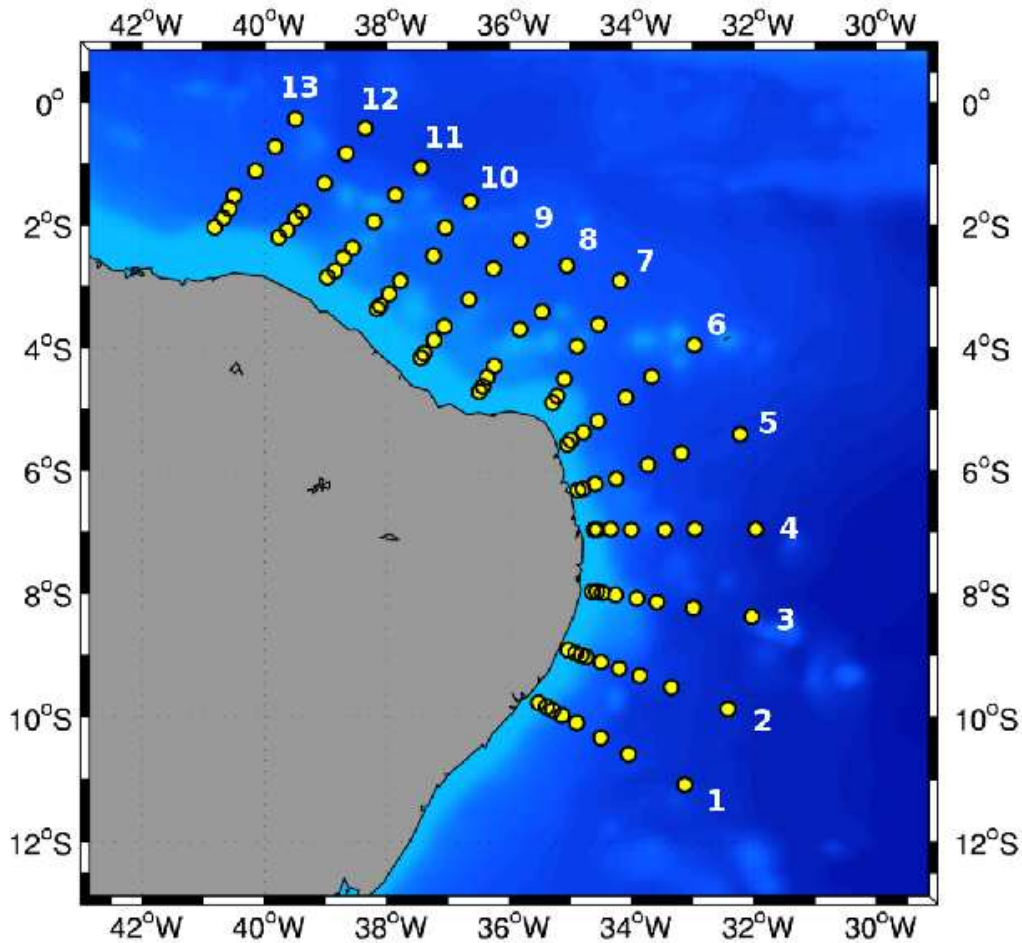


Figura 8: Malha de estações hidrográficas da ONEII, realizada pelo NOc Antares. A numeração corresponde às radiais.

3.2 Tratamento básico dos dados

A análise e o processamento dos dados hidrográficos de temperatura e condutividade somente considerou os dados coletados durante a descida do conjunto CTD-ROSSETTE. Os dados de subida do conjunto foram ignorados por três motivos principais: a subida do equipamento causa maior turbulência na região dos sensores, por estes estarem localizados na parte inferior do CTD, alterando o gradiente original das propriedades hidrográficas; as paradas para disparo das garrafas causam variações bruscas da velocidade de perfilagem, adicionando ruído ao dado; e a deriva do navio provoca erros no posicionamento das estações durante as perfilagens mais profundas.

E apesar dos cuidados já tomados, os dados necessitaram ainda de um tratamento antes de serem submetidos aos cálculos dinâmicos para obtenção de velocidades baroclínicas

relativas. Já foi efetuado a bordo, através de software do fabricante do CTD, a remoção de *spikes*, ou seja, picos de valores espúrios gerados por erros eletrônicos na aquisição. A seguir encontram-se descritos outros tratamentos efetuados para tornar os perfís mais contínuos e regulares.

3.2.1 Média em caixa

A frequência de aquisição do CTD, como dito anteriormente, é de 24Hz. Se levarmos em consideração que a velocidade de descida do conjunto CTD-ROSSETTE varia entre 1 m s^{-1} e 2 m s^{-1} , temos uma quantidade muito grande de dados em cada metro inteiro de profundidade, e espaçados irregularmente. O processo de média em caixa tem por objetivo justamente equiespaçar e reduzir a quantidade de dados, para tornar o processamento matemático possível e mais rápido. O cálculo é efetuado de modo que para cada valor inteiro de pressão faz-se um média dos dados amostrados que este valor de pressão engloba. Após esse processo, além dos efeitos já mencionados, obtemos um perfil com feições mais contínuas.

3.2.2 Alisamento por janela móvel

De modo a tornar o perfil mais contínuo, do ponto de vista de suas derivadas verticais, aplicamos o alisamento por janela móvel. Para tanto efetuou-se a média ponderada de um determinado número de níveis de profundidade em torno do nível de interesse. O peso atribuído a cada ponto (nível) é dependente de uma determinada função. Neste trabalho foi utilizada uma janela do tipo *Hanning*, que distribui os pesos de forma semelhante a uma curva gaussiana, e tem por característica priorizar a medida central da janela, privilegiando o ponto de aplicação. O número de pontos adjacentes considerados, ou seja, o tamanho da janela, foi especificado de acordo com a profundidade local, de modo a otimizar a utilização do filtro e permitir que sua aplicação apenas suavize os gradientes verticais das propriedades, sem degradá-los. Deste modo, o tamanho de janela escolhido foi de 5 pontos, para regiões de plataforma rasa (menos de 100 m de profundidade), 11 pontos para estações sobre a plataforma externa e quebra de plataforma (entre 100 m e 500 m de profundidade), e 31 pontos para estações profundas (profundidades maiores que 500 m). Na Figura 9 vemos a aplicação de pesos para cada tamanho de janela utilizado.

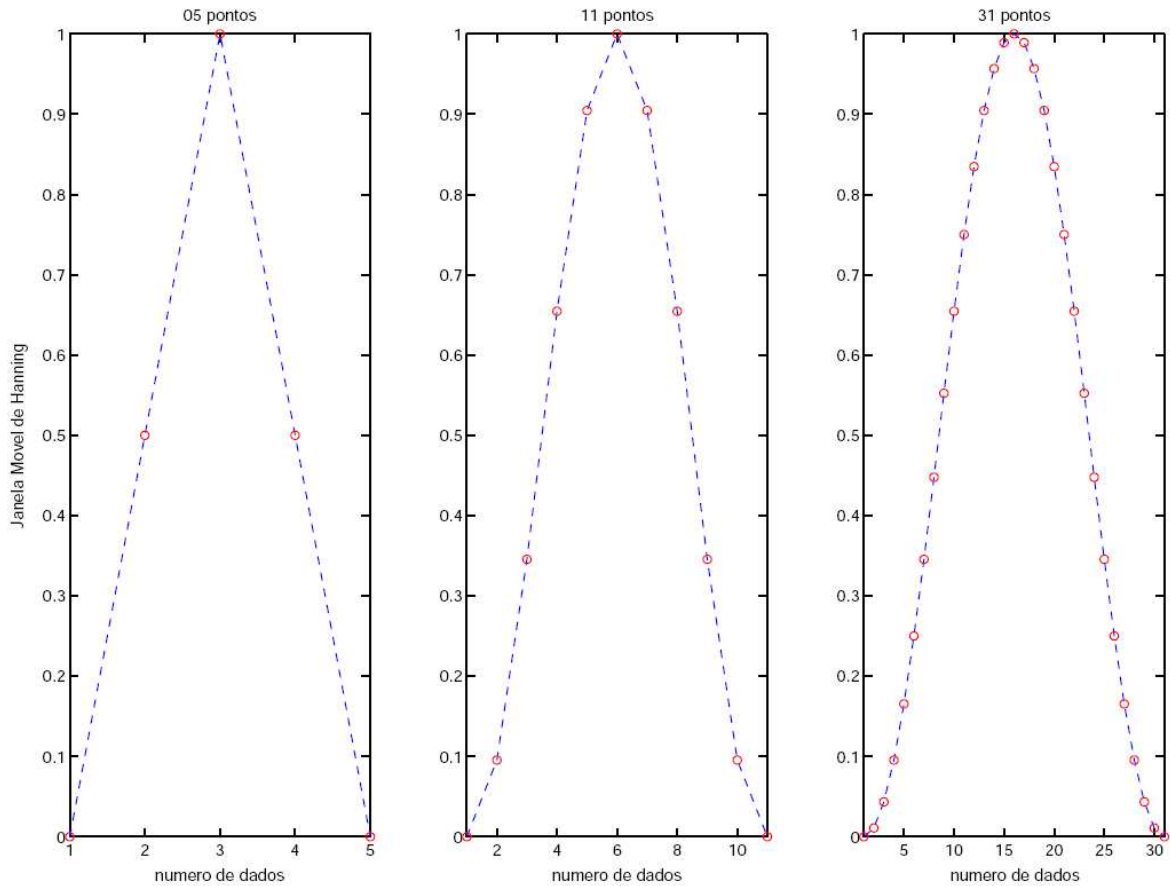


Figura 9: Aplicação dos pesos na janela móvel tipo *Hanning*. (*Mattos*, 2003)

3.3 Controle de qualidade dos dados de salinidade

Para a análise da qualidade dos dados de salinidade, calculados a partir da condutividade e temperatura coletados com o CTD, usualmente se utiliza o aferimento com a salinidade das amostras de água, analisadas em um termosalinômetro. Infelizmente tal análise não foi realizada, e portanto adotamos uma metodologia alternativa. *Mattos* (2003) utilizou para tanto a análise do diagrama T-S, onde através da observação do espalhamento das curvas, considerando os pares T-S abaixo da camada de mistura, podem ser identificados possíveis desvios sistemáticos da coleta de dados (*Mamayev*, 1975). A metodologia então consiste em plotar o gráfico T-S de toda a comissão, e compará-lo com uma climatologia da região. Usamos aqui um envelope climatológico definido em *Sverdrup et al.* (1942) para a região do gráfico correspondente a Água Central do Atlântico Sul. Para melhor comparar os dados com esta climatologia, utilizamos um gráfico T-S médio

de toda a comissão, envolta em seu desvio médio quadrático, seguindo a metodologia aplicada por *Mattos* (2003), como mostrado na Figura 10.

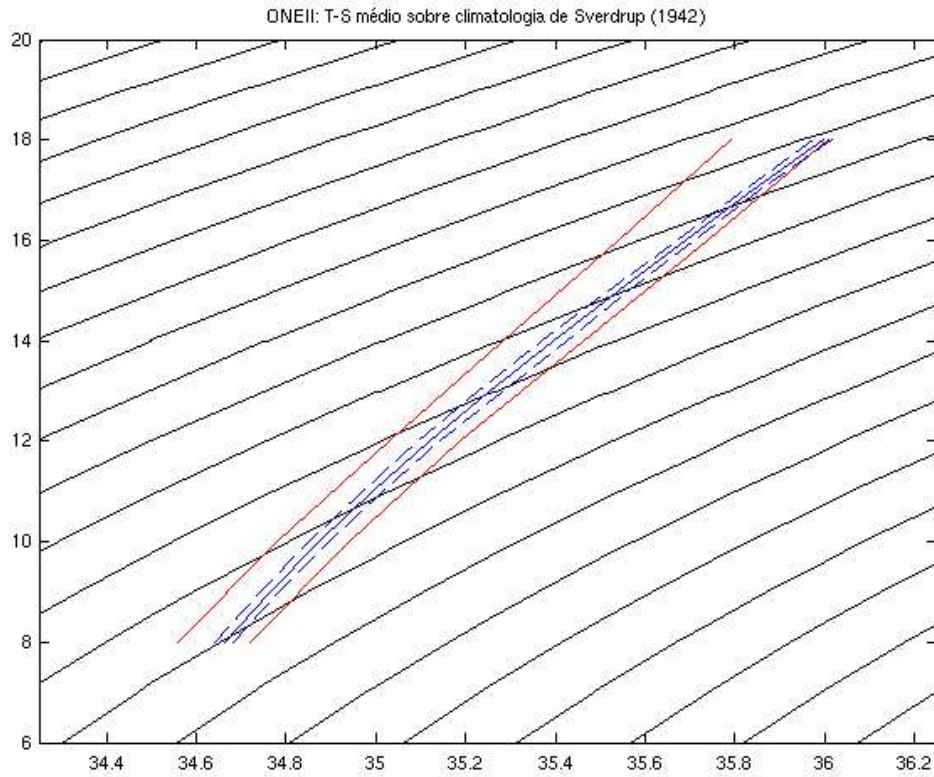


Figura 10: Curva T-S média dos dados (linha azul) na região da Água Central do Atlântico Sul ($8^{\circ}\text{C} < T < 18^{\circ}\text{C}$) envolta em seu desvio médio quadrático (tracejado azul), comparada com um envelope climatológico de *Sverdrup et al.* (1942) (linha vermelha).

Após estes tratamentos, os dados encontraram-se praticamente livres de ruídos e com feições suavizadas e contínuas. Finalmente, a partir destes dados já tratados, calculamos os outros parâmetros utilizados. São estes: salinidade (S); temperatura potencial (θ); e as anomalias de densidade σ_T , σ_{θ} , e σ_1 .

4 Métodos

4.1 Seções de Velocidades Baroclínicas Relativas

O cálculo do campo de velocidades baroclínicas relativas nas seções verticais (formadas pelas radiais de estações hidrográficas) foi feito via Método Dinâmico Clássico.

4.1.1 O Método Dinâmico

O método consiste na integração vertical da equação do vento térmico, permitindo inferir a componente baroclínica seccional da velocidade geostrófica usando o campo de massa, calculado a partir dos dados de temperatura e salinidade obtidos na comissão hidrográfica. Desse modo, usando coordenadas isobáricas, podemos escrever a equação na forma

$$v_p - v_{p_0} = \frac{1}{f_0} \int_{p_0}^p \frac{\partial \alpha}{\partial x} dp, \quad (1)$$

onde f_0 é o valor médio do parâmetro de Coriolis entre duas estações separadas por uma distância dx , α é o volume específico, p_0 é o nível de referência (também chamado de nível de movimento nulo), e v_p é a velocidade no nível p relativa à v_{p_0} (considerada nula) e de orientação normal a dx . Para facilitar o entendimento e a discretização do cálculo, devemos então introduzir a quantidade geopotencial Φ , definida pela equação:

$$d\Phi = -gdz. \quad (2)$$

Usando uma forma modificada da equação da hidrostática

$$-gdz = \frac{dp}{\rho} = \alpha dp, \quad (3)$$

podemos substituir (3) em (2), chegando à:

$$d\Phi = \alpha dp. \quad (4)$$

Podemos definir o volume específico como

$$\alpha_{x,y,p} = \bar{\alpha}_p + \delta_{x,y,p} , \quad (5)$$

onde $\bar{\alpha}$ é o volume específico padrão e δ é a anomalia do volume específico. Por ser $\bar{\alpha}$ unicamente dependente de p , sua variação lateral é nula em um sistema com coordenadas verticais isobáricas, então $\partial\bar{\alpha}/\partial x = 0$. Desse modo, a equação (1) pode ser reescrita da forma:

$$v_p - v_{p_0} = \frac{1}{f_0} \int_{p_0}^p \frac{\partial\delta}{\partial x} dp . \quad (6)$$

Calculando o geopotencial relativamente ao nível de referência p_0

$$\Phi = \int_{p_0}^p \alpha dp . \quad (7)$$

e substituindo (5) em (7), encontramos:

$$\Phi = \underbrace{\int_{p_0}^p \bar{\alpha} dp}_{\Phi_{(p)}} + \underbrace{\int_{p_0}^p \delta dp}_{\Delta\Phi_{(x,y,p)}} , \quad (8)$$

onde, análogamente à equação (5), $\Phi_{(p)}$ é o geopotencial padrão, com variação lateral nula, e $\Delta\Phi_{(x,y,p)}$ é a anomalia do geopotencial. Desse modo, definindo a anomalia do geopotencial relativa ao nível p_0 , para uma determinada estação i , obtemos:

$$\Delta\Phi_i = \int_{p_0}^p \delta_i dp . \quad (9)$$

Então finalmente, utilizando a aproximação por acréscimos finitos de distância ($\partial x \sim \Delta x$), e considerando duas estações hidrográficas a e b , substituímos (9) em (6), encontrando:

$$v_p = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta\Phi_b - \Delta\Phi_a}{\Delta x} + v_{p_0} . \quad (10)$$

Como comentado anteriormente, p_0 é o nível de referência, ou seja, de movimento nulo, portanto devemos considerar $v_{p_0} = 0$.

4.1.2 O Nível de Movimento Nulo

Findado o desenvolvimento do Método Dinâmico, deve-se então escolher um valor para esse nível isobárico de movimento nulo p_0 . Esta escolha deve ser criteriosa, de modo que a velocidade baroclínica relativa seja uma boa aproximação da velocidade baroclínica absoluta.

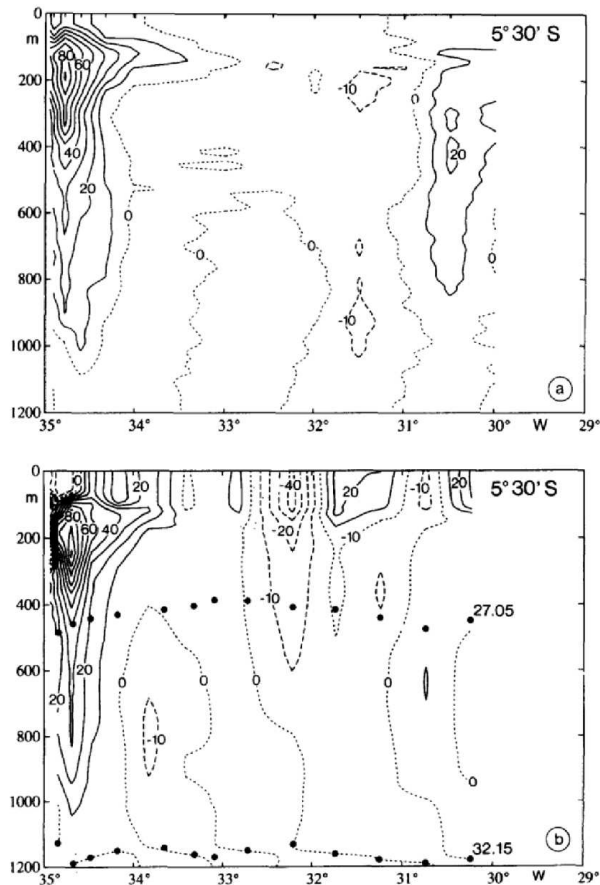


Figura 11: Exemplo do uso bem sucedido de $\sigma_1 = 32.15 \text{ kg m}^{-3}$ como nível de movimento nulo. As secções são em $5^\circ 30' \text{ S}$ com: a) medições de LADCP e b) velocidades baroclínicas relativas. Os valores positivos indicam velocidades para norte. Encontram-se marcados com pontos as densidades $\sigma_\theta = 27,05 \text{ kg m}^{-3}$ e $\sigma_1 = 32,15 \text{ kg m}^{-3}$. (*Stramma et al.*, 1995)

Assim, podemos nos basear em vários métodos para estimar este nível, como medidas diretas de velocidade, análise de massas d'água, modelos matemáticos, etc.. Neste trabalho foi adotada uma aproximação do nível utilizado por *Stramma* (1991). O autor, através de análise de massas d'água, descreve como nível de movimento nulo ideal a isopicnal de $\sigma_1 = 32,15 \text{ kg m}^{-3}$, que variou entre 1000 m e 1200 m, por esta marcar a interface entre a Água Circumpolar Profunda (que flui para o norte na região estudada) e a Água Profunda

do Atlântico Norte (que flui para o sul). Outros trabalhos que utilizaram níveis próximos ou iguais para a mesma região obtiveram sucesso, como *Molinari (1982)*; *Silveira et al. (1994)*; *Stramma et al. (1995)*(Figura 11). No presente trabalho, as equações foram descritas em coordenadas verticais isobáricas, e não em coordenadas isopícnais. Por isso, fez-se necessário encontrar, nos dados aqui utilizados, os valores de pressão correspondentes à isopícnal em questão, e utilizar como nível de referência a média dos valores encontrados. A média encontrada foi de 1214 dbar, com um desvio padrão de 36 dbar. Para simplificar, o nível isobárico de movimento nulo usado foi arredondado para 1200 dbar.

4.2 Transporte de volume

Após o cálculo do campo de velocidades baroclínicas seccionais relativas, é interessante que possamos conhecer o transporte de volume das correntes encontradas, e como este transporte varia ao longo da região estudada. Para tanto, definimos o transporte de volume como

$$\Phi_V = \int \int_A \vec{v} \cdot \vec{n} \, dA, \quad (11)$$

onde dA é a área por onde passa um fluxo de volume Φ_V com velocidade \vec{v} . \vec{n} é um versor normal a dA .

De forma a discretizar o cálculo, considerou-se a seção dividida em pequenas células retangulares, com seus vértices localizados em pontos de grade da seção. Assim, efetuou-se a média da velocidade dos quatro vértices, considerou-se a velocidade média como se estivesse no centro da célula e multiplicou-se esta pela área da mesma. Assim, após somar o transporte de todas as células na região de cada corrente, obtivemos o transporte de volume. A equação

$$T_v = \sum_j \sum_i \bar{v}_{ij} \cdot \Delta z_{ij} \cdot \Delta x_{ij}, \quad (12)$$

demonstra este cálculo discretizado

Como critério para limitação da área de soma das células, ou seja, delimitação dos escoamentos seccionais, utilizou-se uma velocidade mínima, delimitando o contorno do escoamento, e níveis de profundidade observados como limites da corrente em questão.

5 Resultados e Discussão

Ao final do tratamento dos dados, de seu processamento para geração das seções de velocidade e do posterior cálculo dos transportes de volume, podemos finalmente proceder com a análise da evolução do escoamento baroclínico da SNB entre 10°S e 5°S. Nas seções mostradas a seguir (Figuras 12 à 18), as velocidades positivas indicam movimentos paralelos à costa em direção ao Equador, os triângulos vazados marcam a posição das estações hidrográficas e os asteriscos o ponto médio entre as estações, onde são calculados os valores de velocidade baroclínica. Como as velocidades baroclínicas relativas aqui calculadas são na verdade somente a componente normal à seção, estas velocidades podem variar com a inclinação com que a corrente baroclínica relativa intercepta a seção e, portanto, devem ser interpretadas com cautela. Entretanto o mesmo não se aplica aos valores de transporte de volume, uma vez que a possível redução da velocidade calculada para um escoamento é compensada pelo aumento da área seccional do mesmo escoamento. A validade dos valores de transporte dependem então somente da seção resolver completamente o escoamento.

A distribuição de velocidades baroclínicas relativas da seção mais ao sul (Radial 1, latitude média 10°S) é mostrada na Figura 12. Nesta seção observa-se uma corrente fluindo para norte-nordeste, próxima ao talude. Esta corrente é a SNB. Seu núcleo encontra-se em 300 m de profundidade, e apresenta velocidade máxima de 70 cm s^{-1} , diminuindo em direção à superfície. Em profundidades abaixo do núcleo sua velocidade decai em menor taxa, e podem ser notadas velocidades da ordem de 20 cm s^{-1} a 800 m de profundidade. O transporte de volume da SNB estimado para esta seção foi de 17,9 Sv, estando 83% deste transporte localizado abaixo de 150 m. A partir de 150 km de distância da estação mais rasa, há uma inversão da componente da corrente normal à seção. Passa-se então a se observar um escoamento para sul-sudoeste entre 0 m e 1100 m de profundidade, com o fluxo principal nos primeiros 200 m, e velocidade máxima de 17 cm s^{-1} . Próximo à costa, sobre o talude, pode-se observar ainda um escoamento para sul-sudoeste, estreito e restrito aos primeiros 100 m de profundidade.

Mais ao norte, na Radial 2 (9°S, Figura 13), a SNB diminui de intensidade, e apresenta velocidades máximas de 50 cm s^{-1} . Há o surgimento de um aparente segundo núcleo a

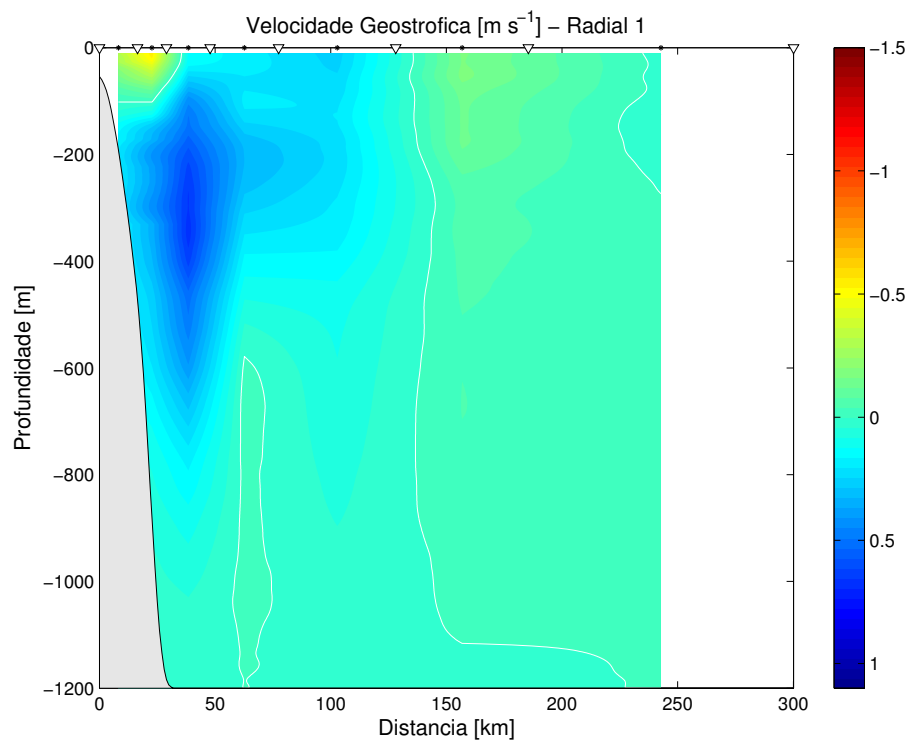


Figura 12: Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 1. Valores positivos indicam velocidades em direção ao Equador.

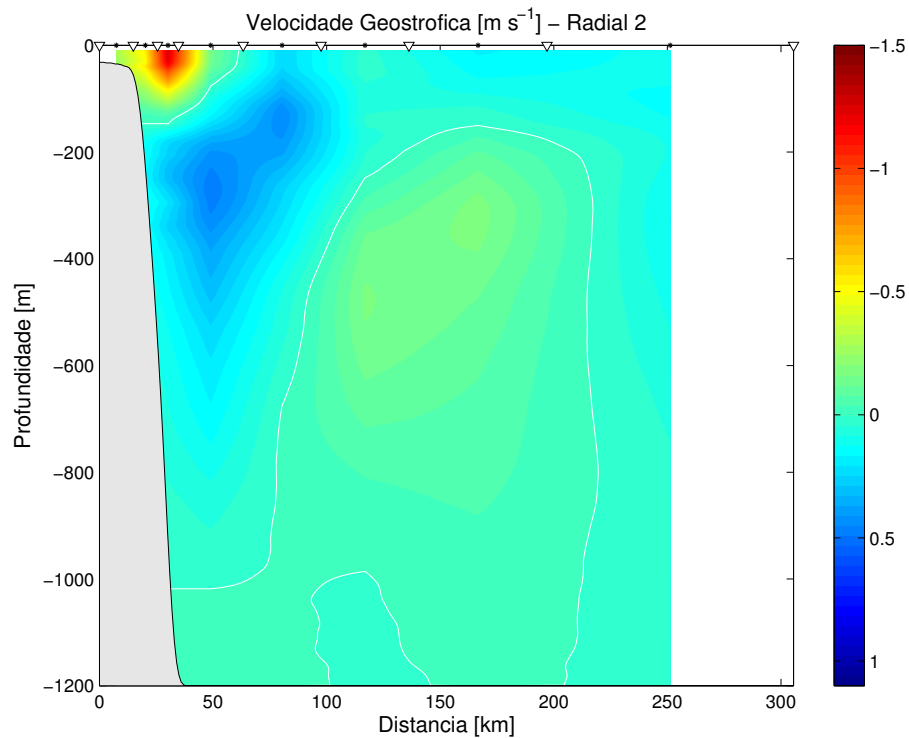


Figura 13: Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 2. Valores positivos indicam velocidades em direção ao Equador.

m de profundidade, a 30 km a leste do núcleo principal, afastando do talude o eixo médio da corrente. Nesta seção também é observado um escoamento raso para sul próximo à quebra de plataforma.

Da seção de velocidades baroclínicas correspondente à Radial 3 (8°S, Figura 14) destacam-se dois escoamentos distintos para norte: a SNB e parte da sCSE. A SNB encontra-se aqui novamente com um único núcleo, desta vez a 175 m de profundidade, a 70 km da estação mais profunda. Nesta seção, a SNB apresentou seu menor valor de transporte: 5,9 Sv. Sobre a SNB, observa-se uma camada de 50 m de espessura a partir da superfície, fluindo com sentido contrário e com velocidades fracas da ordem de 20 cm s⁻¹. Como mostra a Figura 14, à leste da SNB aparece uma parte da sCSE, caracterizada por um núcleo superficial e um escoamento bem definido nos primeiro 200 m, se estendendo até o nível de referência. Com velocidade máxima de 40 cm s⁻¹, teve seu transporte estimado em 4,1 Sv acima de 1000 m. A SNB e a sCSE são separadas a nível sub-picnoclínico por um fluxo de direção sul que se estende de 200 m a 1000 m de profundidade.

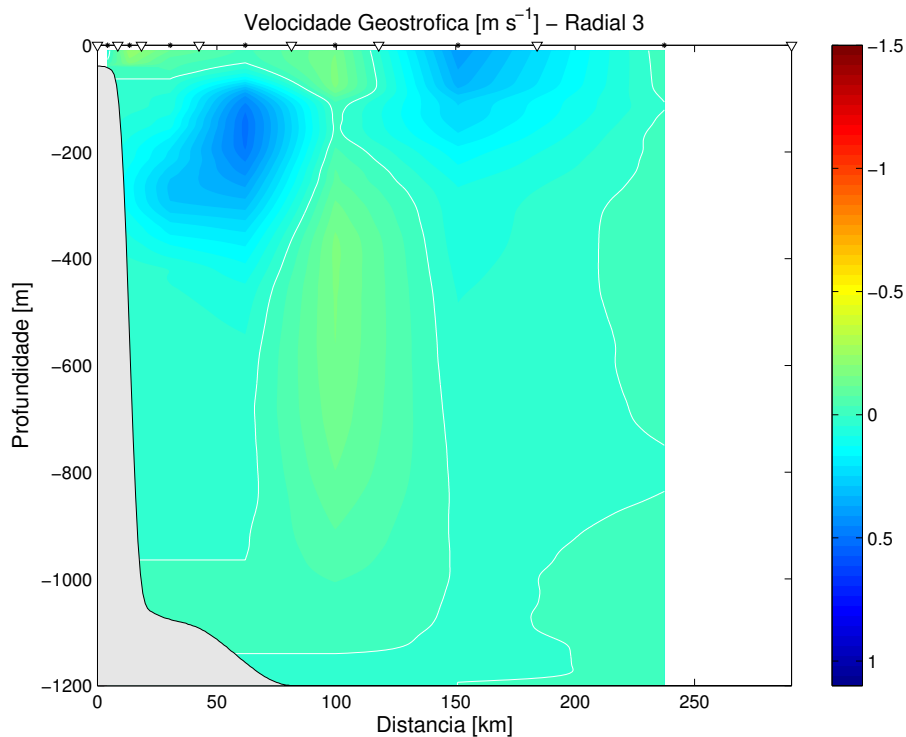


Figura 14: Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondentes à Radial 3.

Nas Radiais 4 (7°S, Figura 15) e 5 (6°S, Figura 16) é observado um aumento de

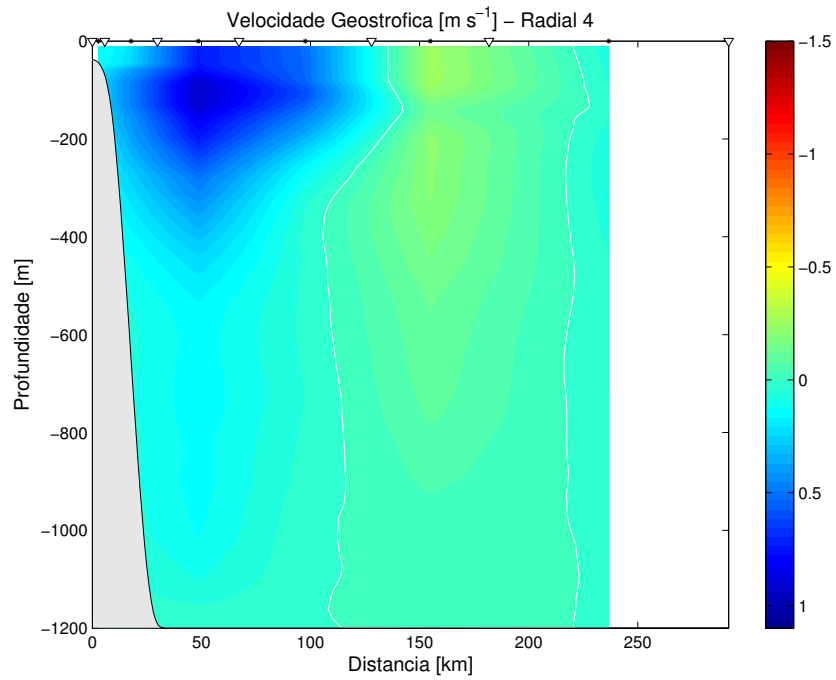


Figura 15: Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 4.

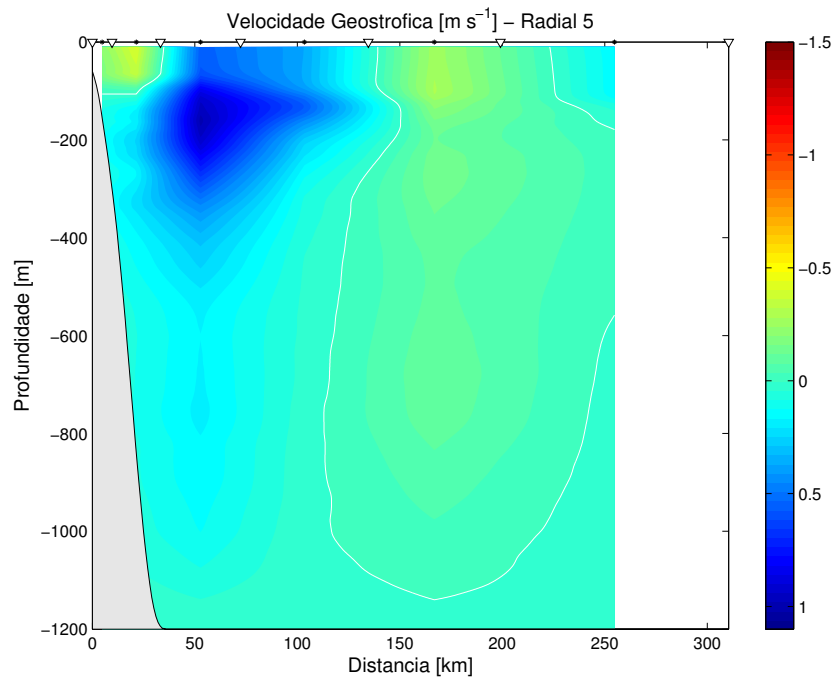


Figura 16: Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 5.

quase 300% no transporte da SNB em relação à Radial 3, resultando em 22,8 Sv e 22,2

Sv de transporte, respectivamente. Nestas seções, a SNB se apresenta com uma nova configuração, mais larga (120 km) e rasa, com núcleo em 100-150 m de profundidade. À leste da SNB é observada uma inversão da direção da corrente em ambas as seções, mostrando um fluxo para sul com maior intensidade em superfície, mas ocupando toda a coluna d'água entre 0 m e 1200 m. O transporte de volume deste escoamento para sul foi calculado em 7 Sv nas duas seções, com velocidades máximas de 30 cm s^{-1} . A Radial 5 mostra ainda um escoamento superficial para sul sobre o talude, entre 0 m e 100 m, semelhante ao já observado nas Radiais 1 e 2.

A SNB, na seção de velocidades correspondente à Radial 6 (5°S , Figura 17), tem seu núcleo em 150 m de profundidade, com velocidades máximas ultrapassando 100 cm s^{-1} . Concentrada entre 100 m e 300 m de profundidade, suas velocidades decaem rapidamente em direção a superfície e entre 300 m e 400 m. Nesta seção, com latitude média de 5°S , observa-se, em 150 m de profundidade, uma projeção da SNB a leste de seu núcleo, com 80 m de espessura e 80 km de extensão. Esta feição, semelhante a uma língua, mostra velocidades acima de 20 cm s^{-1} . Na porção leste da seção encontra-se um escoamento sub-termoclínico, representado pela inversão de direção da componente de velocidade normal à seção. Este escoamento tem seu núcleo em 200 m de profundidade, velocidade máxima de 28 cm s^{-1} e transporte de 13,2 Sv. Entretanto deve-se ressaltar que a feição não foi totalmente resolvida pela seção, comprometendo a estimativa de transporte.

A Figura 18 inferior apresenta a distribuição de velocidades baroclínicas relativas para a Radial 7 ($4^\circ30'\text{S}$). Nesta seção, de orientação quase meridional, a componente oeste-noroeste da SNB mostra um escoamento largo com núcleo em 120 m de profundidade a 80 km da estação mais rasa. Nota-se que as velocidades positivas se estendem, nos primeiros 200 m, até o limite da seção, não sendo portanto totalmente resolvida. Sub-picnoclinicamente ocorre um escoamento de direção oposta, como o encontrado na Radial 6. Porém, na Radial 7 este escoamento se apresenta com menor intensidade (16 cm s^{-1}) e transporte (3,2 Sv), mas também não é totalmente resolvido pela seção.

Assim, observa-se que a SNB é a única feição presente em todas as seções estudadas neste trabalho. O posicionamento mais profundo da SNB nas radiais mais ao sul deste trabalho, comparativamente às outras radiais, indicam que a SNB se origina de um escoamento mais profundo. Esta informação corrobora os padrões de grande-escala propostos

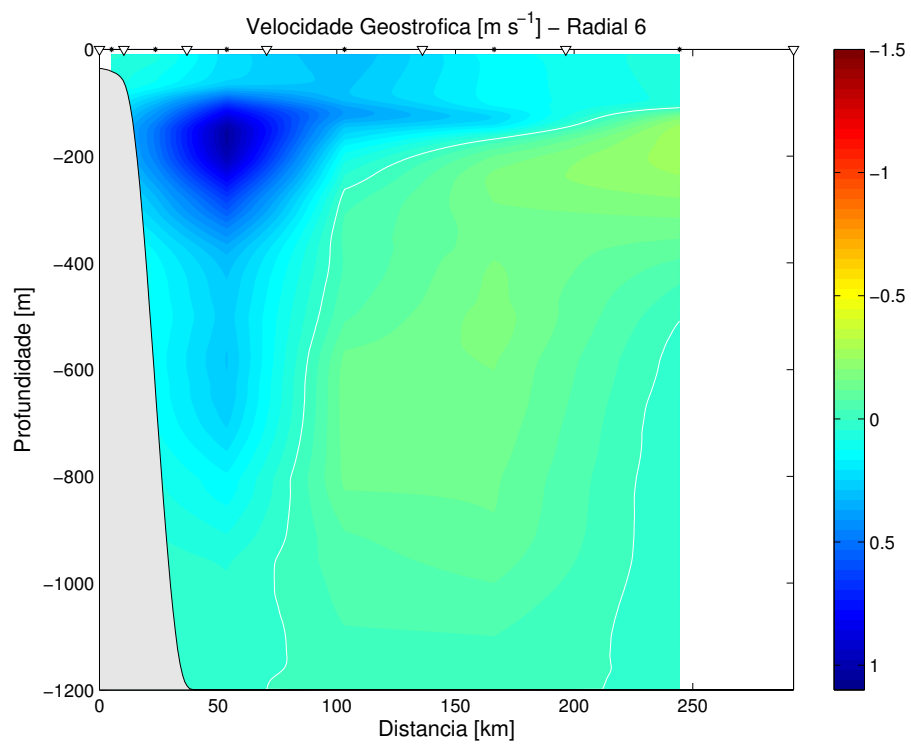


Figura 17: Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 6.

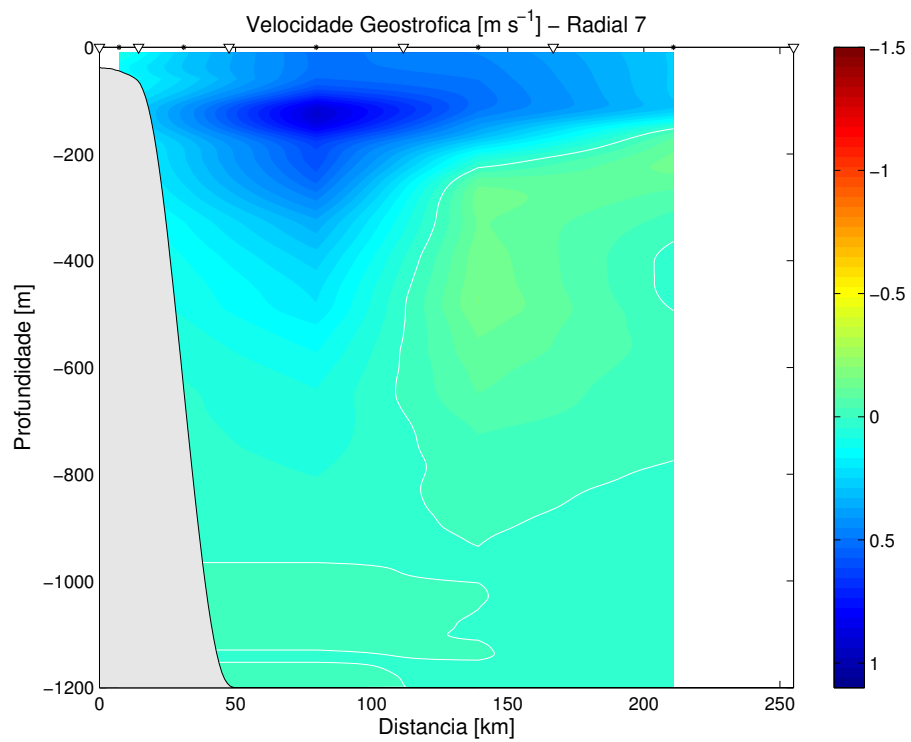


Figura 18: Distribuição em seção das velocidades baroclínicas relativas correspondente à Radial 7.

por *Stramma & England* (1999) e os resultados de meso-escala apresentados por *Soutelino* (2005), que propõe que a SNB se origina provavelmente da fusão da CCI e da sCSE.

A Tabela 1 mostra o transporte calculado para as radiais deste trabalho, e compara ainda o transporte total da SNB com os resultados de *Silveira et al.* (1994) para radiais próximas ou coincidentes. Percebe-se que, de uma forma geral, os valores de transporte encontrados estão condizentes a literatura, apesar de algumas sensíveis diferenças, como nas Radiais 2 e 3. É possível que tais diferenças se devam a erros intrínseco à quase-sinopticidade da grade amostral, bem como a variações temporais da SNB. Pode ter também havido ainda contaminação do sinal (*aliasing*) por maré interna, já que em nenhum momento foi aplicado um filtro para se eliminar ruídos deste tipo. Entretanto, tais diferenças não parecem comprometer os resultados nem sua interpretação. Assim, voltando à Tabela 1, nota-se que seguindo para norte, há uma perda de 12 Sv do transporte da SNB entre as Radiais 1 e 3. *Silveira et al.* (1994) encontra uma redução de 9,5 Sv do volume da SNB entre as latitudes destas radiais, entretanto o transporte mínimo da SNB que o mesmo autor encontrou foi de 14,2 Sv, bem acima do valor encontrado pelo presente estudo. Seguindo seu escoamento, a SNB ganha volume na Radial 4. Esse ganho provavelmente está associado à incorporação de parte da sCSE e da cCSE, que chegam zonalmente na região. Porém esta hipótese não pode ser provada pelo presente estudo, pois as seções estudadas nesta área tem orientação tendenciosamente paralela ao provável sentido de escoamento da CSE, e, como já sabemos, o Método Dinâmico só nos permite inferir velocidades normais às seções. Analisando ainda a tabela de transporte, verificamos que há progressivamente um aumento do percentual do transporte total correspondente às camadas superficiais. A SNB entra na área de estudo em 10°S com apenas 16,9% de seu transporte nos primeiros 150 m e sai da área de estudo em 4° 30'S com 52% na mesma camada. E ainda, ao longo de seu escoamento aqui estudado a SNB ganha 5,8 Sv, chegando ao transporte máximo encontrado de 23,7 Sv na seção mais ao norte.

A extensão da SNB em forma de língua, encontrada na Radial 6, também foi encontrada por outros autores na mesma latitude. Apesar de não podermos afirmar com certeza, esta feição parece ser um indício da contribuição da SNB para o escoamento

Tabela 1: Transporte de volume da SNB nas radiais deste trabalho, comparado com o transporte de *Silveira et al.* (1994). Valores em Sverdrups ($1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Em parênteses o percentual do transporte total.

| <i>Radiais</i> | Neste estudo | | | <i>Silveira et al.</i> 1994 |
|----------------|---------------------|----------------|-----------------|--------------------------------|
| | <i>0 a 150</i> | <i>0 a 250</i> | <i>0 a 1000</i> | <i>0 a 1000</i> |
| 1 | 3 (16.9) | 6.7 (37.4) | 17.9 | 24.5 |
| 2 | 2.6 (23) | 5.3 (46.4) | 11.5 | 17.2 |
| 3 | 1.3 (22.2) | 3.4 (58.5) | 5.9 | 14.2 |
| 4 | 9.3 (40.8) | 14.3 (62.9) | 22.8 | 17.3 |
| 5 | 6.7 (30.1) | 12.3 (55.6) | 22.2 | 21.6 |
| 6 | 7.8 (36.8) | 13.2 (62.1) | 21.3 | 19.9 |
| 7 | 12.4 (52.3) | 17.5 (73.9) | 23.7 | 24.9 |

subtermoclínico encontrado a nordeste da SNB. O escoamento subtermoclínico mencionado tem as características da SSE, bem como o escoamento semelhante encontrado na Radial 7. Pelo formato desta provável SSE nestas duas radiais, propõe-se que a mesma não esteja fluindo exatamente normal às seções, o que é condizente com sua tendência de fluir zonalmente. Seu transporte foi estimado em 13,2 Sv na Radial 6 e 3,2 Sv na Radial 7. Nesta última radial, chama a atenção a intensificação em superfície da SNB, e apesar do núcleo da estrutura ainda se posicionar abaixo da superfície, este padrão indica a transição entre a SNB e a CNB. O seu prolongamento em superfície para nordeste, por sobre a SSE, indica que nesta seção a SNB já se encontra em fusão com a cCSE e provavelmente começa a receber volume da eCSE.

Outros escoamentos distintos podem ser destacados, como a porção da sCSE encontrada na Radial 3, bem como os fluxos para sul com núcleo em superfície nas Radiais 4 e 5 e os escoamentos superficiais sobre o talude nas Radiais 1, 2 e 5. A primeira interpretação dada para a parte da sCSE evidente na Radial 3 é de que ela provavelmente se fundiria a SNB, caracterizando a contribuição da CSE para esta. Entretanto, uma outra alternativa é de que este escoamento para norte represente a volta de sentido horário da sCSE que se

vira para leste gerando a CCSE, encontrada por *Stramma (1991)* e *Silveira et al. (1994)*. Seguindo por esta hipótese, os escoamentos para sul na porção leste das Radiais 4 e 5 representariam a volta anti-horária da parte da cCSE que alimenta a CCSE, corroborando os mapas de topografia dinâmica de *Silveira et al. (1994)*.

Há ainda os fluxos contrários à SNB, sobre o talude. É provável que estes fluxos sejam vórtices de borda. Ao passar por áreas mais rasas do talude a SNB pode ganhar vorticidade potencial, gerando estes vórtices. Entretanto também há chance dessas feições terem surgido, mais excepcionalmente, à partir de feições geradas pelo procedimento de extrapolação do geopotencial, mencionado na seção de métodos. Podemos verificar tal hipótese analisando a distribuição da densidade potencial nas radiais, como mostrado na Figura 19 para a Radial 2. Como a densidade potencial não é extrapolada, qualquer feição observada nesta seção é resultado direto dos dados hidrográficos, não havendo qualquer possibilidade de erro. Nesta seção, observamos as isopicnais com grande inclinação negativa para leste, o que, segundo o método dinâmico, resulta em um escoamento baroclínico para sul. Assim comprova-se que tais feições realmente existem e foram amostradas, de

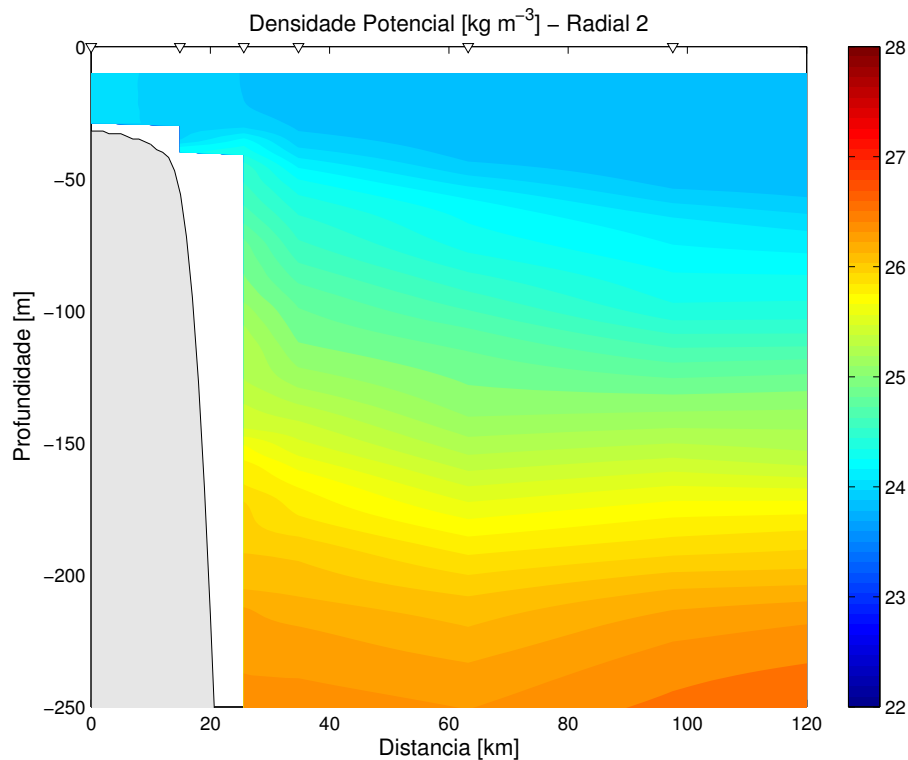


Figura 19: Distribuição da densidade potencial na Radial 2, mostrando a inclinação negativa das isopicnais para leste.

fato, pelas radiais hidrográficas. É provável ainda que estas mesmas feições não tenham sido encontradas em outras seções por falta de melhor definição amostral, ou seja, radiais com poucas estações hidrográficas sobre o talude, e portanto incapazes de resolver as estruturas adequadamente.

6 Considerações Finais

6.1 Conclusões

A análise do escoamento baroclínico da SNB através das seções de velocidade se mostrou útil para o entendimento de como este escoamento se comporta entre 10°S e 5°S. Assim, resumindo os resultados encontrados, podemos concluir, a respeito do comportamento do escoamento baroclínico da SNB na área de estudo, que:

- a SNB é uma corrente presente em toda a extensão meridional da área de estudo, sempre com núcleo subsuperficial e com velocidades relativamente altas;
- ao sul, seu núcleo mais profundo e sua posição mais próxima do talude que em seções mais ao norte são indícios de que é alimentada, em parte, pela CCI;
- ao longo de seu curso se torna cada vez mais rasa e larga. Adquiri volume progressivamente maior de 0-1000 m, sendo responsável por esse aumento as camadas mais rasas, já que nas porções mais profundas perde volume;
- no limite norte da área de estudo a SNB já se apresenta com mais da metade de seu volume nos primeiros 150 m, e está em transição para se tornar a CNB;
- apesar de observada, a variação de seu transporte ao longo de seu curso não pode ser totalmente explicada pela análise efetuada, já que a entrada e saída de volume provavelmente se dão por escoamentos paralelos às seções;

Além disso, a respeito dos sítios de geração da CCSE e da SSE, e de outras feições encontradas, podemos dizer que:

- foi encontrada à leste de 34°W, entre 8° 15'S e 7°S, uma aparente convergência que deve se tratar de uma volta horária da sCSE e anti-horária da cCSE, que se viram para leste e se juntam para formar a CCSE;
- foi encontrado o escoamento subtermoclínico da SSE no limite nordeste da área de estudo, e que provavelmente é alimentado por águas da SNB;
- foram achados ainda vórtices de borda, provavelmente não relatados em estudos anteriores por falta de resolução amostral necessária.

6.2 Sugestões para estudos futuros

Sugere-se então, para que possa haver um melhor entendimento da circulação da SNB, bem como de todo o Atlântico Sul Tropical Oeste, que nos próximos estudos, porventura realizados nesta área, se faça:

- o mapeamento horizontal de função de corrente, de modo a poder se verificar a geração da CCSE e da SSE, bem como a contribuição de outras correntes para estas;
- a interpolação do campo de função de corrente, mencionado no item anterior, por análise objetiva, que elimina feições geostróficas de escala menor que a meso-escala, como marés internas, além de funcionar como um filtro espaço-temporal ;
- e a análise do grau de geostrofia das correntes, utilizando adicionalmente dados de ADCP, usados em associação com dados de vento para avaliação da deriva de Ekman.

Referências

- Arnaut, S., 1987: Tropical atlantic geostrophic currents and ship drifts. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **92**(C5), 5076 – 5088.
- Goes, M., R. Molinari, I. C. A. Silveira, & I. Wainer, 2005: Retroreflections of the north brazil current during february 2002. *Deep-Sea Research Part I - Oceanographic Research Papers*, **52**(4), 647 – 667.
- Johns, W. E., T. N. Lee, F. A. Schott, R. J. Zantopp, & R. H. Evans, 1990: The north brazil current retroreflection: Seasonal sructure and eddy variability. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 22.103–22.120.
- Mamayev, O., 1975: Temperature-salinity analysis of world ocean waters. Elsevier, Amsterdam, 374 págs.
- Mattos, R. A., 2003: Avaliação da geostrofia do sistema corrente do brasil ao largo de cabo frio (23°s. Trabalho de Graduação (Graduação em Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 45pp..
- Molinari, R. L., 1982: Observations of eastward currents in the tropical south atlantic ocean: 1978-1980. *Journal of Geophysical Research*, **87**(C12), 9707 – 9714.
- Molinari, R. L., 1983: Observations of near-surface currents and temperature in the central and western tropical atlantic-ocean. *Journal of Geophysical Research-Oceans and Atmospheres*, **88**(NC7), 4433 – 4438.
- Peterson, R. G. & L. Stramma, 1991: Upper level circulation in the south atlantic ocean. *Progress in Oceanography*, **26**(1), 1 – 73.
- Rennel, J., 1832: An investigation of the currents of the Atlantic Ocean and of those which prevail between the Indian Ocean and the Atlantic. J.G. & F., Rivington, 299 págs.
- Schott, F. A., M. Dengler, P. Brandt, K. Affler, J. Fischer, B. Bourlès, Y. Gouriou, R. L. Molinari, & M. Rhein, 2003: The zonal currents and transports at 35°w in the tropical atlantic. *Geophysical Research Letters*, **30**(7), 1 – 4.

- Schott, F. A., J. Fischer, & L. Stramma, 1998: Transports and pathways of the upper-layer circulation in the tropical atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, **28**, 1904 – 1928.
- Silveira, I. C. A., W. Brown, & G. Flierl, 2000: Dynamics of the north brazil current retroflection region from the western tropical atlantic experiment observations. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **105**(C12), 28.559 – 28.583.
- Silveira, I. C. A., L. B. Miranda, & W. S. Brown, 1994: On the origins of the north brazil current. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **99**(C11), 22.501 – 22.512.
- Soutelino, R. G., 2005: Caracterização da estrutura baroclínica do sistema de correntes de contorno oeste ao largo da costa leste brasileira. Trabalho de Graduação (Graduação em Oceanografia) - Departamento de Oceanografia, Instituto de Geociências, Centro de Tecnologia e Ciências Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 50pp..
- Stramma, L., 1991: Geostrophic transport of the south equatorial current in the atlantic. *Journal of Marine Research*, **49**(2), 281 – 294.
- Stramma, L. & M. England, 1999: On the water masses and mean circulation of the south atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, **104**(C9), 20.863 – 20.883.
- Stramma, L., J. Fischer, P. Brandt, & F. Schott, 2003: Interhemispheric Water Exchange in the Atlantic Ocean, capítulo Circulation, variability and near-equatorial meridional flow in the central tropical Atlantic, págs. 1–22. 68. Elsevier Oceanographic Series.
- Stramma, L., J. Fischer, & J. Reppin, 1995: The north brazil undercurrent. *Deep-Sea Research Part I - Oceanographic Research Papers*, **42**(5), 773 – 795.
- Stramma, L., M. Rhein, P. Brandt, M. Dengler, C. Boning, & M. Walter, 2005: Upper ocean circulation in the western tropical atlantic in boreal fall 2000. *Deep-Sea Research Part I - Oceanographic Research Papers*, **52**(2), 221 – 240.
- Stramma, L. & F. Schott, 1999: The mean flow field of the tropical atlantic ocean. *Deep-Sea Research Part II - Topical Studies in Oceanography*, **46**(1-2), 279 – 303.

Sverdrup, H. U., M. W. Johnson, & R. H. Fleming, 1942: *The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology*. Prentice-Hall, New Jersey, 1087 págs.

Tomczak, M. & J. Godfrey, 2001: *Regional Oceanography: an Introduction*. Pergamon, <http://www.lei.furg.br/ocfis/mattom/regoc/pdfversion.html>, pdf 1.0 edição, 422 págs.

Urbano, D. F., 2005: *Dinâmica da contra-corrente norte equatorial na região oeste do oceano atlântico tropical*. Dissertação de Doutorado em Ciências (Área de Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 116pp..