



COPPE/UFRJ

A ESTRUTURA VERTICAL DOS VÓRTICES DA CORRENTE NORTE DO
BRASIL

Ana Paula Morais Krelling

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Rio de Janeiro
Julho de 2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

A ESTRUTURA VERTICAL DOS VÓRTICES DA CORRENTE NORTE DO
BRASIL

Ana Paula Morais Krelling

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Examinada por:

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph.D.

Prof. Susana Beatriz Vinzon, D.Sc.

Prof. Ilson Carlos Almeida da Silveira, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
JULHO DE 2010

Krelling, Ana Paula Morais

A Estrutura Vertical dos Vórtices da Corrente Norte do Brasil/Ana Paula Morais Krelling. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XIV, 60 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Oceânica, 2010.

Referências Bibliográficas: p. 57 – 60.

1. Corrente Norte do Brasil. 2. Vórtices. I. Paiva, Afonso de Moraes *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*Dedico esta dissertação a todos
que de alguma forma
contribuíram para sua realização.*

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo constante apoio e por sempre acreditarem em mim, me incentivando a seguir minha vocação profissional.

À amiga Mariela Gabioux, que me mostrou o caminho para a realização deste sonho.

Ao meu orientador Afonso Paiva que, aceitando me orientar, me guiou por este caminho.

Aos membros da banca, por aceitarem o convite para participar da mesma.

Aos amigos de longe, de sempre e para sempre, cujo apoio foi imprescindível para completar esta jornada: Paula, Carla, Manoela, Marcelo.

Ao meu grande amigo de longe Bitar.

À minha companheira de batalhas Paula Pagliarini, pelo constante incentivo.

A todos da minha turma do mestrado, pelo companheirismo e apoio, especialmente nos grupos de estudo durante o difícil primeiro período.

A Soyla e Betina, pelos maravilhosos momentos juntas, de alegrias, decisão, descontração e desabafo.

Às minhas amigas e companheiras de casa, Soyla e Aline, por toda a paciência que tiveram comigo em todos os momentos difíceis.

A todos os membros do GRUPO, por todo o tempo, atenção e solicitude a mim dirigidos.

Aos meus revisores de texto Mariela, Guilherme, Soyla, Natália, Paulo e Alberto.

A todo o pessoal do LDSC.

Às secretárias Adriana, Elisa, Glaice e Marise, por todo o apoio e especialmente pelos gostosos abraços nos momentos mais convenientes.

À Stephanie, Roger e família, por abrirem as portas de sua casa para mim.

A Alberto Akel, pelo abrigo, refeições, apoio técnico, revisão de texto, incentivo e constante e imprescindível companheirismo durante o mestrado.

À equipe do projeto CoppeTeX, especialmente Vicente H. F. Batista, por toda a atenção e esclarecimentos a todas as minhas dúvidas relacionadas ao LaTeX.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro.

E a todos os demais que de alguma forma me ajudaram a concretizar este sonho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

A ESTRUTURA VERTICAL DOS VÓRTICES DA CORRENTE NORTE DO BRASIL

Ana Paula Morais Krelling

Julho/2010

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Programa: Engenharia Oceânica

A estrutura vertical dos vórtices da Corrente Norte do Brasil (CNB) foi investigada a partir dos resultados de uma simulação numérica global em alta resolução do modelo *Hybrid Coordinate Ocean Model* - HYCOM. Foi identificada formação de vórtices em diferentes porções da coluna d'água (superfície, termoclina, subtermoclina), com diferentes mecanismos de formação, em diferentes regiões. Vórtices superficiais são formados principalmente na retroflexão superficial, em aproximadamente 50°W , a partir da chegada à fronteira oeste de sinais que se propagam na Contracorrente Norte Equatorial (CCNE). Vórtices de termoclina são formados na retroflexão da CNB que alimenta a Subcorrente Equatorial (SCE), em cerca de 44° - 46°W , a partir de sinais que se propagam na SCE. Vórtices de subtermoclina são formados em aproximadamente 45 - 51°W , e embora nem todos tenham tido seu mecanismo de geração identificado, parte é formada por propagação vertical do sinal de vórtices de termoclina. Apesar de diferentes mecanismos de geração, foram identificadas interações entre os vórtices de porções da coluna d'água distintas ao longo de sua trajetória. Há propagação vertical de sinal, que pode implicar no aprofundamento de um vórtice, ou no desprendimento de vórtices tanto da retroflexão que alimenta a CCNE quanto da retroflexão que alimenta a SCE, catalisado pela existência, na mesma área, de vórtices em uma porção inferior da coluna d'água. Os resultados sugerem que a superposição entre os vórtices formados em diferentes níveis da coluna d'água e a posição relativa dos mesmos ao longo de sua trajetória implicam em uma variação espaço-temporal da estrutura vertical dos vórtices da Corrente Norte do Brasil.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

THE VERTICAL STRUCTURE OF THE NORTH BRAZIL CURRENT RINGS

Ana Paula Morais Krelling

July/2010

Advisor: Afonso de Moraes Paiva

Department: Ocean Engineering

The vertical structure of the North Brazil Current (NBC) Rings is investigated through analysis of the results of a high-resolution global numerical simulation carried on with the *Hybrid Coordinate Ocean Model* - HYCOM. Rings were generated in different portions of the water column (surface layer, thermocline, subthermocline), with different generation mechanisms in distinct areas. Surface rings are formed mainly at the surface retroflection, at 50°W , and are associated with signals propagating in the North Equatorial Countercurrent (NECC). Thermocline rings are generated at the retroflection that feeds the Equatorial Undercurrent, at 44° - 46°W and are associated with signals propagating in the Equatorial Undercurrent (EUC). The subthermocline rings were formed between 45 - 51°W , and while not all of them had their generation mechanism identified, some were generated by downward momentum flux. In spite of the different generation mechanisms, interactions among rings of different levels were identified along their path. There is a downward momentum flux which might lead to the deepening of a ring to other portion of the water column, as well as to the detachment of rings either from the retroflection which feeds the NECC or the retroflection which feeds the EUC, catalyzed by the existence, in the same area, of rings in a lower part of the water column. The results suggest that the superposition between rings formed in different levels of the water column and their relative position along their path cause a space-time variation of the vertical structure of the North Brazil Current Rings.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 A Corrente Norte do Brasil e sua relação com o Sistema Equatorial de Correntes	5
2.1.1 A Contracorrente Norte Equatorial	8
2.1.2 A Subcorrente Equatorial	9
2.2 Os vórtices da Corrente Norte do Brasil	10
2.2.1 Estrutura Vertical	12
3 Metodologia	17
3.1 O modelo HYCOM e a Simulação Global	17
3.2 Metodologia de Análise dos Resultados	19
4 Resultados e Discussões	22
4.1 Corrente Norte do Brasil	25
4.2 Contracorrente Norte Equatorial e Subcorrente Equatorial	28
4.3 Os vórtices da Corrente Norte do Brasil	31
4.3.1 Formação de vórtices	32
4.3.2 Relação com ondas Equatoriais	37
4.3.3 Interações entre regiões da coluna d'água	44
5 Sumário e Conclusões	53
Referências Bibliográficas	57

Lista de Figuras

1.1	Desenho esquemático da circulação no Atlântico Equatorial Oeste. A Corrente Norte do Brasil (CNB) acompanha a costa norte brasileira e em aproximadamente 7°N retroflete, alimentando a Contracorrente Norte-Equatorial (CCNE). Desta retroflexão são desprendidos vórtices anticiclônicos que transladam para noroeste.	1
2.1	Visão esquemática da circulação na área de estudo. A Subcorrente Norte do Brasil (SNB) segue a costa nordeste brasileira em subsuperfície, recebendo contribuição superficial da Corrente Sul Equatorial central (CSEc) a partir de cerca de 5°S. O fluxo combinado da SNB e CSEc é chamado Corrente Norte do Brasil (CNB). Ao longo da trajetória para noroeste a CNB recebe contribuições da Corrente Sul Equatorial norte (CSEn). Em aproximadamente 50°W, a CNB retroflete, alimentando a Contracorrente Norte-Equatorial (CCNE). Em termoclina, a CNB retroflete em aproximadamente 45°W, alimentando a Subcorrente Equatorial (SCE) e a Subcorrente Norte-Equatorial (SNE). Baseado em: GOES <i>et al.</i> (2005), STRAMMA e SCHOTT (1999).	7
3.1	Seção com profundidade instantânea das camadas, ilustrando o esquema de coordenadas híbridas do modelo HYCOM.	18
3.2	Campo instantâneo de velocidade em superfície para o dia 19 de janeiro de 2005. As linhas pretas correspondem às isolinhas de velocidade meridional de 0,2 m/s. A linha preta espessa corresponde à posição da retroflexão CNB-CCNE para este dia, representada pela posição da borda leste da isolinha de velocidade meridional de 0,2 m/s correspondente à retroflexão.	21
4.1	Campo médio de velocidades em superfície ($\sigma_2=31.5$). A CCNE é identificada em aproximadamente 6°N, e as porções central e norte da Corrente Sul Equatorial (CSEc e CSEn) em cerca de 5°S -0°e 0°- 5°N, respectivamente. A retroflexão CNB-CCNE média é observada entre 49°- 53°W, 5°-9°N.	23

4.2	Campo médio de velocidades em termoclina ($\sigma_2=34.25$). Observa-se em aproximadamente 44°W a retroflexão CNB-SCE, juntamente com uma extensão da mesma, indicando a região preferencial de translação de vórtices. Como assinaturas do campo superficial médio de velocidade, podem ser identificadas a retroflexão superficial em 48°-51°W, além da expressão em termoclina da CCNE, em aproximadamente 6°N.	24
4.3	Campo médio de velocidades em subtermoclina ($\sigma_2=35.8$). A CNB segue sobre o talude da costa norte da América do Sul, apresentando recirculações, expressão da atividade de mesoescala presente na região.	25
4.4	Velocidade paralela à costa média em 44°W, representando a CNB média nesta longitude. Velocidades negativas são em direção noroeste, e positivas em direção sudeste. Pode-se observar em cerca de 0,5 °S dois núcleos sobrepostos: um superficial, referente ao fluxo superficial da CSEc, e outro em subsuperfície, referente à SNB. As isolinhas de velocidade são apresentadas em preto, com intervalos de 0,1 m/s.	26
4.5	Série temporal de transporte da CNB até 1000 m em 47°W.	27
4.6	Espectro da série temporal de transporte da CNB até 1000 m em 47°W, para os três anos de resultados, com um pico em aproximadamente 40 dias. A barra à esquerda representa o intervalo de confiança estatística do espectro.	27
4.7	Velocidades zonais médias mensais em superfície em 38°W. É verificada a migração da CCNE entre 3°e 10°N. No período compreendido entre maio e julho a SCE emerge à superfície, entre 0°e 2°N. A CNB se situa junto à costa, seguindo para oeste, ao longo de todo o ano, entre 0°e 2°S. O fluxo para oeste que se vê a norte da CNB corresponde à CSEn, até cerca de 4°N. As isotacas estão em intervalos de 0,1 m/s.	29
4.8	Campos médios mensais de velocidade superficial, ilustrando os extremos do padrão de circulação ao longo do ano.	30
4.9	Trajetórias dos vórtices de superfície.	31
4.10	Trajetórias dos vórtices de termoclina.	31
4.11	Trajetórias dos vórtices de subtermoclina.	32

4.12	Localização do centro dos vórtices intensificados em superfície ao longo do tempo. As linhas cheias indicam a trajetória dos vórtices desprendidos da retroflexão CNB-CCNE; as linhas tracejadas indicam os vórtices que não foram originados da retroflexão. Em preto é assinalada a posição da retroflexão superficial ao longo do tempo. Os círculos e quadrados indicam o momento a partir do qual cada vórtice foi identificado e começou a ter sua trajetória marcada; os círculos assinalam vórtices que são reabsorvidos pela retroflexão CNB-CCNE, enquanto quadrados indicam vórtices que deixam o domínio ou se desintegram antes de deixar o domínio.	33
4.13	Localização do centro dos vórtices identificados em termoclina ao longo do tempo. As linhas cheias indicam a trajetória dos vórtices desprendidos da retroflexão CNB-SCE; as linhas tracejadas indicam os vórtices que não foram originados da retroflexão. Os círculos e quadrados indicam o momento a partir do qual cada vórtice foi identificado e começou a ter sua trajetória marcada. Círculos assinalam vórtices que são reabsorvidos pela retroflexão CNB-SCE, enquanto quadrados indicam vórtices que deixam o domínio ou se desintegram antes de deixar o domínio.	35
4.14	Localização do centro dos vórtices identificados em termoclina ao longo do tempo. Os quadrados indicam o momento a partir do qual o vórtice foi identificado e começou a ter sua trajetória marcada.	36
4.15	Velocidade meridional em superfície ao longo de uma seção zonal em 6°N, latitude onde se observa a CCNE média, ao longo do tempo.	38
4.16	Espectro dos sinais em velocidade meridional identificados em uma seção em 6°N, ao longo da CCNE durante o período estudado.	39
4.17	Campo médio de velocidades em termoclina, evidenciando a região preferencial de translação de vórtices.	40
4.18	Velocidade em termoclina perpendicular ao eixo indicado na Figura 4.17, ao longo do período estudado. Os quadrados e círculos indicam o momento e longitude em que um vórtice é formado.	41
4.19	Espectro dos sinais em velocidade meridional identificados em uma seção ao longo da SCE e em parte da região de translação de vórtices de termoclina durante o período estudado.	42
4.20	Campo médio de velocidades em subtermoclina, evidenciando o eixo utilizado para análise dos sinais verificados em velocidade.	42
4.21	Velocidade em subtermoclina perpendicular ao eixo indicado na Figura 4.20, ao longo do período estudado. Os quadrados verdes indicam o momento e longitude em que um vórtice é formado.	43
4.22	Espectro dos sinais em velocidade meridional identificados em subtermoclina durante o período estudado.	44

4.23	Trajetória meridional dos vórtices da CNB ao longo do tempo. Em preto observa-se a posição da retroflexão superficial (CNB-CCNE), em vermelho os vórtices superficiais, em azul os vórtices identificados em termoclina e em verde os vórtices de subtermoclina. As letras identificam o tipo de processo que ocorre e os quadrados asinalam casos que exemplificam os quatro processos e que serão descritos em detalhe no texto.	45
4.24	Evolução espaço-temporal de um processo do tipo A. Esquerda: Campos de velocidade para a superfície (vermelho) e termoclina (azul). Direita: seções de velocidade zonal, cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade zonal nula.	46
4.25	Evolução espaço-temporal de um processo do tipo B. Esquerda: Campos de velocidade para a termoclina (azul) e subtermoclina (verde). Direita: seções de velocidade zonal, cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade zonal nula.	48
4.26	Evolução espaço-temporal de um processo do tipo C. Esquerda: Campos de velocidade para a superfície (vermelho) e termoclina (azul). Direita: seções de velocidade perpendicular à seção cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade nula.	50
4.27	Evolução espaço-temporal de um processo do tipo D. Esquerda: Campos de velocidade para a superfície (vermelho) e termoclina (azul). Direita: seções de velocidade zonal, cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade zonal nula.	52

Lista de Tabelas

2.1	Estimativas de taxa de desprendimento de vórtices da retroflexão da Corrente Norte do Brasil.	12
3.1	Valores de densidade correspondentes a cada camada da simulação do modelo HYCOM cujos resultados são analisados no presente estudo.	19
4.1	Características principais dos vórtices intensificados em superfície.	34

Lista de Abreviações

CCNE Contracorrente Norte Equatorial

CNB Corrente Norte do Brasil

CNE Corrente Norte Equatorial

CSEc Corrente Sul Equatorial Central

CSEn Corrente Sul Equatorial Norte

CSEs Corrente Sul Equatorial Sul

HYCOM Hybrid Coordinate Ocean Model

MICOM Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model

SCE Subcorrente Equatorial

SNB Subcorrente Norte do Brasil

SNE Subcorrente Norte Equatorial

ZCIT Zona de Convergência Inter-Tropical

Capítulo 1

Introdução

A Corrente Norte do Brasil (CNB) é a corrente de contorno oeste que fecha o giro equatorial do Oceano Atlântico, seguindo sobre o talude da costa norte da América do Sul. Em aproximadamente 7°N , a porção superficial da CNB se curva sobre si mesma, isto é, retroflete, alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) (FLAGG *et al.*, 1986) (Figura 1.1). Desta retroflexão, são desprendidos entre 2 e 7 vórtices anticiclônicos por ano (FRATANTONI *et al.*, 1995; JOHNS *et al.*, 2003), que se propagam para noroeste, transportando águas do Atlântico Sul para o hemisfério norte, contribuindo assim com o transporte interhemisférico de massa pela região.

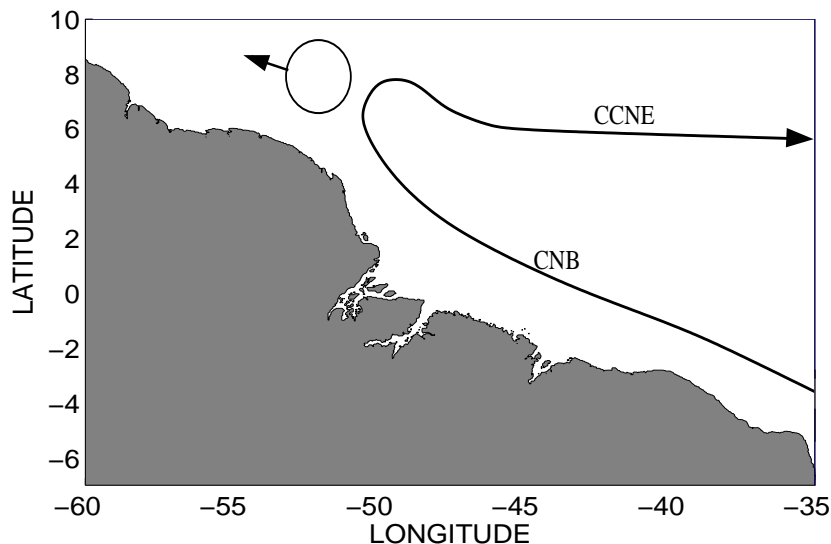


Figura 1.1: Desenho esquemático da circulação no Atlântico Equatorial Oeste. A Corrente Norte do Brasil (CNB) acompanha a costa norte brasileira e em aproximadamente 7°N retroflete, alimentando a Contracorrente Norte-Equatorial (CCNE). Desta retroflexão são desprendidos vórtices anticiclônicos que transladam para noroeste.

O fenômeno de desprendimento dos vórtices da retroflexão da CNB é documentado na literatura tanto a partir de estudos observacionais (JOHNS *et al.*, 1990; SCHOTT *et al.*, 1998; FRATANTONI *et al.*, 1995; FRATANTONI e RICHARDSON, 2006; WILSON *et al.*, 2002; JOHNS *et al.*, 2003) quanto a partir de resultados de modelagem numérica (BARNIER *et al.*, 2001; JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI, 2003; GARRAFFO *et al.*, 2003; SILVEIRA *et al.*, 2000).

Segundo estes estudos, os vórtices apresentam características como diâmetro superficial, magnitude da velocidade máxima e estrutura vertical, que variam para cada vórtice e em alguns casos para um mesmo vórtice, ao longo do espaço e tempo. Destas, a estrutura vertical de velocidades é uma das características que apresenta maior variação. A extensão vertical de um vórtice pode variar de 200 a 2000 metros (WILSON *et al.*, 2002). No primeiro caso, trata-se de um vórtice raso que alcança somente a porção superficial da coluna d'água, no segundo, um vórtice profundo que transporta grande volume. A localização do núcleo de máximas velocidades também apresenta variações, podendo ocorrer em superfície, no caso de um vórtice intensificado em superfície, ou em ~ 150 metros de profundidade, no caso de um vórtice intensificado em termoclina (WILSON *et al.*, 2002). Quanto à variação temporal da estrutura vertical de velocidades para um mesmo vórtice, FRATANTONI e RICHARDSON (2006), a partir de derivadores, descrevem o incremento da extensão vertical em ~ 500 metros ao longo de sua trajetória.

Quanto aos mecanismos que determinariam a estrutura vertical dos vórtices, JOHNS *et al.* (2003) apontam a variação do transporte da CNB como determinante para a sua extensão vertical. A partir de observações de fundeios correntográficos, os autores concluíram que, sendo todos os vórtices desprendidos da retroflexão, os mais profundos ocorreriam em períodos de maior transporte da CNB enquanto que os mais rasos aconteceriam em períodos de menor transporte. Já JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003), a partir de um modelo numérico, descrevem que a estrutura vertical dos vórtices estaria associada ao processo de formação dos mesmos, e conseqüentemente vórtices com estruturas verticais distintas entre si seriam gerados por processos distintos. Vórtices rasos, como descrito por JOHNS *et al.* (2003), seriam formados a partir de desprendimento da retroflexão. Por sua vez, vórtices profundos seriam originados pela superposição de vórtices superficiais e subsuperficiais, sendo estes últimos formados pela instabilização da porção intermediária da CNB, entre 300 e 1000 metros. Segundo JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003) os vórtices superficiais e subsuperficiais seriam estruturas independentes; esta sugestão é corroborada pelos estudos observacionais de FRATANTONI *et al.* (1995) e FRATANTONI e RICHARDSON (2006) a partir de fundeios correntográficos moorings¹,

¹fundeio com instrumentos a várias profundidades, em geral contendo correntômetros e sensores de temperatura e condutividade (Conductivity Temperature Depth - CTDs).

cruzeiros e derivadores. Ainda neste sentido, JOHNS *et al.* (2003) identificaram um vórtice com variação de suas propriedades ao longo da coluna d'água, apresentando uma parcela de água com características do Atlântico Norte entre duas parcelas de água do Atlântico Sul.

A evolução do conhecimento sobre os vórtices da CNB apresenta diferentes estágios. Enquanto as características em superfície das estruturas de mesoescala observadas já têm sido pesquisadas, a origem e evolução de seu perfil vertical ainda permanecem pouco conhecidos. Assim, a variação da estrutura vertical dos vórtices da CNB é um assunto ainda em aberto, sujeito a investigação.

Este trabalho tem por objetivo geral investigar as causas da variação da estrutura vertical destes vórtices e os processos que determinam esta variação. Para alcançar este objetivo são analisados resultados de uma simulação numérica em alta resolução horizontal ($1/12^\circ$) e vertical (32 camadas) global realizada com o modelo oceânico HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*).

Os resultados que serão analisados no presente estudo proporcionam uma abrangência espacial que permite a análise do processo de formação de vórtices tendo em vista processos de maior escala que podem influenciá-lo, assim como uma discretização temporal que permite a análise detalhada do processo de formação, translação e desintegração de vórtices. A discretização horizontal é adequada para a escala das feições em estudo, e aliada à discretização vertical, permite a análise do processo de formação de vórtices em diferentes níveis, o que é fundamental para a compreensão da gênese da estrutura vertical dos mesmos, assim como sua evolução.

A partir de uma análise preliminar dos resultados do modelo HYCOM, foi identificada formação independente de vórtices em diferentes porções da coluna d'água, sendo que a posição relativa destas feições daria origem às diferentes estruturas verticais de velocidade encontrados nos vórtices da CNB. Considerando estas interações como processo determinante para a caracterização vertical de velocidade dos vórtices da CNB, os objetivos específicos deste estudo são:

- caracterizar os vórtices de diferentes regiões da coluna d'água;
- investigar o processo de formação de vórtices em diferentes porções da coluna d'água;
- identificar e descrever as interações entre os vórtices de diferentes porções da coluna d'água;
- avaliar a importância do processo de formação de vórtices subsuperficiais.

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. No capítulo 2, encontra-se uma revisão da literatura sobre a circulação na região em estudo, assim como o fenômeno

de desprendimento de vórtices da Corrente Norte do Brasil e suas características gerais, enfatizando os tipos de estrutura vertical já documentados. No capítulo 3, são descritas as características principais da simulação cujos resultados são analisados e do modelo HYCOM, além da metodologia aplicada para análise dos resultados. Os resultados das análises são apresentados no capítulo 4, e as conclusões, no capítulo 5.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

A CNB é originada a partir do sistema equatorial de correntes, e mesmo após formada continua intimamente interligada a este, tanto recebendo contribuições quanto alimentando as correntes zonais integrantes deste sistema, a partir de retroflexões em diferentes longitudes e níveis. Duas das correntes alimentadas pela CNB, tratadas em maior detalhe neste estudo, têm seu fluxo proveniente quase que em sua totalidade da mesma: a Subcorrente Equatorial, a partir da retroflexão de uma porção da termoclina da CNB, e a Contracorrente Norte Equatorial, a partir de uma retroflexão superficial. A partir desta última são desprendidos vórtices cujas características superficiais foram estudadas, no entanto sua complexa estrutura vertical e seu mecanismo de formação ainda são assuntos pouco pesquisados. Na seção 2.1 é descrita a origem da CNB e sua relação com o sistema equatorial de correntes. Já a seção 2.2 descreve os vórtices da CNB, enfatizando sua estrutura vertical.

2.1 A Corrente Norte do Brasil e sua relação com o Sistema Equatorial de Correntes

A CNB tem sua origem em um conjunto de correntes zonais que atinge as costas norte e nordeste brasileiras. Este conjunto é chamado de Corrente Sul Equatorial (CSE). A CSE atravessa a bacia do Oceano Atlântico Sul no sentido leste-oeste, se estendendo meridionalmente desde cerca de 20°S até 5°N. Pelo fato de abranger esta larga faixa latitudinal, a CSE é didaticamente dividida em três porções. A porção que se situa a norte do equador, entre 0°e 5°N, é chamada Corrente Sul Equatorial norte (CSEn) ; a porção que se situa entre o equador e cerca de 5°S é chamada Corrente Sul Equatorial central (CSEc) , e a porção a sul desta é denominada Corrente Sul Equatorial sul (CSEs) (MOLINARI, 1982).

A CSEs cruza o Oceano Atlântico sul em aproximadamente 20°S (STRAMMA e SCHOTT, 1999). Ao se aproximar da plataforma continental leste brasileira,

entre 12-20°S, esta corrente bifurca-se, dando origem a duas correntes com sentidos opostos: a Corrente do Brasil, que segue para sul, e a Subcorrente Norte do Brasil (SNB), que segue para norte (STRAMMA e SCHOTT, 1999).

A SNB é intensificada em subsuperfície, com núcleo a aproximadamente 100-200 metros de profundidade e transporte médio de 21 Sv ($1\text{Sv} = 10^6\text{m}^3/\text{s}$). Esta corrente segue em sentido norte sobre o talude da costa leste da América do Sul e, a partir de aproximadamente 5°S, recebe contribuição superficial de cerca de 15 Sv da CSEc (DA SILVEIRA *et al.*, 1994) (Figura 2.1). O fluxo composto pela CSEc em superfície sobreposta à SNB em subsuperfície é denominado Corrente Norte do Brasil (CNB).

A CNB flui em sentido noroeste ao longo da costa norte da América do Sul, se estendendo até mais de 1000 metros de profundidade. A CNB em superfície alcança velocidades de até 1,5 m/s, com transporte de cerca de 36 Sv, apresentando, em parte da sua trajetória, dois núcleos de máxima velocidade: um em superfície, referente à CSEc, e outro em subsuperfície, a cerca de 200 metros de profundidade, referente à SNB. Ao longo de sua trajetória, o núcleo referente à SNB perde sua característica subsuperficial, se aproximando da superfície (SCHOTT *et al.*, 1998).

Ao longo de sua trajetória para noroeste, ocorrem múltiplas retroflexões da CNB, em diferentes níveis, alimentando o sistema equatorial de correntes. Em termoclina, uma porção retroflete em cerca de 45°W, originando a Subcorrente Equatorial (SCE) e alimentando a Subcorrente Norte Equatorial (SNE) (SCHOTT *et al.*, 1998; GOES *et al.*, 2005). Em superfície, a CNB retroflete em cerca de 6-7°N (FLAGG *et al.*, 1986), alimentando a Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) (Figura 2.1).

As diferentes localizações das retroflexões superficial e em termoclina seriam explicadas pelo fato da porção superficial da CNB possuir características diferentes da termoclina. Segundo JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003), a porção superficial da CNB pode ser considerada um fluxo não linear. KILLWORTH (1991) aponta para o fato de que um fluxo não linear pode penetrar até dois raios de deformação de Rossby no hemisfério norte sem qualquer ajuste de vorticidade potencial. Esta portanto seria a causa da posição da retroflexão superficial, em cerca de 7°N. O fato da retroflexão em termoclina se localizar sobre o equador, vista sob esta mesma abordagem, implica dizer que a termoclina da CNB possui menor inércia que a porção superficial, levando ao ajuste de sua vorticidade relativa logo após cruzar o equador e conseqüentemente à retroflexão.

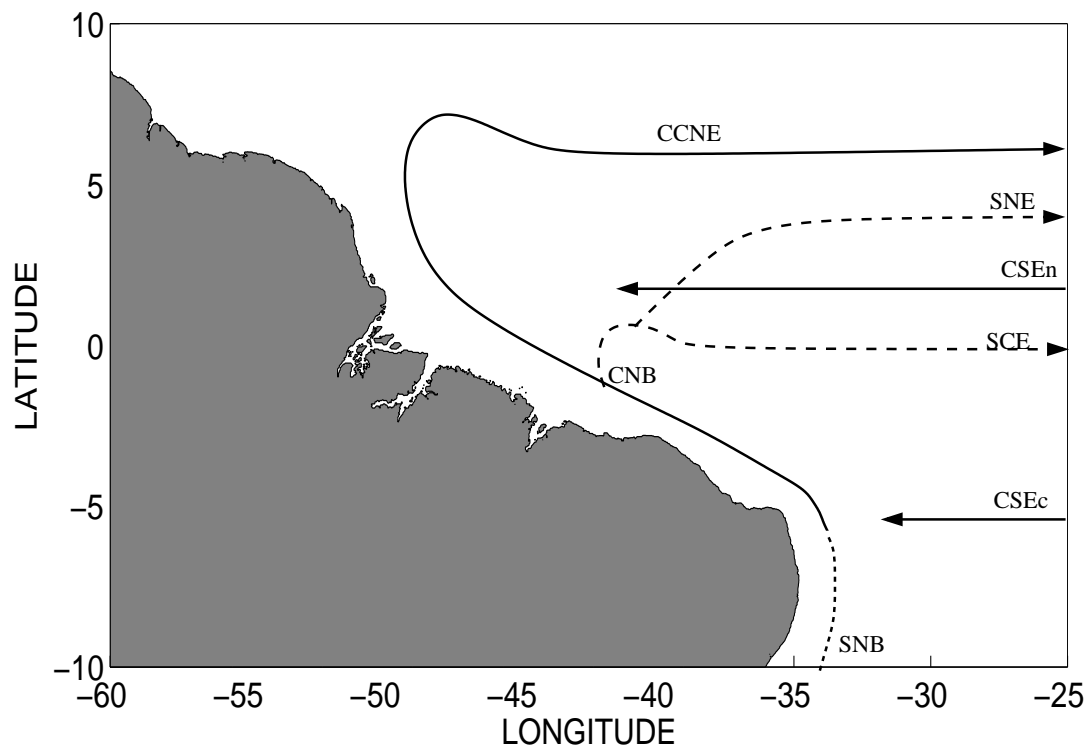


Figura 2.1: Visão esquemática da circulação na área de estudo. A Subcorrente Norte do Brasil (SNB) segue a costa nordeste brasileira em subsuperfície, recebendo contribuição superficial da Corrente Sul Equatorial central (CSEc) a partir de cerca de 5°S. O fluxo combinado da SNB e CSEc é chamado Corrente Norte do Brasil (CNB). Ao longo da trajetória para noroeste a CNB recebe contribuições da Corrente Sul Equatorial norte (CSEn). Em aproximadamente 50°W, a CNB retroflete, alimentando a Contracorrente Norte-Equatorial (CCNE). Em termoclina, a CNB retroflete em aproximadamente 45°W, alimentando a Subcorrente Equatorial (SCE) e a Subcorrente Norte-Equatorial (SNE). Baseado em: GOES *et al.* (2005), STRAMMA e SCHOTT (1999).

2.1.1 A Contracorrente Norte Equatorial

A CCNE é tipicamente caracterizada por um núcleo subsuperficial de velocidade, em cerca de 60-80 m de profundidade. O fato do núcleo ser em subsuperfície, segundo BOURLÈS *et al.* (1999), possivelmente é devido ao fato da CCNE fluir contra o vento, sob o transporte de Ekman.

O ciclo sazonal de transporte da CCNE apresenta menor transporte durante a primeira metade do ano e maior em outubro/novembro (FONSECA *et al.*, 2004), sendo o mínimo em março (GARZOLI *et al.*, 2004). Esta sazonalidade do transporte da CCNE parece estar relacionada à retroflexão superficial, que se apresenta mais evidente durante a segunda metade do ano (FONSECA *et al.*, 2004). Estudos mais antigos especulam sobre inversão da CCNE de março a maio (STRAMMA e SCHOTT, 1999), porém mais recentemente LUMPKIN e GARZOLI (2005) e FONSECA *et al.* (2004) indicam que a CCNE é presente durante o ano todo, embora seja mais fraca durante esse período do ano, quando, segundo FONSECA *et al.* (2004), é alimentada principalmente pela Corrente Norte Equatorial (CNE). Outro fator que poderia indicar que a CCNE teria seu sentido invertido é o transporte de Ekman para noroeste gerado a partir dos alísios de nordeste quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) se encontra próximo de sua posição máxima a sul (fevereiro-abril, WALISER e GAUTIER, 1993) (URBANO *et al.*, 2006). Este transporte em superfície pode mascarar a existência perene da CCNE.

GARZOLI *et al.* (2004) estimam, a partir de altura dinâmica da superfície do mar, que o transporte da CCNE varia entre 0 e 28 Sv em 45°W, com média 16 ± 2 Sv até 300 m de profundidade. No entanto, a propagação de ondas de Rossby na região pode causar grandes variações nestes valores; STRAMMA *et al.* (2005) encontrou em novembro de 2000 um transporte combinado da CCNE e da SNE de 52,4 Sv em 44°W. Segundo os autores, o alto valor seria uma expressão de uma circulação anticiclônica associada a uma onda de Rossby.

A CCNE, além de possuir um ciclo anual de variação em seu transporte, migra meridionalmente ao longo do ano. Em média, ela se situa em $6.0 \pm 1.3^\circ\text{N}$, podendo se situar entre 3° e 10°N no Atlântico Equatorial Oeste (FONSECA *et al.*, 2004). Apesar de sua migração estar estabelecida, não é clara a relação entre esta e a variação do cisalhamento do vento. URBANO *et al.* (2008), a partir de derivadores e 8 anos de dados de altimetria por satélite (1998-2006, AVISO), apontam que a migração latitudinal da CCNE tem um padrão influenciado pelo campo de vento, acompanhando o rotacional nulo do cisalhamento do vento com atraso de 1-3 meses. Já FONSECA *et al.* (2004), a partir de 8 anos de dados de altimetria por satélite (1993-2000, TOPEX/Poseidon) e dados de vento, indicam que a localização da CCNE segue a migração anual da ZCIT exceto em fevereiro, quando a CCNE exhibe

outro máximo a norte enquanto a ZCIT ainda está se aproximando de sua posição mais a sul.

Estudos recentes (URBANO *et al.*, 2006; URBANO *et al.*, 2008) apontam para a existência sazonal de uma estrutura de dois núcleos meridionalmente espaçados na CCNE. A partir de derivadores e altimetria da superfície do mar, URBANO *et al.* (2008) descrevem que durante os meses de agosto e setembro a CCNE, em cerca de 6°N, bifurca-se em dois núcleos: um mais a norte e outro mais a sul. Estes dois núcleos existiriam separados até maio do ano seguinte, quando o núcleo mais a sul enfraqueceria ou desapareceria, enquanto o núcleo mais a norte existiria até julho, mês no qual o ramo sul apareceria novamente. Posteriormente haveria intensificação do núcleo sul, para ocorrer sua bifurcação em agosto-setembro. Segundo os autores, os dois núcleos da corrente ocorrem como resposta aos limites norte e sul da ZCIT.

Os mesmos autores discutem a possível inversão da CCNE. Ao invés da inversão, foi observada pelos mesmos uma migração do núcleo sul da CCNE para norte em janeiro-fevereiro, indo de 5°N para 10°N. Desta forma, o que ocorreria seria uma migração meridional na corrente, tendo como consequência a ausência ou enfraquecimento da corrente em uma determinada latitude.

2.1.2 A Subcorrente Equatorial

A SCE possui algumas das maiores velocidades presentes no sistema equatorial de correntes, com as velocidades de seu núcleo podendo chegar a 0,7 m/s na porção oeste da bacia (35°W) (SCHOTT *et al.*, 2003). Esta corrente atravessa o Atlântico, centrada no equador e se estendendo entre 2°N e 2°S, com seu núcleo em cerca de 70-100 m de profundidade (URBANO *et al.*, 2008), aproximadamente correspondente à isopical $\sigma_\theta = 24.5$. Na porção oeste da bacia (a partir de 38°W), a SCE pode se fundir à SNE (GOES *et al.*, 2005; URBANO *et al.*, 2008). Esta união parece ter tendência a ocorrer no inverno-primavera, e no verão os núcleos tendem a se separar (URBANO *et al.*, 2008).

Durante a primavera (HN), quando a ITCZ se encontra sobre o equador, há redução de ventos para oeste, permitindo que a EUC se estenda à superfície. Durante o restante do ano, ela geralmente se encontra em subsuperfície, sob um jato superficial para oeste (SCHOTT *et al.*, 1998). URBANO *et al.* (2008) indicam que a SCE emergiria à superfície não somente durante a primavera (fevereiro-junho), mas também durante o verão (julho-agosto), deslocada para norte durante a primavera e para sul durante o verão. ARHAN *et al.* (2006) encontram em resultados de modelagem numérica que os dois períodos em que URBANO *et al.* (2008) indica que a SCE emerge à superfície coincidem com máximos de transporte desta corrente, e que o máximo de transporte de abril-maio seria mais pronunciado próximo à fronteira

oeste.

Não há total consenso a respeito da origem das águas da SCE. SCHOTT *et al.* (1998) apontam a presença de águas do hemisfério norte na SCE, enquanto BOURLÈS *et al.* (1999) encontram somente águas provenientes do hemisfério sul, indicando que a SCE seria formada em sua totalidade por retroflexão da CNB. No entanto, ambos estudos concordam que ao menos a maior parte do transporte da SCE é proveniente da CNB.

2.2 Os vórtices da Corrente Norte do Brasil

JOHNS *et al.* (1990) apontam evidências de que vórtices anticiclônicos são desprendidos da retroflexão CNB-CCNE, a partir de dados de mooring na região. Seu estudo foi então seguido inicialmente por DIDDEN e SCHOTT (1993) e FRATANTONI *et al.* (1995), e desde então a região tem sido estudada a fim de investigar as características destes vórtices, uma vez que as mesmas são decisivas na quantificação do transporte interhemisférico de massa pela região.

NOF e PICHEVIN (1996), a partir de uma abordagem teórica baseada no balanço integrado de quantidade de movimento de uma corrente invíscida que retroflete, indicam que, na região da retroflexão superficial da CNB, o fluxo de quantidade de movimento paralelo à costa não pode ser balanceado a não ser que vórtices sejam gerados e removam quantidade de movimento da corrente média. Este estudo sugere formação permanente de vórtices enquanto a retroflexão estiver presente, condizente com os resultados do estudo numérico em média resolução ($1/3^\circ$) de BARNIER *et al.* (2001).

Resultados de modelagem numérica em média resolução ($1/4^\circ$) (JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI, 2003) sugerem que os vórtices da retroflexão da CNB seriam causados por reflexão na costa brasileira de ondas de Rossby de primeiro modo baroclínico causadas por instabilidade barotrópica na CCNE com período de cerca de 50 dias. A propagação de sinais de período semelhante foi verificada por JOHNS *et al.* (1990) através de um estudo observacional em aproximadamente 52°W , no qual foram identificados sinais com período de aproximadamente 40-60 dias, que, segundo os autores, são relacionados com a geração e translação de vórtices pela região.

A partir de moorings em cerca de 48°W , JOHNS *et al.* (1998) indicam que a variabilidade de mesoescala na região é dominada por flutuações com dois períodos predominantes, próximos a 25-40 dias e a 60-90 dias. As oscilações de período mais curto seriam fortemente confinadas à porção entre a superfície e 150 metros de profundidade, e mais energéticas em junho, durante a fase de aceleração da CNB. Já as oscilações de períodos mais longos abrangem uma maior porção da coluna d'água,

estando presentes desde a superfície até cerca de 800 metros de profundidade. Estas últimas são presentes ao longo de todo o ano, e são associadas com a propagação de grandes vórtices anticiclônicos para noroeste ao longo da costa.

Os sinais observados por JOHNS *et al.* (1998) podem estar relacionados com as variações de pelo menos 10 Sv observadas no transporte da CNB em 44°W por GARZOLI *et al.* (2004). No entanto, os autores verificaram que o pico de transporte e o desprendimento de vórtices ocorreram concomitantemente, sem o intervalo de tempo esperado para a propagação do sinal desde a longitude onde foi realizada a medição até a longitude do desprendimento de vórtices. Não obstante, os autores relacionam o desprendimento de um vórtice da CNB a um máximo no transporte desta corrente.

Os vórtices da retroflexão da CNB são os maiores vórtices oceânicos do mundo. Seu raio superficial pode ser de até 250 km (WILSON *et al.*, 2002), com raio de velocidade máxima de cerca de 125-150 km, no qual as velocidades podem chegar a 1 m/s (FRATANTONI *et al.*, 1995).

Após sua formação, estes vórtices seguem trajetória noroeste aproximadamente paralela ao talude da costa norte da América do Sul, ao longo de uma faixa de cerca de 300 km de largura (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006). Os vórtices transladam a cerca de cerca de 10-15 cm/s (JOHNS *et al.*, 1990), por aproximadamente 300 dias até o Caribe (FRATANTONI *et al.*, 1995). Ao longo dessa trajetória há progressiva deformação de sua geometria (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006), de forma que podem se apresentar alongados paralelamente à linha de costa (FRATANTONI e GLICKSON, 2002).

Quanto à taxa de desprendimento de vórtices, é grande a variação entre as estimativas (Tabela 2.1). A partir de um ano de dados de altimetria por satélite, FRATANTONI *et al.* (1995) estima o desprendimento de ao menos 2-3 vórtices/ano. Já GONI e JOHNS (2001), também por altimetria, porém a partir de 6 anos de dados, estimam desprendimento de 5,3 vórtices/ano. GONI e JOHNS (2003), estendendo o período de observação para dez anos de dados de altimetria por satélite, estimam o desprendimento de 3 a 7 vórtices/ano. Também através de sensores remotos, FRATANTONI e GLICKSON (2002) estimam, através de 3 anos de dados de cor do mar, o desprendimento de 6 vórtices/ano. JOHNS *et al.* (2003) fizeram uma estimativa a partir de um ano e meio de dados de um mooring e cruzeiros. Estes autores estimam o desprendimento de 6,5 vórtices superficiais. A combinação dos resultados citados acima resulta em uma estimativa de no mínimo 2-3 vórtices/ano e no máximo 7 vórtices/ano.

DIDDEN e SCHOTT (1993) e FRATANTONI e RICHARDSON (2006) observaram, além de vórtices anticiclônicos, vórtices ciclônicos na região. Os ciclones são em menor número e diâmetro que os anticiclones (DIDDEN e SCHOTT, 1993;

Tabela 2.1: Estimativas de taxa de desprendimento de vórtices da retroflexão da Corrente Norte do Brasil.

Estudo	Estimativa	Dados analisados
FRATANTONI <i>et al.</i> (1995)	2-3	3 anos de dados de altimetria
GONI e JOHNS (2001)	5,3	6 anos de dados de altimetria
GONI e JOHNS (2003)	3-7	10 anos de dados de altimetria
FRATANTONI e GLICKSON (2002)	6	3 anos de dados de cor do mar
JOHNS <i>et al.</i> (2003)	6,5	mooring(1 1/2 ano), cruzeiros

FRATANTONI e RICHARDSON, 2006), corroborando a hipótese de JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003), a partir de um modelo com média resolução ($1/4^\circ$), segundo a qual os vórtices da CNB são gerados a partir de uma onda de Rossby, com progressiva intensificação dos anticiclones por conservação de vorticidade potencial. Neste contexto, é esperada a presença de vórtices ciclônicos menos intensos que os anticiclones na região, como observado por DIDDEN e SCHOTT (1993) e FRATANTONI e RICHARDSON, (2006).

2.2.1 Estrutura Vertical

A importância da caracterização vertical dos vórtices da CNB se dá principalmente pelo fato de que o núcleo de um vórtice da CNB é composto principalmente de águas superficiais, da termoclina e intermediárias do Atlântico Sul, recentemente advectadas através do equador pela CNB (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006). Desta forma, estes vórtices contribuem com o transporte interhemisférico de massa.

Alguns dos primeiros estudos realizados sobre o assunto identificam os vórtices como sendo intensificados em superfície (JOHNS *et al.*, 1990; FRATANTONI *et al.*, 1995), podendo se estender desde 200 a 2000 m de profundidade (WILSON *et al.*, 2002), com seu diâmetro sendo reduzido à medida em que se aprofunda na coluna d'água. Desta forma, a porção subsuperficial dos vórtices tende a ter raio de velocidade máxima de aproximadamente 90-105 km (JOHNS *et al.*, 2003) e velocidade de cerca de 0,4 m/s (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006), inferiores à porção superficial, com valores de 125-150 km e 1 m/s, respectivamente (FRATANTONI *et al.*, 1995).

JOHNS *et al.* (2003) identificaram uma sazonalidade na extensão vertical dos vórtices desprendidos. Segundo os autores, os vórtices de maiores diâmetro e extensão vertical são formados no período compreendido entre agosto e março, enquanto os vórtices rasos seriam formados entre março e junho. Esta dependência temporal da estrutura vertical dos vórtices estaria relacionada ao ciclo de transporte da CNB,

assim como à existência ou não da retroflexão superficial da mesma. De acordo com JOHNS *et al.* (1998), o transporte da CNB alcança seu máximo em julho-agosto e seu mínimo em abril-maio. Já a retroflexão CNB-CCNE se encontra mais pronunciada entre junho e março, e é fraca ou ausente durante o período de transporte mínimo em abril-maio. No estudo de JOHNS *et al.* (2003), os vórtices de maiores diâmetro e extensão vertical são formados no período em que a CNB está na fase de declínio do transporte máximo do verão, porém enquanto a retroflexão ainda é claramente estabelecida. Em contrapartida, de março a junho (primavera e início do verão) o fluxo da CNB é confinado principalmente acima de 150 m de profundidade (JOHNS *et al.*, 1998), o que é consistente com os vórtices rasos que são formados nesta época do ano. No entanto, não foi verificada por estes autores uma época do ano preferencial para formação de vórtices.

WILSON *et al.* (2002) identificaram um vórtice cujas velocidades máximas não se encontravam em superfície, mas em subsuperfície, com pouca ou nenhuma assinatura superficial, e redução de velocidade tanto em direção à superfície quanto em direção ao fundo. Vórtices com este tipo de estrutura vertical também foram observados nos estudos de JOHNS *et al.* (2003) e STRAMMA *et al.* (2005). O estudo de JOHNS *et al.* (2003) é o mais completo estudo observacional sobre vórtices com velocidades máximas em subsuperfície na região até o presente, com amostragem de quatro vórtices, através de mooring. Segundo estes autores, os vórtices subsuperficiais têm raio de velocidade máxima reduzidos em relação aos vórtices intensificados em superfície. A profundidade de máxima velocidade e a extensão vertical destes vórtices são variáveis. O vórtice subsuperficial observado por WILSON *et al.* (2002) possuía velocidades máximas a 150 m e se estendia até aproximadamente 600 m. Já um dos 4 vórtices subsuperficiais observados por JOHNS *et al.* (2003) apresentava velocidades máximas a 800 m, com velocidades significativas desde 200 até 1000 m de profundidade. STRAMMA *et al.* (2005) observam um vórtice com velocidades máximas a 500 m, com velocidades significativas até 1200 metros de profundidade. Estes três vórtices eram praticamente imperceptíveis em superfície.

Estimativas de taxa de formação e desprendimento de vórtices subsuperficiais são mais difíceis de serem realizadas em comparação com os vórtices superficiais, uma vez que vórtices intensificados em subsuperfície não possuem sinal em altimetria ou este é muito fraco (JOHNS *et al.*, 2003), fazendo com que sejam detectados somente a partir de cruzeiros e moorings. A única estimativa de taxa de desprendimento de vórtices subsuperficiais foi realizada a partir de um mooring em aproximadamente 53°W, durante dois anos, por JOHNS *et al.* (2003). Os autores estimam que dois vórtices subsuperficiais sejam formados por ano, com épocas de formação em setembro-outubro e março-abril. No entanto, devido ao reduzido período de amostragem para realização deste tipo de estimativa, os próprios autores apontam para

a possibilidade desta não ser representativa.

GARRAFFO *et al.* (2003) realizaram um estudo dos vórtices da CNB a partir de modelagem numérica em alta resolução da região. Estes autores identificaram vórtices intensificados em superfície com extensão vertical variando de 200 a 1000 m, além de vórtices subsuperficiais, cujos núcleos se localizavam entre 100 e 300 m de profundidade, se estendendo até aproximadamente 800 m. A partir deste estudo, foi estimada uma taxa de 2,3 vórtices intensificados em subsuperfície formados por ano, se assemelhando à estimativa realizada por JOHNS *et al.* (2003).

GARRAFFO *et al.* (2003) observaram em resultados de modelagem numérica que apesar de os vórtices intensificados em subsuperfície e em superfície terem trajetórias semelhantes a oeste de 50°W , eles não necessariamente possuem a mesma região de formação. Vórtices superficiais são em geral gerados na região da retroflexão superficial da CNB em cerca de 7°N , enquanto vórtices subsuperficiais são originados em duas regiões: a primeira próximo ou a sul da retroflexão subsuperficial, que se situa em cerca de 45°W , e a segunda próxima à retroflexão superficial da CNB. As duas regiões de formação de vórtices são similares às encontradas por BARNIER *et al.* (2001) a partir de modelagem numérica em média resolução.

A partir do conhecimento da estrutura vertical dos vórtices, pode-se estimar o volume de água do hemisfério sul que cruza o equador e segue para o hemisfério norte transportada pelos mesmos. JOHNS *et al.* (2003) estima que o transporte médio seja de 1,1 Sv por vórtice, levando em consideração tanto vórtices intensificados em superfície quanto em subsuperfície. A partir da estimativa destes autores de 8,5 vórtices formados por ano, incluindo superficiais e subsuperficiais, os vórtices da CNB podem contribuir com cerca de 9 Sv, ou 60%, com o transporte interhemisférico de massa, estimado em 14 Sv por SCHMITZ (1996).

Apesar de terem sido observados vórtices intensificados em superfície e outros em subsuperfície, foram observados também vórtices com uma estrutura mista, intensificados em superfície e em subsuperfície. JOHNS *et al.* (2003) identificaram 3 feições deste tipo a partir de um mooring localizado em 53°W . Uma delas se tratava de um vórtice profundo com a porção inferior possuindo diâmetro menor que a porção superficial. Entre as duas porções foi identificada uma camada de baixa porcentagem de água do hemisfério sul, sugerindo que as porções superior e inferior não estariam acopladas. Outras estruturas semelhantes foram observadas pelos mesmos autores, porém com os núcleos superficial e subsuperficial deslocados cerca de 100 km. A existência deste tipo de feição, se estendendo a grandes profundidades, porém sem continuidade vertical de propriedades, sugere que estas feições são resultado da sobreposição de vórtices intensificados em superfície e subsuperfície, sem claro acoplamento.

Outro indício da sobreposição de vórtices é descrito por JOHNS *et al.* (2003).

Estes autores observaram a evolução da estrutura vertical de um mesmo vórtice a partir de duas observações espaçadas espacial e temporalmente, a primeira realizada a partir de mooring e a segunda a partir de levantamento hidrográfico. Inicialmente, a extensão vertical do vórtice alcançava 500 m de profundidade, se estendendo até 2000 m na segunda medição realizada. Isto deve-se, segundo os autores, à subposição de um componente profundo de circulação anticiclônica ao vórtice intensificado em superfície. Isto sugere que vórtices superficiais e subsuperficiais são formados independentemente e de alguma forma podem se sobrepor.

Além de vórtices intensificados em diferentes profundidades que podem se sobrepor, foi observada, através de bóias e derivadores, a divisão de vórtices profundos em uma porção superficial e outra subsuperficial ao se aproximar da região mais rasa entre Tobago e Barbados. O nível em que ocorre esta divisão varia entre 250 e 550 metros de profundidade. A sobreposição de vórtices intensificados em diferentes profundidades, citada anteriormente, ocorre também com vórtices resultantes da divisão de um vórtice profundo. Foi observado, por exemplo, um vórtice intensificado em subsuperfície, resultante da divisão de um vórtice profundo, que foi sobreposto por um vórtice intensificado em superfície. Após a sobreposição, ambos seguem sua trajetória alinhados, como uma feição acoplada (FRATANTONI e RICHARDSON, 2006).

As observações citadas acima corroboram a sugestão de que a estrutura vertical observada dos vórtices da CNB pode ser o resultado da sobreposição de vórtices com estruturas verticais distintas. Os resultados de modelagem numérica de GARRAFFO *et al.* (2003) indicam que vórtices com maior extensão vertical ocorrem a partir da sobreposição de vórtices intensificados em superfície e subsuperfície. As porções superficiais dos vórtices podem se mover independentemente da porção subsuperficial, com maiores velocidades de translação. Assim, a estrutura vertical dos vórtices estaria condicionada ao local de observação, uma vez que as porções superficial e subsuperficial teriam comportamentos independentes. A existência de porções subsuperficiais independentes sugere que há algum outro mecanismo de formação e desprendimento de vórtices além do desprendimento da retroflexão superficial.

JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003) propuseram mecanismos independentes de formação de vórtices superficiais e subsuperficiais, a partir de um modelo numérico de duas camadas. Segundo os autores, vórtices superficiais são gerados a partir de reflexão, na costa da América do Sul, de uma onda de Rossby gerada por instabilidade barotrópica na CCNE. Já os vórtices subsuperficiais seriam causados por instabilização e consequente formação de vórtices em uma corrente intermediária (entre 300 e 1000 m de profundidade) cruzando o equador. Esta geração de vórtices na camada intermediária ocorreria pela incapacidade de uma fronteira oeste prover mudança necessária de vorticidade potencial por fricção. No estudo destes

autores, vórtices profundos são tratados como sobreposição de vórtices superficiais e subsuperficiais.

Este processo de geração de vórtices foi verificado em resultados de modelo numérico em alta resolução (GARRAFFO *et al.*, 2003), nos quais nas camadas intermediárias o fluxo se desfaria em vórtices com raio inferior ao raio dos vórtices superficiais. Alguns dos vórtices intensificados em superfície com grande extensão vertical simulados pelo modelo se originam a partir de um vórtice nas camadas intermediárias posteriormente sobreposto por um vórtice superficial.

JOHNS *et al.* (2003) hipotetizam que os vórtices subsuperficiais podem ser formados a leste da retroflexão da CNB, próximo ao local da retroflexão SNB-SCE. Esta hipótese explicaria a intensificação em subsuperfície, porém não explicaria a grande extensão vertical de alguns vórtices, que podem se estender a níveis intermediários, e nem o núcleo de máxima velocidade de alguns vórtices em 600-800 m de profundidade.

Considerando que vórtices intensificados em superfície e subsuperfície podem possuir origens distintas e se sobrepor, a questão seguinte para análise é a existência ou não de interações, e se sim, de que tipo, entre vórtices intensificados em superfície e em subsuperfície.

DA SILVEIRA *et al.* (2000) desenvolveram um modelo de vorticidade potencial em três camadas (0-150 m, 150-1000 m, 1000-4000 m) a partir de dados hidrográficos e de velocidade coletados *in situ*. No modelo, a formação de vórtices ocorre somente nas duas primeiras camadas, e os autores apontam a importância do crescimento baroclínico na região, podendo o comportamento da subtermoclina (150-1000 m) interferir no comportamento da camada superficial (0-150 m). CHERUBIN (2000) indica que um vórtice subsuperficial pode desestabilizar a frente da retroflexão superficial. Para o caso da CNB, isso indica que vórtices gerados próximo ao equador podem adquirir sinal superficial na região da retroflexão CNB-CCNE.

Este tipo de interação foi observado no estudo numérico de GARRAFFO *et al.* (2003), no qual um vórtice profundo é formado a partir de um vórtice subsuperficial que adquire sinal em superfície na região da retroflexão CNB-CCNE, seguido do desprendimento de um vórtice superficial alinhado ao subsuperficial. Nesta estrutura também pôde ser detectada água do hemisfério norte nas profundidades entre os dois vórtices originais. Deste modo, a existência de interações entre vórtices intensificados em diferentes níveis e por quais processos esta interação ocorre ainda é um assunto em investigação.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 O modelo HYCOM e a Simulação Global

Para atingir os objetivos propostos neste estudo são analisados resultados de uma simulação numérica global do modelo HYCOM (*HYbrid Coordinate Ocean Model*) (BLECK, 2002). Este modelo é desenvolvido a partir do *Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model* (BLECK *et al.*, 1992) e tem como principal característica a flexibilização de discretização vertical em três diferentes tipos de coordenadas:

- coordenadas isopicnais

Discretizam o oceano em camadas de mesma densidade potencial. Este tipo de coordenada favorece a representação do oceano na maior parte do domínio, isto é, em oceano aberto, abaixo da camada de mistura. Permite uma melhor representação e controle da mistura isopicnal e diapicnal.

- coordenadas geopotenciais

Discretizam o oceano em níveis de profundidade constante. Estas coordenadas são utilizadas em regiões como a camada de mistura, onde o contraste de densidade não propicia resolução vertical satisfatória com coordenadas isopicnais.

- coordenadas sigma

Discretizam o oceano verticalmente em camadas que acompanham o relevo do terreno. Este tipo de coordenada é especialmente importante para a representação de regiões onde há interação do escoamento com a batimetria, permitindo melhor resolução na camada limite de fundo

O modelo, em suas configurações padrão, possui os três tipos de coordenadas, se encarregando de revertê-las para o tipo de coordenada vertical mais conveniente para cada parte do domínio (Figura 3.1). Desta forma, as coordenadas são isopicnais em

oceano aberto, geopotenciais na camada de mistura e sigma próximo ao fundo e em regiões costeiras (CHASSIGNET, 2007). A utilização desta característica do modelo permite o aproveitamento das vantagens associadas a cada esquema de discretização vertical.

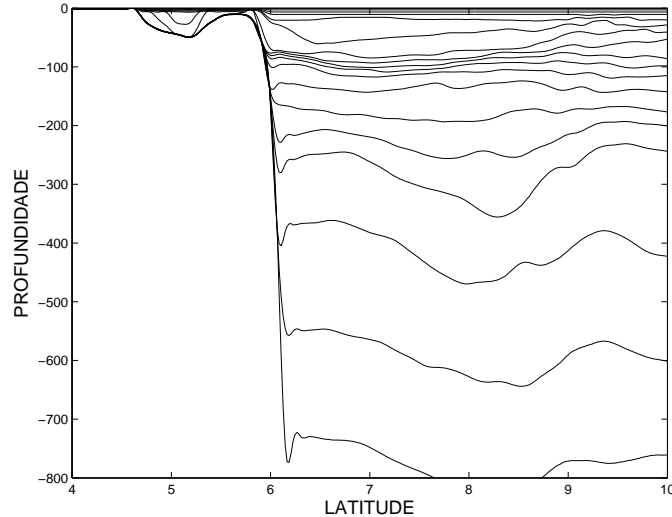


Figura 3.1: Seção com profundidade instantânea das camadas, ilustrando o esquema de coordenadas híbridas do modelo HYCOM.

No presente trabalho são analisados resultados de uma simulação global, desenvolvida pelo *HYCOM Consortium*, com resolução horizontal de $1/12^\circ$, que corresponde a aproximadamente 9 km na região equatorial. Entre as latitudes 78°S e 47°N é utilizada uma grade em projeção de Mercator, e para latitudes acima de 47°N é utilizada uma grade bipolar chamada *Arctic dipole patch* (HYCOM, 2009). Verticalmente foi feita discretização em 32 camadas híbridas de densidade σ_2 , identificadas na tabela 3.1 (HYCOM, 2009).

A inicialização foi realizada a partir de dados do mês de janeiro da climatologia mensal do *Generalized Digital Environment Model version 3.0* (GDEM3) (CARNES, 2009), do *Naval Oceanography Office* (NAVOCEANO). A batimetria utilizada é derivada da base NRL DBDB2 (HYCOM, 2009). Esta simulação é datada para forçantes atmosféricas em escala sinótica, para o período de janeiro de 2003 a abril de 2007. Em superfície são utilizadas forçantes sinóticas de vento, fluxos de calor e precipitação da base NOGAPS (*Navy Operational Global Atmospheric Prediction System*) (HYCOM, 2009). A salinidade de superfície é relaxada para a base de dados climatológicos PHC3.0 do *Polar Science Center Hydrographic Climatology*, com escala de relaxamento correspondente a 30 dias.

No presente estudo são analisados três anos de resultados a cada três dias, correspondentes aos anos 2003, 2004 e 2005.

Camada	σ_2
1	28,10
2	28,90
3	29,70
4	30,50
5	30,95
6	31,50
7	32,05
8	32,60
9	33,15
10	33,70
11	34,25
12	34,75
13	35,15
14	35,50
15	35,80
16	36,04
17	36,20
18	36,38
19	36,52
20	36,62
21	36,70
22	36,77
23	36,83
24	36,89
25	36,97
26	37,02
27	37,06
28	37,10
29	37,17
30	37,30
31	37,42
32	37,48

Tabela 3.1: Valores de densidade correspondentes a cada camada da simulação do modelo HYCOM cujos resultados são analisados no presente estudo.

3.2 Metodologia de Análise dos Resultados

No presente trabalho a coluna d'água entre a superfície e 1000 metros de profundidade foi dividida em três regiões, com base no padrão de circulação predominante em cada uma. Para o estudo de cada uma destas regiões foi escolhida uma camada do modelo, representativa deste padrão. Nesse sentido, foram selecionadas as camadas $\sigma_2=31.50$, $\sigma_2=34.25$, e $\sigma_2=35.80$, que possuem sua base em média, no

domínio estudado, situada a cerca de 20, 100 e 350 metros de profundidade, sendo representativas das regiões entre 0-80 m, 80-250 m, e 250-1000 m, correspondendo aproximadamente à superfície, termoclina e subtermoclina, respectivamente.

Para facilitar a visualização e compreensão dos resultados, os mesmos são apresentados nas figuras em vermelho para a camada $\sigma_2=31.50$ (superfície), em azul para a camada $\sigma_2=34.25$ (termoclina) e em verde para a camada $\sigma_2=35.80$ (subtermoclina).

A fim de obter uma caracterização do padrão de correntes simulado, foi realizada uma média dos três anos de resultados de velocidades para cada uma das regiões da coluna d'água estudadas. Além disso, uma média compreendendo o mesmo período foi realizada para seções da CNB, para caracterização da corrente média. Foi também realizada a análise espectral, objetivando reconhecer frequências predominantes de propagação de sinais. As séries temporais nas quais é realizada a análise espectral foram previamente filtradas com filtro passa-alta com frequência de corte correspondendo ao período de 90 dias.

Os vórtices da CNB foram identificados a partir de análise visual de campos instantâneos de velocidade, utilizando como proxy a velocidade meridional, uma vez que a translação dos vórtices é predominantemente zonal. Este método também foi aplicado por FRATANTONI *et al.* (1995) e DIDDEN e SCHOTT (1993).

Quanto ao valor de velocidade meridional definido como limite de um vórtice, JOHNS *et al.* (1990), a partir de um mooring na região, encontram raio médio de vórtices de cerca de 200 km. Em um estudo feito durante período mais extenso, no qual o período analisado por JOHNS *et al.* (1990) está contido, DIDDEN e SCHOTT (1993) calculam as velocidades tangenciais de vórtices a partir de altimetria e concluem que o raio médio de 200 km indicado por JOHNS *et al.* (1990) é associado à isotaca de velocidade meridional de 0,2 m/s. Mais recentemente, JOHNS *et al.* (2003) determinam como limite dos vórtices a isotaca de 0,15 m/s. No presente estudo, é utilizada a isotaca de 0,2 m/s para delimitação dos vórtices, para todas as camadas, uma vez que a utilização da isotaca de 0,15 m/s no lugar de 0,2 m/s implicaria em uma diferença menor que a resolução dos resultados.

As trajetórias dos vórtices foram determinadas a partir da identificação da posição de seu núcleo a cada passo de tempo, em campos instantâneos de velocidade, desde o momento de formação/desprendimento até sua reabsorção ou desintegração, isto é, até que sua velocidade meridional seja inferior a 0,2 m/s.

Além de ser utilizada para delimitar os vórtices, a isotaca de 0,2 m/s também é utilizada para identificação da posição da retroflexão, que é representada pela posição da borda leste da isotaca de velocidade meridional positiva de 0,2 m/s correspondente à retroflexão (Figura 3.2).

A fim de se analisar a evolução temporal da estrutura vertical de velocidade dos

vórtices, foram realizadas seções lagrangeanas de velocidade acompanhando-os ao longo do espaço e tempo. São apresentadas imagens em planta e em seções a fim de verificar tanto a estrutura horizontal quanto a estrutura vertical do vórtice em questão, ao longo do tempo.

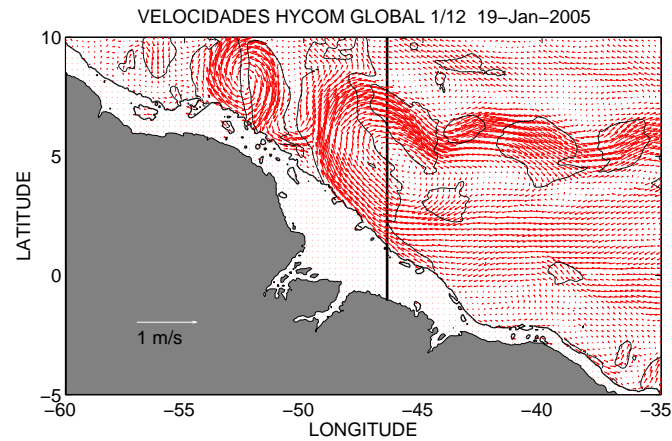


Figura 3.2: Campo instantâneo de velocidade em superfície para o dia 19 de janeiro de 2005. As linhas pretas correspondem às isolinhas de velocidade meridional de 0,2 m/s. A linha preta espessa corresponde à posição da retroflexão CNB-CCNE para este dia, representada pela posição da borda leste da isolinha de velocidade meridional de 0,2 m/s correspondente à retroflexão.

Foi realizado também o cálculo de transporte das correntes. Estes cálculos foram realizados em camadas, que é a discretização vertical da saída da simulação, assim como a partir dos resultados interpolados para níveis, com discretização vertical de 20 metros, a fim de facilitar comparação com a literatura.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

A CNB média em superfície ($\sigma_2=31.5$) flui sobre o talude da costa norte da América do Sul, até cerca de 49°W , longitude a partir da qual a retroflexão CNB-CCNE é visualizada no campo médio superficial, se estendendo até aproximadamente 53°W (Figura 4.1). Apesar de ser apontada como intermitente pela literatura, a retroflexão superficial é uma feição predominante na região, uma vez que é identificada na média dos três anos de resultados analisados neste estudo.

A partir da análise de campos instantâneos de velocidade, verifica-se que o prolongamento da retroflexão superficial é uma expressão dos fenômenos de extensão e retração da retroflexão associadas ao desprendimento de vórtices, assim como da translação dos mesmos pela região. Em geral, a extensão da retroflexão ocorre previamente ao desprendimento de vórtices, e posteriormente ao mesmo ocorre a sua retração. Outra caracterização da posição da retroflexão CNB-CCNE é dada a partir da localização da mesma em campos instantâneos de velocidade, que resulta em uma longitude média de $-48.46^\circ\text{W} \pm 1.69$, indicando que a posição média da retroflexão constitui a extremidade leste da retroflexão representada no campo médio de velocidade superficial, e que esta é predominantemente a expressão da translação de vórtices pela região.

A partir desta retroflexão, a CNB alimenta a CCNE, situada em aproximadamente 6°N no campo médio de velocidade superficial, de acordo com FONSECA *et al.* (2004), que aponta a $6^\circ\text{N} \pm 1.3$ como latitude média da CCNE. Em superfície também podem ser verificadas as porções central (CSEc) e norte (CSEn) da CSE, se estendendo meridionalmente aproximadamente entre 5°S - 0° e 0° - 5°N , respectivamente, alimentando a CNB ao longo de sua trajetória para noroeste. Identifica-se velocidades reduzidas entre estas correntes, isto é, sobre o equador. Esta região de menores velocidades corresponde à região sobre a SCE, que pode se apresentar em superfície entre agosto e maio, estando mais intensa em abril, e em subsuperfície no período compreendido entre junho e julho (URBANO *et al.*, 2008). A alternância entre os fluxos para leste e oeste ao longo do ano no equador dá origem às baixas

velocidades observadas nesta latitude na Figura 4.1.

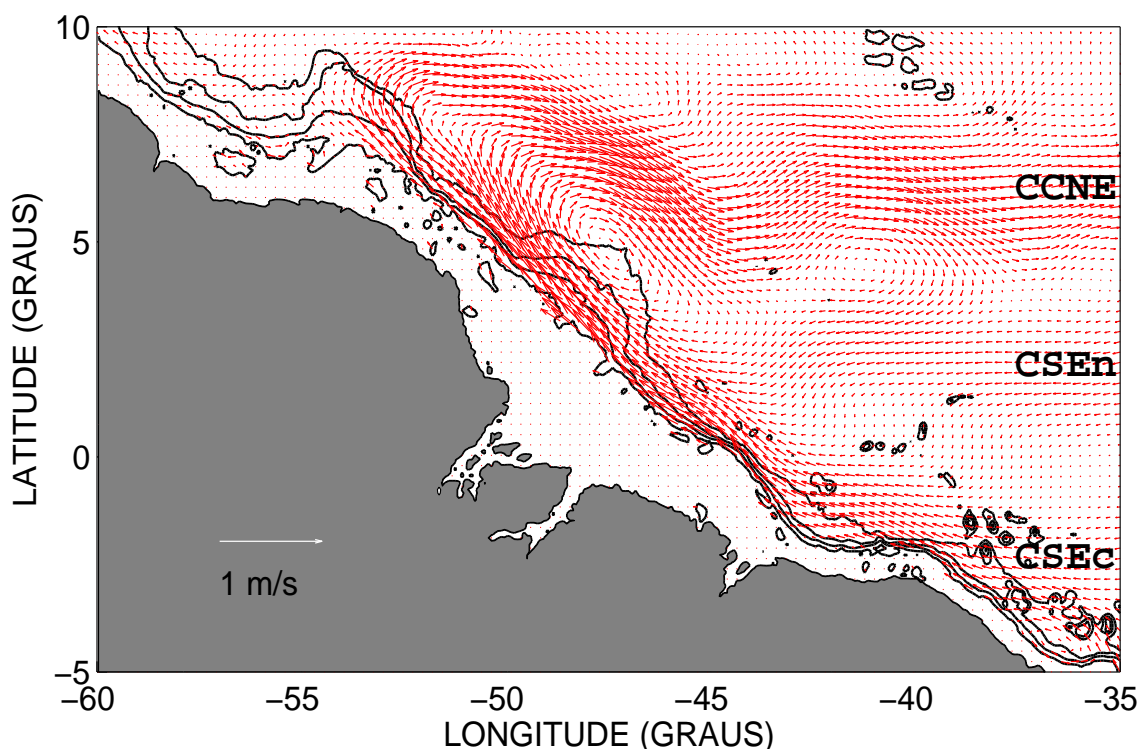


Figura 4.1: Campo médio de velocidades em superfície ($\sigma_2=31.5$). A CCNE é identificada em aproximadamente 6°N , e as porções central e norte da Corrente Sul Equatorial (CSEc e CSEn) em cerca de $5^\circ\text{S}-0^\circ$ e $0^\circ-5^\circ\text{N}$, respectivamente. A retroflexão CNB-CCNE média é observada entre $49^\circ-53^\circ\text{W}$, $5^\circ-9^\circ\text{N}$.

No campo médio de velocidades em termoclina ($\sigma_2=34.25$) pode ser visualizada em aproximadamente 44°W a retroflexão parcial da CNB para alimentar a SCE (Figura 4.2). Neste estudo, esta retroflexão, cuja localização está de acordo com a apontada por SCHOTT *et al.* (1998), de 45°W , é denominada retroflexão CNB-SCE. Uma vez que há esta retroflexão parcial, o fluxo da CNB a oeste da mesma, apesar de poder ser identificado junto ao talude, é menos intenso. Pode ser visualizada também o que se assemelha a uma retroflexão mais a leste, no entanto esta feição presente na média ocorre devido ao cisalhamento entre a CNB, deslocada para norte por uma mudança de orientação da quebra da plataforma continental, e a SCE, sobre o equador.

No campo médio de velocidades pode ser identificada também a assinatura em termoclina da retroflexão superficial, entre $48^\circ-51^\circ\text{W}$. As retroflexões CNB-SCE e CNB-CCNE presentes no campo médio aparecem conectadas. A partir de análise de campos instantâneos de velocidade, pode verificar-se que esta conexão na média é causada pelo efeito de translação de vórtices pela região. Além da assinatura da retroflexão superficial, também pode ser identificada a assinatura em termoclina da CCNE e SNE em cerca de 6°N , embora com velocidades atenuadas em relação à

superfície. No entanto, estas duas correntes não podem ser diferenciadas.

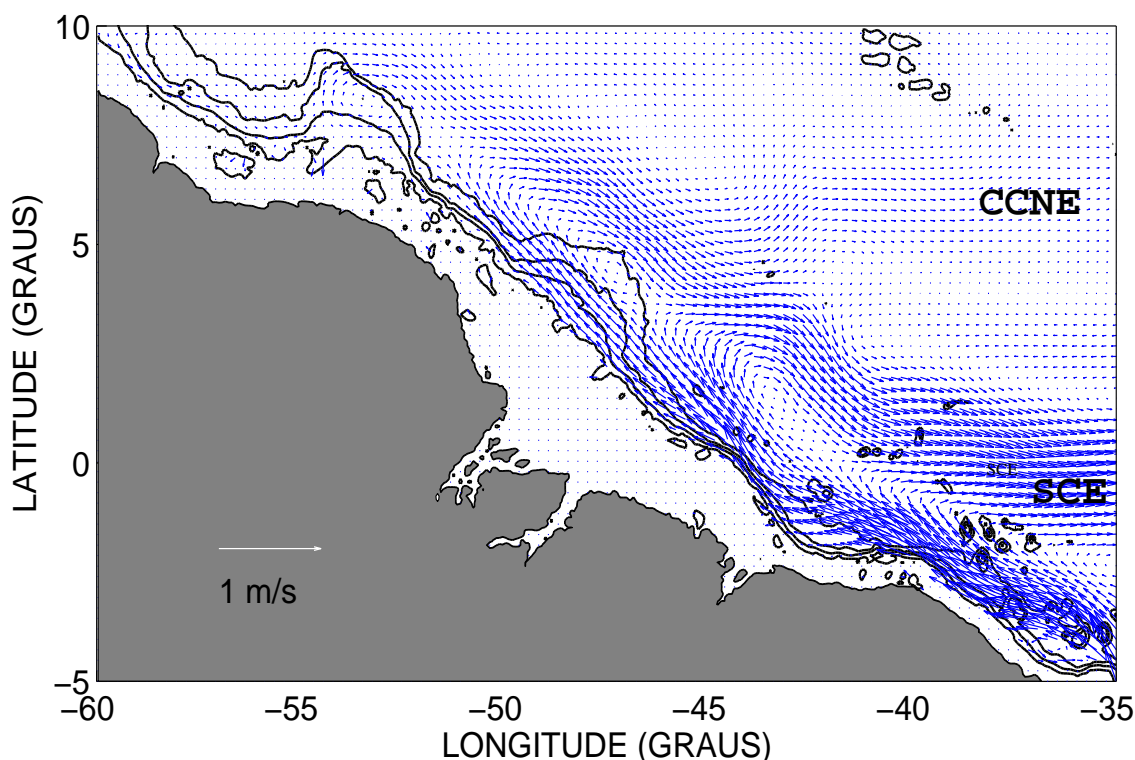


Figura 4.2: Campo médio de velocidades em termoclina ($\sigma_2=34.25$). Observa-se em aproximadamente 44°W a retroflexão CNB-SCE, juntamente com uma extensão da mesma, indicando a região preferencial de translação de vórtices. Como assinaturas do campo superficial médio de velocidade, podem ser identificadas a retroflexão superficial em 48° - 51°W , além da expressão em termoclina da CCNE, em aproximadamente 6°N .

A partir de instantâneos pode-se verificar que além do efeito da translação de vórtices pela região, a conexão no campo médio de velocidades entre as retroflexões CNB-SCE e CNB-CCNE ocorre devido à extensão da retroflexão superficial em determinados períodos a níveis termoclínicos. Verifica-se, no entanto, que apesar de as duas retroflexões se encontrarem presentes no campo médio em termoclina, é possível distinguir o destino das águas provenientes de cada retroflexão.

Em subtermoclina ($\sigma_2=35.8$) a CNB média também se faz presente, porém as retroflexões CNB-SCE e CNB-CCNE, presentes no campo superficial e em termoclina, não são identificadas (Figura 4.3). Observa-se, no entanto, uma corrente ao lado direito da CNB, em sentido contrário à mesma. A presença desta corrente é a expressão na média temporal de uma região de translação de vórtices, de maneira semelhante ao que ocorre em superfície e termoclina. Nota-se também a presença de recirculações da CNB, representando a atividade de mesoescala presente nesta porção da coluna d'água. Estas recirculações aparecem evidenciadas no campo médio possivelmente pela menor magnitude das correntes nesta região da coluna d'água. O vórtice mais intenso do campo médio nesta região da coluna d'água ocorre em apro-

ximadamente 47 °W, possivelmente indicando um local de permanência de vórtices mais duradoura.

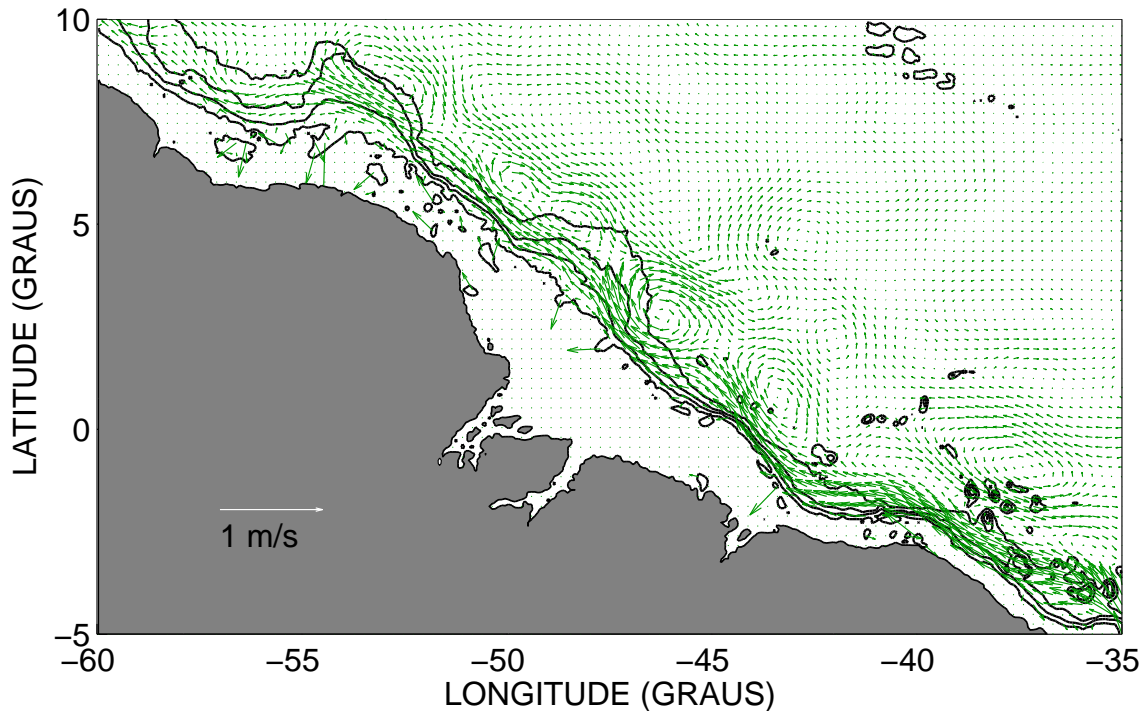


Figura 4.3: Campo médio de velocidades em subtermoclina ($\sigma_2=35.8$). A CNB segue sobre o talude da costa norte da América do Sul, apresentando recirculações, expressão da atividade de mesoescala presente na região.

4.1 Corrente Norte do Brasil

Ao cruzar o equador, isto é, aproximadamente em 44°W, a CNB média se estende a mais de 1000 metros de profundidade (Figura 4.4), da mesma forma que indicado no estudo de SCHOTT *et al.* (1998). Nesta longitude a CNB apresenta, em cerca de 0.5°S, dois núcleos: um em superfície, correspondente ao fluxo proveniente da porção central da CSE, e um subsuperficial, em aproximadamente 150 metros de profundidade, associado à SNB, de forma semelhante ao encontrado por SCHOTT *et al.* (1998) em uma seção média em 44°W, onde os autores observaram um núcleo subsuperficial de 0,4 m/s e um superficial de 0,7 m/s. No presente estudo, o núcleo superficial possui velocidades médias de 0,5m/s, enquanto o núcleo em subsuperfície possui velocidade ligeiramente menor, de 0,4 m/s.

Nesta seção, o transporte médio da CNB calculado até 1000 m é de $31 \pm 8,2$ Sv, ligeiramente inferior ao transporte médio nesta mesma seção, até a mesma profundidade, apontado por SCHOTT *et al.* (1998), de 34,6 Sv. A maior parte do transporte da CNB é confinada entre a superfície e 300 m de profundidade, em acordo com os

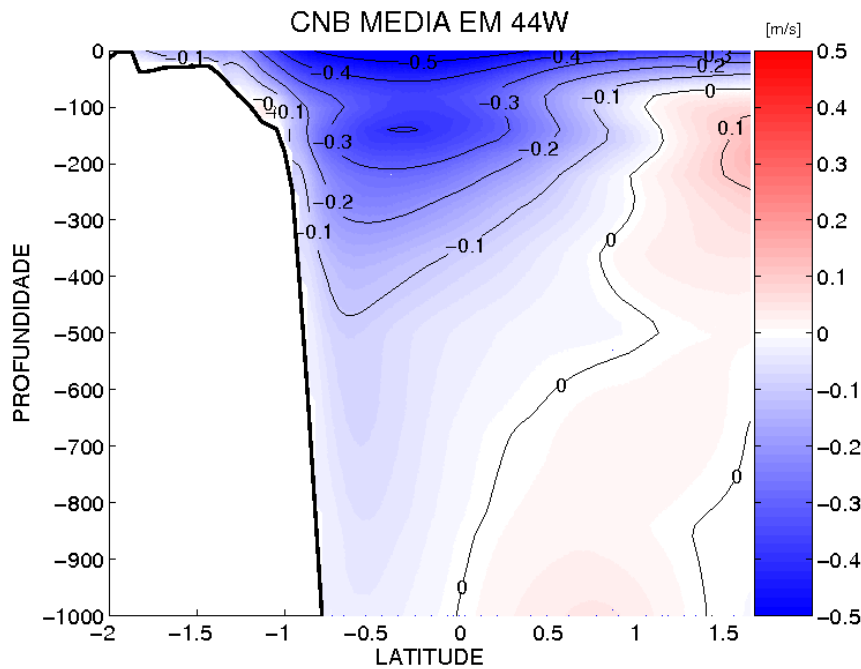


Figura 4.4: Velocidade paralela à costa média em 44°W, representando a CNB média nesta longitude. Velocidades negativas são em direção noroeste, e positivas em direção sudeste. Pode-se observar em cerca de 0,5 °S dois núcleos sobrepostos: um superficial, referente ao fluxo superficial da CSEc, e outro em subsuperfície, referente à SNB. As isolinhas de velocidade são apresentadas em preto, com intervalos de 0,1 m/s.

resultados de SCHOTT *et al.* (1998). Até 300 metros, o transporte médio da CNB em 44°W é de $20,3 \pm 5,94$, semelhante ao transporte médio indicado por SCHOTT *et al.* (1998) na mesma faixa de profundidades, de 22,4 Sv.

Mais a oeste, em 47°W, o transporte da CNB aumenta para $35,8 \pm 11,1$ Sv até 1000 m, e $22,1 \text{ Sv} \pm 8,6 \text{ Sv}$ até 300 m, comparável ao valor médio encontrado por JOHNS *et al.* (1998), de $21,2 \pm 7,8$ até 300 m, na mesma longitude. Este incremento ocorre devido contribuição de leste da CSEn, uma vez que ocorre entre o equador e aproximadamente 4°N.

A série temporal de transporte até 1000 m em 47°W apresenta flutuações (Figura 4.5), em especial oscilações que podem chegar a 35 Sv em um mesmo mês. Isto se assemelha ao encontrado por GARZOLI *et al.* (2004) na mesma longitude a partir de uma série temporal de altura dinâmica. Foi realizada uma análise espectral para a série temporal de transporte em 47°W, revelando cerca de 60-70 dias e 40-50 dias como períodos predominantes destas oscilações (Figura 4.6). Estes períodos se aproximam dos períodos das oscilações identificadas a partir de um mooring por JOHNS *et al.* (1998), de 25-40 dias e 40-60 dias, na mesma longitude. Segundo este autor, as flutuações com período de 25-40 dias são confinadas às primeiras camadas da coluna d'água, enquanto as de maior período estariam relacionadas à translação de vórtices pela região.

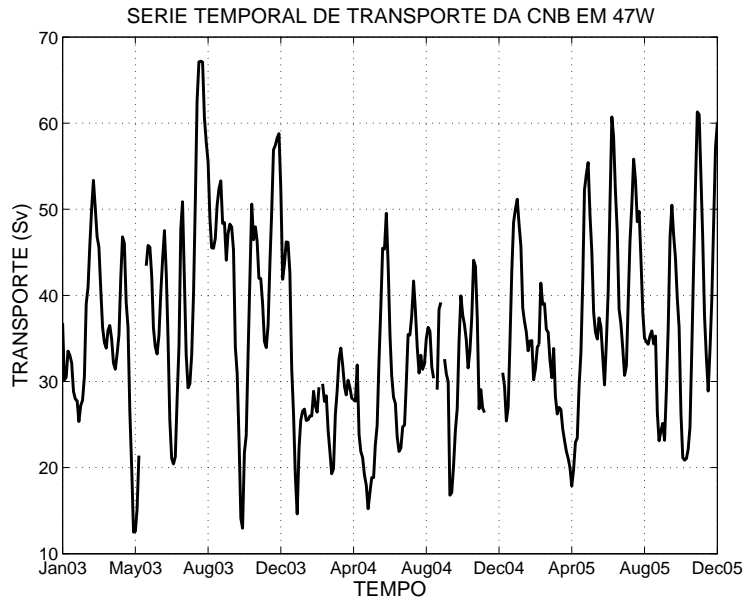


Figura 4.5: Série temporal de transporte da CNB até 1000 m em 47°W.

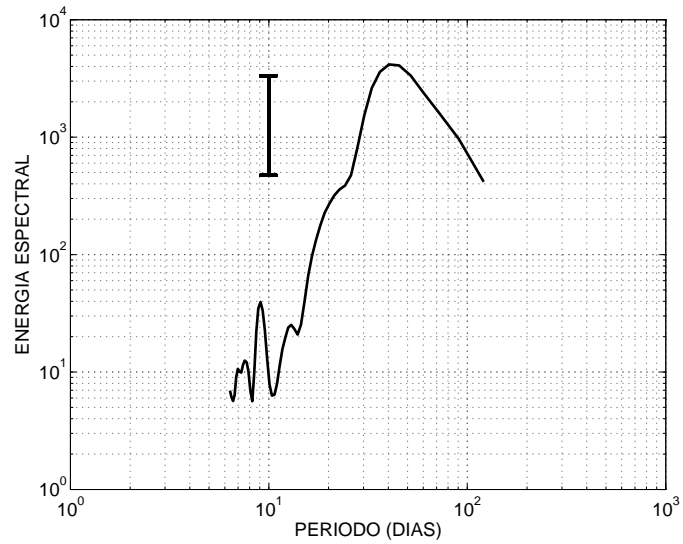


Figura 4.6: Espectro da série temporal de transporte da CNB até 1000 m em 47°W, para os três anos de resultados, com um pico em aproximadamente 40 dias. A barra à esquerda representa o intervalo de confiança estatística do espectro.

4.2 Contracorrente Norte Equatorial e Subcorrente Equatorial

A CCNE, como mostrado a partir dos campos médios, se apresenta principalmente em superfície, se estendendo ao longo do ano entre 3°e 10°N (Figura 4.7). Entre os meses de abril e junho ocorre migração do núcleo da CCNE para norte, e em setembro parece se iniciar uma bifurcação da mesma, de forma semelhante ao encontrado por URBANO *et al.* (2008) a partir de altimetria por satélite e derivadores. Em médias mensais, a CCNE se apresenta mais intensa entre junho e fevereiro, podendo apresentar velocidades médias mensais em superfície de até 0,6 m/s, enquanto no período compreendido entre março e junho, sua velocidade superficial não chega a 0,2 m/s. A porção norte resultante da bifurcação da CCNE é relativamente fraca, apresentando velocidades em superfície de 0,1 m/s, enquanto a porção sul pode apresentar velocidades de até 0,4 m/s durante o mesmo período.

A CCNE apresentou posição média de 6°N em 38°W, semelhante ao indicado a partir de altimetria por satélite por FONSECA *et al.* (2004). Seu núcleo se situa em subsuperfície durante o primeiro semestre, com profundidade média de cerca de 46 metros, e em superfície durante o segundo semestre. O núcleo subsuperficial no primeiro semestre corrobora a idéia de que, nesta região, durante o período compreendido entre outubro e abril, a ITCZ em sua posição mais a sul implica em transporte de Ekman na região, devido aos alíseos de nordeste, para noroeste, podendo mascarar o núcleo da CCNE. Resultado semelhante é apontado por URBANO *et al.* (2006).

A SCE apresenta variabilidade sazonal em sua profundidade. Ela pode ser observada em superfície durante o período compreendido entre os meses de fevereiro e maio, enquanto no restante do ano permanece em subsuperfície, sob o fluxo formado pela união superficial da CSEn e CSEc, em 0°N (Figura 4.7). Em seus resultados, URBANO *et al.* (2008) verificam assinatura superficial do núcleo da SCE durante a maior parte do ano, porém mais intensa, com anomalias de velocidade de 0,2 m/s, durante os meses de fevereiro a junho, que corresponde ao período durante o qual a SCE se apresentou à superfície no presente estudo, com velocidades máximas em abril, de 0,5 m/s em superfície.

Em médias mensais podem ser identificados dois padrões de circulação superficial, um mais evidenciado em abril e outro em julho (Figura 4.8). A circulação superficial nos demais meses consiste em intermediário entre os padrões de abril e julho, sendo que entre fevereiro e junho a circulação superficial se aproxima do indicado pela média do mês de abril e no restante do ano a circulação é mais similar ao indicado pela média do mês de julho.

No mês de abril (Figura 4.8a), identifica-se a retroflexão CNB-CCNE bem mar-

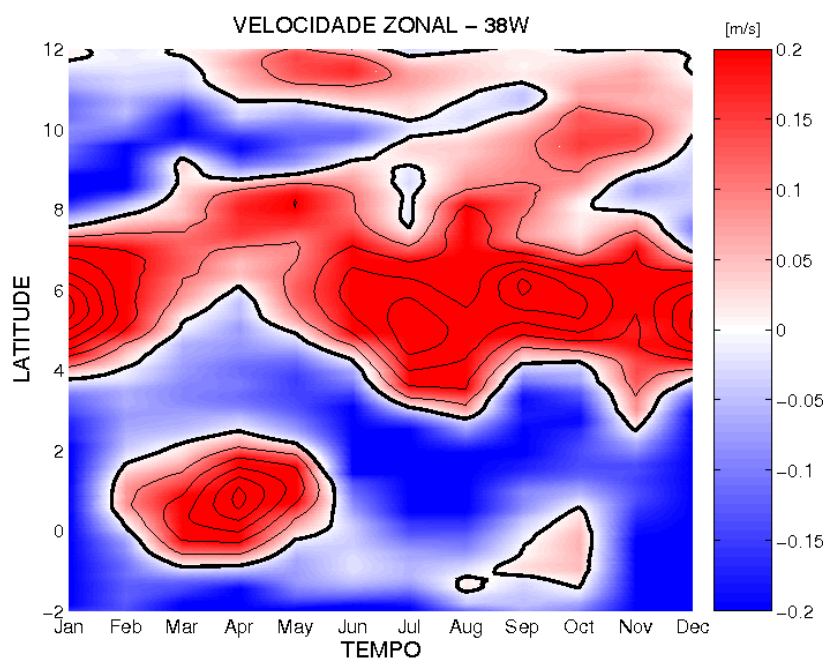
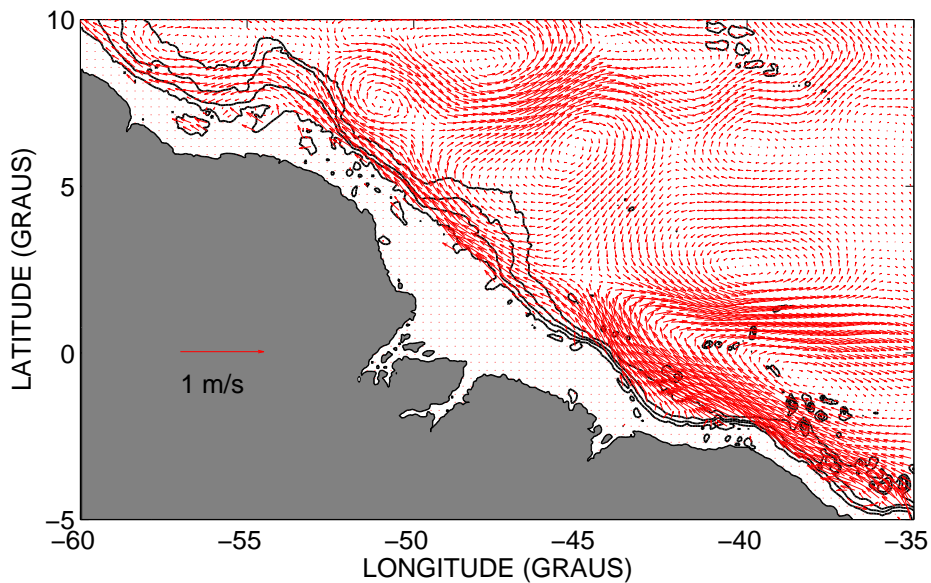


Figura 4.7: Velocidades zonais médias mensais em superfície em 38°W. É verificada a migração da CCNE entre 3° e 10°N. No período compreendido entre maio e julho a SCE emerge à superfície, entre 0° e 2°N. A CNB se situa junto à costa, seguindo para oeste, ao longo de todo o ano, entre 0° e 2°S. O fluxo para oeste que se vê a norte da CNB corresponde à CSEn, até cerca de 4°N. As isotacas estão em intervalos de 0,1 m/s.

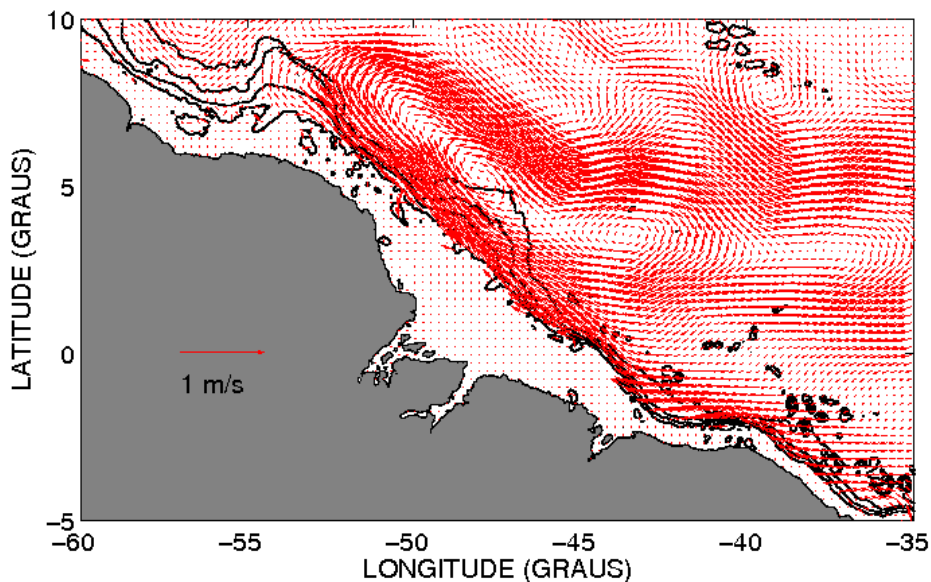
cada em aproximadamente 51 °W, alimentando a CCNE, em aproximadamente 8°N. pode ser observada também a retroflexão CNB-SCE, presente em superfície e mais intensa que a retroflexão CNB-CCNE. A oeste da retroflexão CNB-CCNE, em cerca de 8 °N, ocorre um fluxo junto à costa para noroeste, constituindo a denominada Corrente das Guianas, presente na região somente durante esta época do ano (BOURLES *et al*, 1999b; SCHOTT *et al*, 1998; STRAMMA e SCHOTT, 1999). A existência da retroflexão CNB-SCE em superfície é ilustrada também pela Figura 4.7, onde se observa que as maiores velocidades da SCE em superfície ocorrem em abril. O fato da retroflexão CNB-SCE não ser presente em um campo médio de velocidade superficial sugere que esta, apesar de ocorrer em superfície durante determinado período, não é feição preponderante na região.

Durante o restante do ano, o campo de correntes superficiais é mais similar ao campo médio do mês de julho (Figura 4.8b), quando não há assinatura em superfície da retroflexão CNB-SCE, e o fluxo sobre a SCE, que durante este período do ano está completamente imersa, é para oeste. A CCNE se encontra mais a sul que no mês de abril, em aproximadamente 6°N. A retroflexão superficial se encontra mais intensa, assim como a CCNE. A continuação do fluxo da CNB para noroeste após a retroflexão, isto é, a Corrente das Guianas, não é visualizada. Novamente a descrição do campo de correntes superficiais pode ser relacionado à Figura 4.7, na qual a CCNE

é mais intensa e a SCE não pode ser visualizada em superfície no período entre julho e janeiro. Portanto, nos resultados analisados, embora possam ser distinguidos dois padrões de circulação, não ocorre inversão da CCNE, como indicado por STRAMMA e SCHOTT (1999) e GARZOLI *et al.* (2004). A CCNE esta ocorre durante o ano todo, fluindo para leste, embora com menores velocidades durante a primavera, com seu núcleo superficial mascarado pelo transporte de Ekman. A emersão da retroflexão CNB-SCE ocorre durante a primavera nos resultados, como indicado por STRAMMA e SCHOTT (1999).



(a) Média do mês de abril do campo superficial de velocidades



(b) Média do mês de julho do campo superficial de velocidades

Figura 4.8: Campos médios mensais de velocidade superficial, ilustrando os extremos do padrão de circulação ao longo do ano.

4.3 Os vórtices da Corrente Norte do Brasil

Ao longo do período estudado, foi verificada a formação de vórtices nas três porções da coluna d'água, apresentando diferenças entre os vórtices identificados em diferentes níveis. Características que apresentaram variações entre os vórtices de diferentes regiões da coluna d'água foram diâmetro, região preferencial de formação e número de vórtices desprendidos. No entanto, os vórtices das três regiões apresentam trajetória semelhante (Figuras 4.9, 4.10 e 4.11), ao longo do talude da costa norte da América do Sul. Este fato sugere que, apesar das diferenças que os vórtices apresentam entre si, processos semelhantes atuam em diferentes camadas, uma vez que o comportamento dos mesmos longo do tempo e espaço é similar. Na seção a seguir, os vórtices de cada região da coluna d'água e seu comportamento são analisados em detalhe.

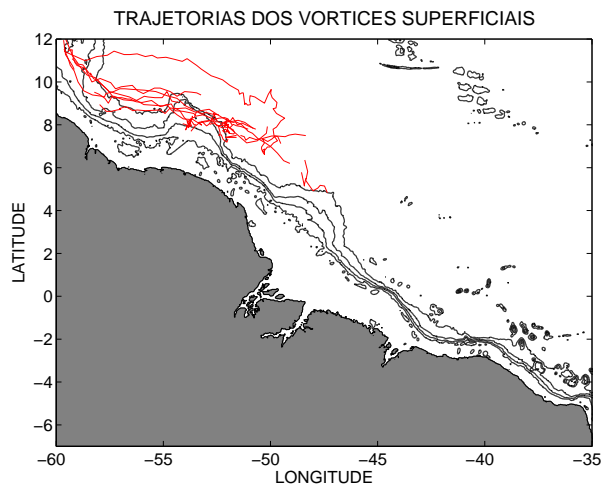


Figura 4.9: Trajetórias dos vórtices de superfície.

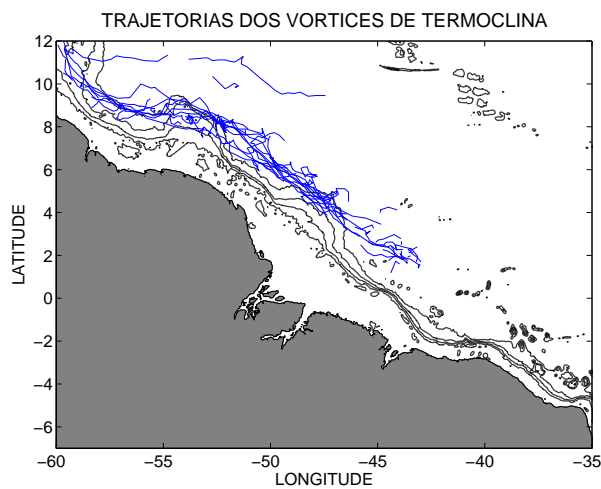


Figura 4.10: Trajetórias dos vórtices de termoclina.

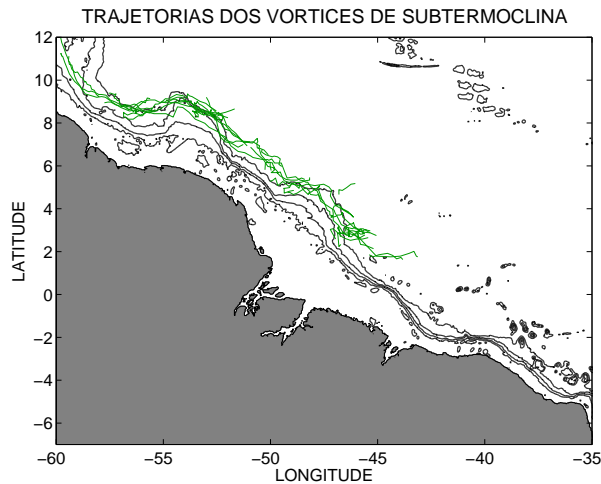


Figura 4.11: Trajetórias dos vórtices de subtermoclina.

4.3.1 Formação de vórtices

Em superfície foram formados durante os três anos de simulação 14 vórtices, apresentando variação interanual na taxa de desprendimento; 7 vórtices foram formados em 2003, 4 em 2004 e 3 em 2005. Uma variação interanual de formação de vórtices superficiais da CNB é documentada na literatura, por exemplo por GONI e JOHNS (2003) e FRATANTONI *et al.* (1995). A taxa média de geração de vórtices, de 4,6 vórtices por ano, se assemelha ao apontado por GONI e JOHNS (2001) e GONI e JOHNS (2003), assim como seu raio de máxima velocidade médio de 151 km se aproxima ao limite superior encontrado por JOHNS *et al.* (2003), que encontrou variação entre 85 e 160 km.

Os vórtices formados em superfície não possuem origem comum; apenas 10 são desprendidos da retroflexão CNB-CCNE. Dos quatro restantes, assinalados com círculos na Figura 4.12, um é formado antes do início do período estudado, portanto a existência de uma associação com a retroflexão superficial não pode ser avaliada.

Os três demais foram formados durante período em que a retroflexão não se encontrava estabelecida (Tabela 4.1). A formação de vórtices em períodos em que a retroflexão não se encontra estabelecida também é apontada pelo estudo de GONI e JOHNS (2001), que identificam, em 6 anos de análise de dados de altimetria, a formação de 10 vórtices sem origem definida, em uma taxa de formação superior à apresentada no presente estudo. Os mesmos autores apontam que, do total de vórtices identificados, 40% foram sem origem definida.

Dos 14 vórtices desprendidos, apenas 7 chegam à longitude de 58°W, dos quais 6 ultrapassam esta longitude e seguem para norte, paralelamente às isobatimétricas, saindo do domínio estudado. Dos vórtices restantes, 3, indicados pelos círculos vermelhos na Figura 4.12, são reabsorvidos pela retroflexão superficial e 4 se desintegram em meio às correntes, um em cerca de 52°W e três em 54 °W.

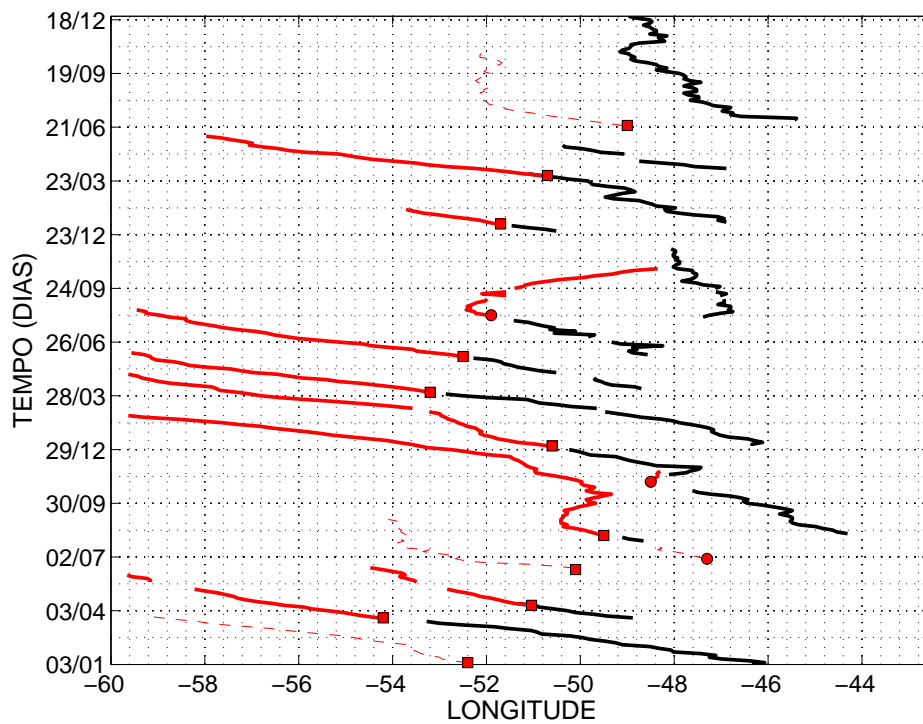


Figura 4.12: Localização do centro dos vórtices intensificados em superfície ao longo do tempo. As linhas cheias indicam a trajetória dos vórtices despreendidos da retroflexão CNB-CCNE; as linhas tracejadas indicam os vórtices que não foram originados da retroflexão. Em preto é assinalada a posição da retroflexão superficial ao longo do tempo. Os círculos e quadrados indicam o momento a partir do qual cada vórtice foi identificado e começou a ter sua trajetória marcada; os círculos assinalam vórtices que são reabsorvidos pela retroflexão CNB-CCNE, enquanto quadrados indicam vórtices que deixam o domínio ou se desintegram antes de deixar o domínio.

Tabela 4.1: Características principais dos vórtices intensificados em superfície.

Vórtice	Desprendido da retroflexão	Data de formação	Diâmetro v_{max} (km)	Diâmetro total (km)	Destino
a	?	03-Jan-2003	305	417	sai do domínio estudado
b	sim	25-Mar-2003	275	470	sai do domínio estudado
c	sim	27-Abr-2003	220	387	desintegração em 54.5 °W
d	nao	23-Jun-2003	496	694	desintegração em 54 °W
e	nao	29-Jun-2003	387	583	reabsorvido pela retroflexão
f	sim	13-Ago-2003	403	615	sai do domínio estudado
g	sim	30-Out-2003	317	470	reabsorvido pela retroflexão
h	sim	07-Jan-2004	340	471	sai do domínio estudado
i	sim	09-Abr-2004	211	420	sai do domínio estudado
j	sim	14-Jun-2004	155	330	sai do domínio estudado
k	sim	13-Ago-2004	278	451	reabsorvido pela retroflexão
l	sim	13-Jan-2005	278	471	desintegração em 54 °W
m	sim	07-Abr-2005	286	533	desintegração em 58 °W
n	nao	18-Jun-2005	275	512	desintegração em 52 °W

Em termoclina, foram formados 37 vórtices, resultando em uma taxa de 12,3 vórtices formados a cada ano. Destes, 25 foram desprendidos da retroflexão CNB-SCE (Figura 4.13), sendo 15, indicados por círculos na Figura 4.13, reabsorvidos pela mesma, enquanto os 10 restantes, indicados por linhas cheias na Figura 4.13, ultrapassam a longitude de 48°W. Além dos vórtices desprendidos da retroflexão CNB-SCE, 12 vórtices cuja origem não é relacionada com esta retroflexão foram identificados, indicados pelas linhas tracejadas na Figura 4.13. Destes, 6 têm sua origem associada a um vórtice em subtermoclina que induz a formação de um vórtice em termoclina. A geração dos vórtices restantes é associada à propagação vertical do sinal de um vórtice em superfície previamente formado.

Os vórtices identificados em termoclina possuem diâmetro reduzido em relação aos vórtices identificados em superfície, com diâmetro de máxima velocidade médio de 125 km. Este valor é condizente com o apontado por JOHNS *et al.* (2003), de 90 a 105 km, embora os autores tenha usado a isotaca de 0,15 m/s para delimitação dos vórtices em seu estudo.

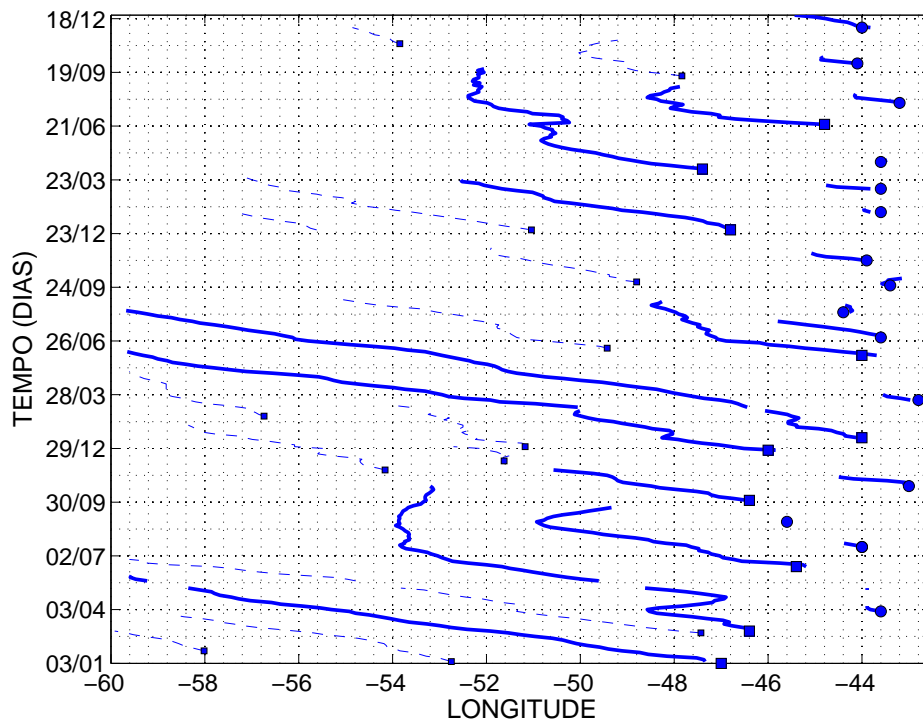


Figura 4.13: Localização do centro dos vórtices identificados em termoclina ao longo do tempo. As linhas cheias indicam a trajetória dos vórtices desprendidos da retroflexão CNB-SCE; as linhas tracejadas indicam os vórtices que não foram originados da retroflexão. Os círculos e quadrados indicam o momento a partir do qual cada vórtice foi identificado e começou a ter sua trajetória marcada. Círculos assinalam vórtices que são reabsorvidos pela retroflexão CNB-SCE, enquanto quadrados indicam vórtices que deixam o domínio ou se desintegram antes de deixar o domínio.

Em subtermoclina são formados 23 vórtices, dos quais somente 3 ultrapassam a

longitude de 58°W e deixam o domínio. Os vórtices identificados nesta porção da coluna d'água são em geral formados nas longitudes entre 45 e 51°W (Figura 4.14), e seu processo de formação não está relacionado à retroflexão da corrente nesta parte da coluna d'água. JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003) identificam a formação de vórtices nesta porção da coluna d'água em seu estudo numérico, e associam a formação dos mesmos à instabilização da porção intermediária da CNB ao cruzar o equador. Estes autores encontram uma taxa de 4 a 5 vórtices formados ao ano, inferior ao encontrado no presente estudo, de 7,6. Já GARRAFFO *et al.* (2003) identificam vórtices subsuperficiais porém não especificam a porção da coluna d'água a que se referem, e encontram taxa de formação de 2 vórtices ao ano, inferior às taxas de formação encontradas no presente estudo tanto para vórtices de termoclina quanto para vórtices de subtermoclina.

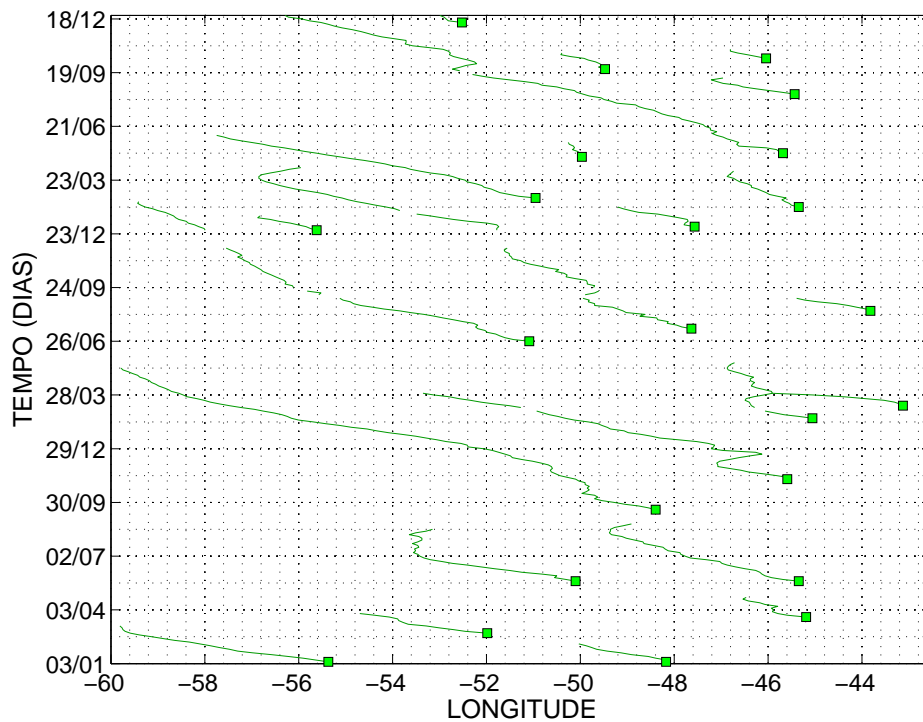


Figura 4.14: Localização do centro dos vórtices identificados em termoclina ao longo do tempo. Os quadrados indicam o momento a partir do qual o vórtice foi identificado e começou a ter sua trajetória marcada.

De forma semelhante ao que ocorre em termoclina, a propagação vertical do sinal de um vórtice em outra porção da coluna d'água interfere na formação de vórtices em subtermoclina. Dos 23 vórtices identificados nesta porção da coluna d'água, 10 se formam por este processo, a partir da propagação do sinal de vórtices identificados em termoclina. Três se formam ao mesmo tempo e na mesma região que vórtices de termoclina, como feições acopladas. Três são formados na região da retroflexão CNB-SCE; destes, dois atuam como catalisador para o desprendimento

de vórtices desta retroflexão, e um se forma nesta região, porém não interfere no despreendimento de vórtices em termoclina. A origem dos 7 demais não pôde ser identificada, no entanto os mesmos são formados na região da retroflexão CNB-SCE, porém em situações nas quais os campos de velocidade para a termoclina e subtermoclina são distintos.

Os vórtices de subtermoclina apresentaram diâmetro reduzido em relação aos vórtices identificados em termoclina. Este resultado é corroborado pelo estudo observacional de JOHNS *et al.* (2003), que apontam raio de máxima velocidade entre 90 e 105 km, enquanto no presente estudo é encontrado raio de máxima velocidade médio de 90, variando entre 58 e 140 km, para vórtices de subtermoclina.

4.3.2 Relação com ondas Equatoriais

JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003) propõem que os vórtices da retroflexão da CNB são formados a partir de reflexão na costa brasileira de ondas de Rossby na CCNE. A fim de investigar a existência deste mecanismo nos resultados analisados, foi pesquisada a propagação de sinais na corrente citada. São verificadas oscilações em superfície (Figura 4.15), cujo período predominante varia entre 40 e 90 dias em função da longitude (Figura 4.16).

A extensão zonal do sinal observado varia ao longo do ano, se estendendo ao máximo a leste durante o segundo semestre, no mês de dezembro nos anos de 2003 e 2004 e durante todo o segundo semestre do ano de 2005, e se restringindo mais a oeste durante os meses de abril a junho nos três anos de resultados. Percebe-se também que durante o primeiro semestre, os sinais identificados têm maior velocidade de propagação em comparação com o segundo semestre, período no qual os sinais são aproximadamente estacionários. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por MCCLEAN e KLINCK (1995) a partir de modelagem numérica, com oscilações com período de 50 dias. Segundo os autores, a geração de ondas é iniciada aproximadamente em agosto, quando a retroflexão CNB-CCNE é mais evidente e são produzidas ondas de Rossby confinadas à região próxima à fronteira oeste, com pequena velocidade de grupo para leste. À medida em que a CCNE se intensifica, estas ondas se estendem, devido à advecção para leste pela CCNE, ao interior da bacia, onde se dissipam. Então um padrão quase-estacionário de ondas de Rossby é estabelecido durante o segundo semestre. A partir de dezembro, com a atenuação da CCNE, as ondas aumentam sua velocidade de propagação e voltam a se concentrar na fronteira oeste. Em abril/maio, período em que a CCNE está mais fraca, poucos sinais ainda podem ser observados.

A propagação de sinais é identificada a partir de aproximadamente 25°W, com intensificação da energia a partir de 35°W, atingindo o pico energético a oeste de

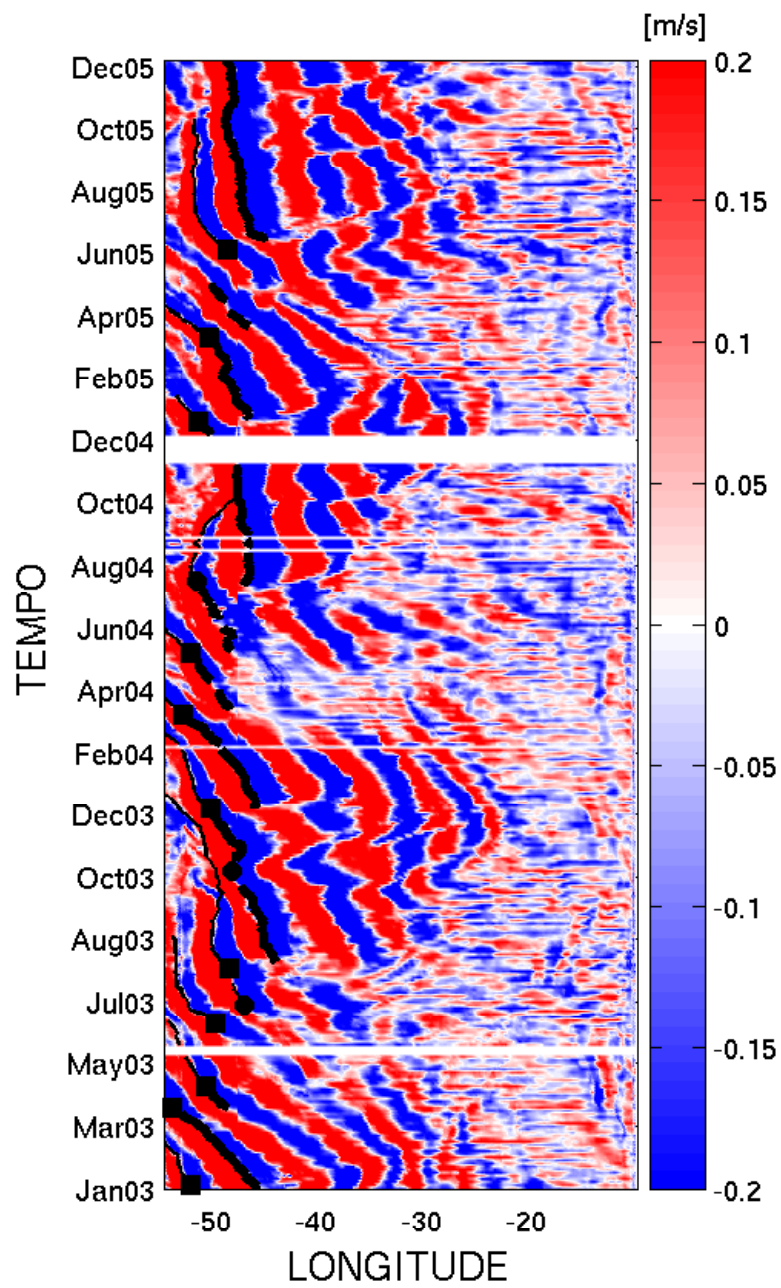


Figura 4.15: Velocidade meridional em superfície ao longo de uma seção zonal em 6°N, latitude onde se observa a CCNE média, ao longo do tempo.

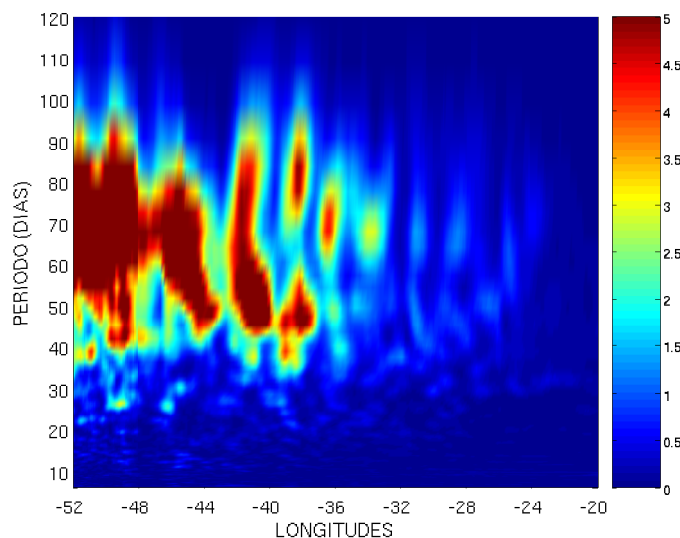


Figura 4.16: Espectro dos sinais em velocidade meridional identificados em uma seção em 6°N, ao longo da CCNE durante o período estudado.

48°W.

Semelhantemente ao apontado por JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003), foi verificada nos resultados estreita relação entre os sinais que se propagam na CCNE e o processo de formação e desprendimento de vórtices; os vórtices da retroflexão CNB-CCNE são desprendidos a partir da chegada destes sinais à fronteira oeste. O período das oscilações existentes no presente estudo é superior ao encontrado no estudo de JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003), de 50 dias. Esta diferença no período das oscilações entre o presente estudo e o estudo citado implica em diferenças na taxa de desprendimento de vórtices. Os autores descrevem a formação de 6-7 vórtices ao ano, enquanto no presente trabalho 4-5 vórtices são desprendidos por ano, em média. Estes sinais possuem comprimento de onda variando entre 660 e 990 km, e velocidade de propagação de aproximadamente -0,1 m/s, valores semelhantes aos valores encontrados por JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003), de 700 a 900 km com velocidade de fase entre -0,09 a -0,13 m/s, apontado pelos autores como ondas de Rossby.

De forma semelhante ao que ocorre na CCNE, é verificada propagação de sinais na SCE (Figuras 4.17, 4.18). Ao longo da corrente o pico mais significativo de energia espectral é relacionado ao período de 40 dias (Figura 4.19). No entanto, a região com maior energia associada a este período se situa entre as longitudes 41°e 42 °W, se propagando a partir de cerca de 36°W. Uma possível explicação para o pico de energia ocorrer nesta região é o fato de que as longitudes de 41°e 42 °W correspondem ao local onde se encontram os limites entre um vórtice recém desprendido e a retroflexão CNB-SCE, uma vez que em geral o desprendimento de

um vórtice é acompanhado da retração da retroflexão, a exemplo da retroflexão superficial.

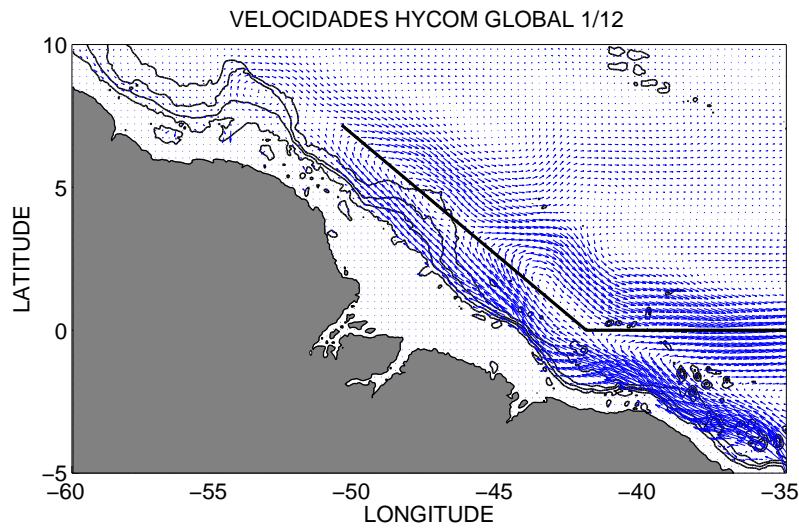


Figura 4.17: Campo médio de velocidades em termoclina, evidenciando a região preferencial de translação de vórtices.

Na região da retroflexão CNB-SCE, semelhantemente ao encontrado na retroflexão CNB-CCNE, o desprendimento de vórtices é relacionado aos sinais que se propagam na corrente alimentada pela retroflexão, neste caso, a SCE. Verifica-se que a chegada dos sinais à fronteira oeste pode ter como consequência uma perturbação da retroflexão, causando extensão da mesma, ou a formação de vórtices, que podem ou não ser reabsorvidos. Estes efeitos da chegada de sinais à fronteira oeste podem ser observados verificando-se, perpendicularmente ao eixo central da região de translação de vórtices (Figura 4.17), a variação temporal da velocidade (Figura 4.18).

Os sinais identificados na SCE possuem período de 40 dias, comprimento de onda de 1110-1776 km e velocidade de propagação de -0,5 m/s, respectivamente. Estes valores são próximos ao limite superior de valores associados a ondas de instabilidade tropical, cujos valores típicos de período são de 20 a 50 dias, de comprimento de 600 a 1200 m, e de velocidade de propagação de 0,2 a 0,5 m/s (JOCHUM *et al.*, 2004). Portanto, os resultados sugerem que estes sinais identificados na SCE são associados às ondas de instabilidade tropical. No entanto, na região de translação de vórtices, a oeste da retroflexão CNB-SCE, o período é modificado de 40 para aproximadamente 60-90 dias, que corresponde ao período identificado por JOHNS *et al.* (1998) em 47°W, a cerca de 300 metros de profundidade, a partir de um mooring. Os autores associam este período a algum processo que pode interferir no desprendimento de vórtices superficiais, que no presente estudo consiste na translação de vórtices de termoclina, desprendidos da retroflexão CNB-SCE, que atuam como catalisadores

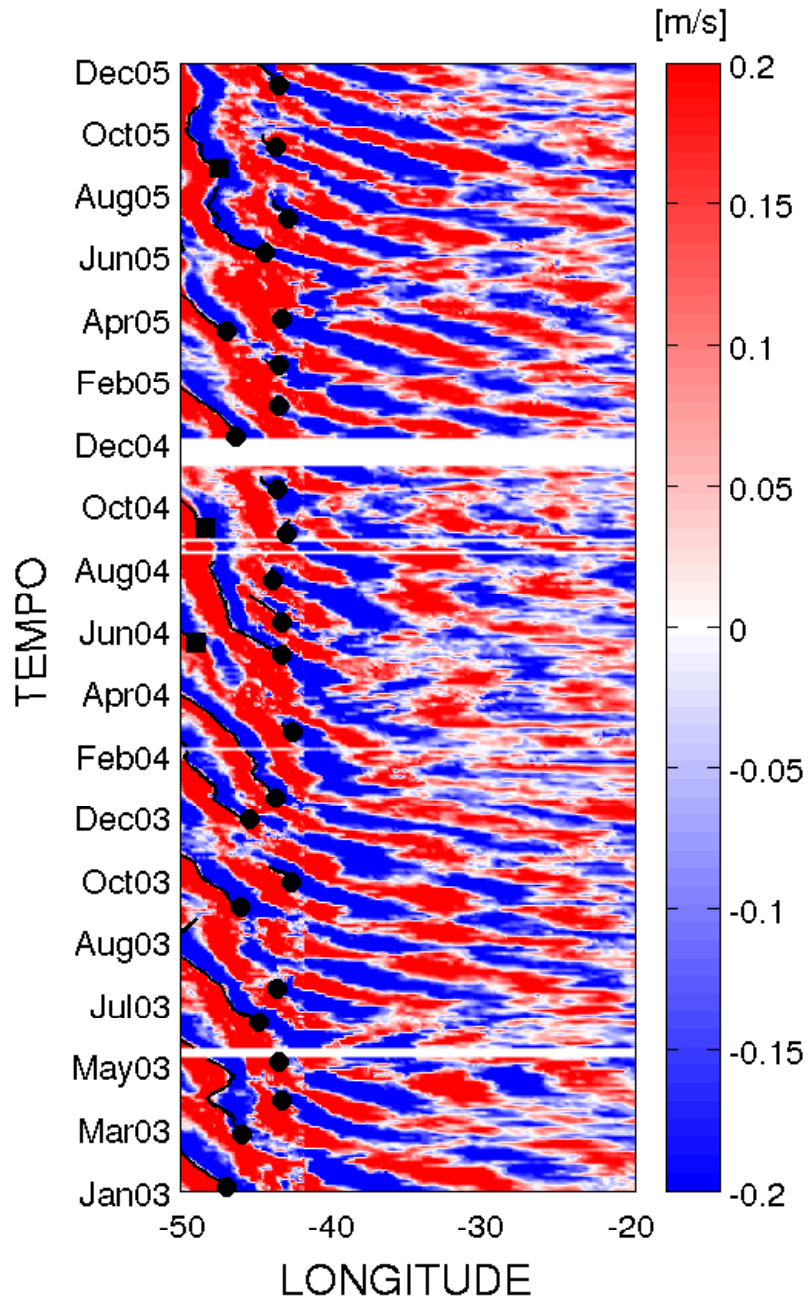


Figura 4.18: Velocidade em termoclina perpendicular ao eixo indicado na Figura 4.17, ao longo do período estudado. Os quadrados e círculos indicam o momento e longitude em que um vórtice é formado.

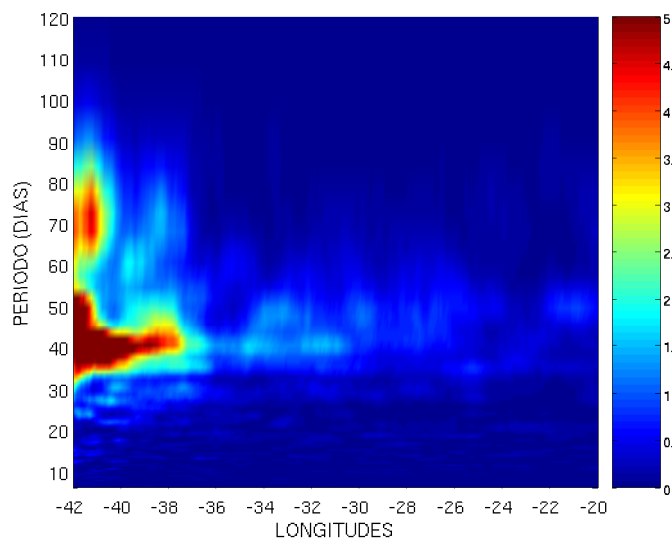


Figura 4.19: Espectro dos sinais em velocidade meridional identificados em uma seção ao longo da SCE e em parte da região de translação de vórtices de termoclina durante o período estudado.

para desprendimento de vórtices da retroflexão superficial.

Em subtermoclina, apesar de na média não ser observada uma retroflexão, também pode ser identificada propagação de sinais relacionada à formação de vórtices (Figuras 4.20 e 4.21). Estes sinais podem dar origem a vórtices ou apenas causar perturbações, como meandramentos da corrente. No espectro destas oscilações de subtermoclina é encontrada menos energia e esta é mais difusa que em superfície e termoclina, exceto por uma região centrada em 35°W , que se destaca do restante do domínio, com energia associada ao período de 40 dias (Figura 4.22).

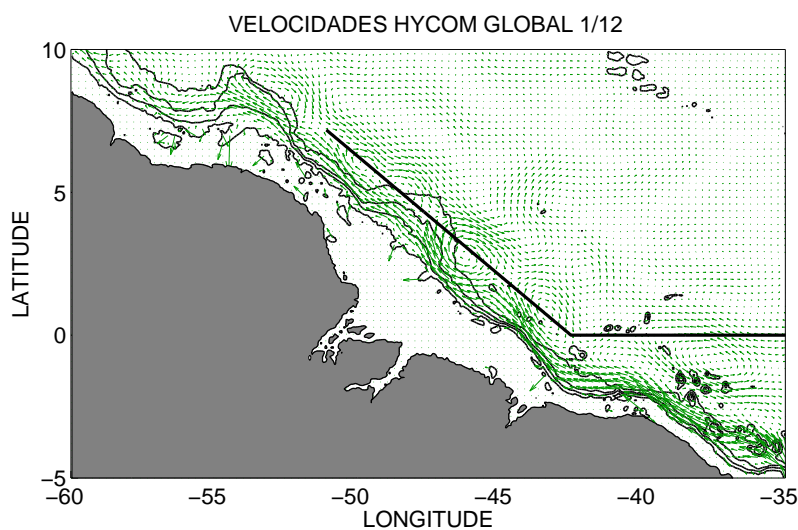


Figura 4.20: Campo médio de velocidades em subtermoclina, evidenciando o eixo utilizado para análise dos sinais verificados em velocidade.

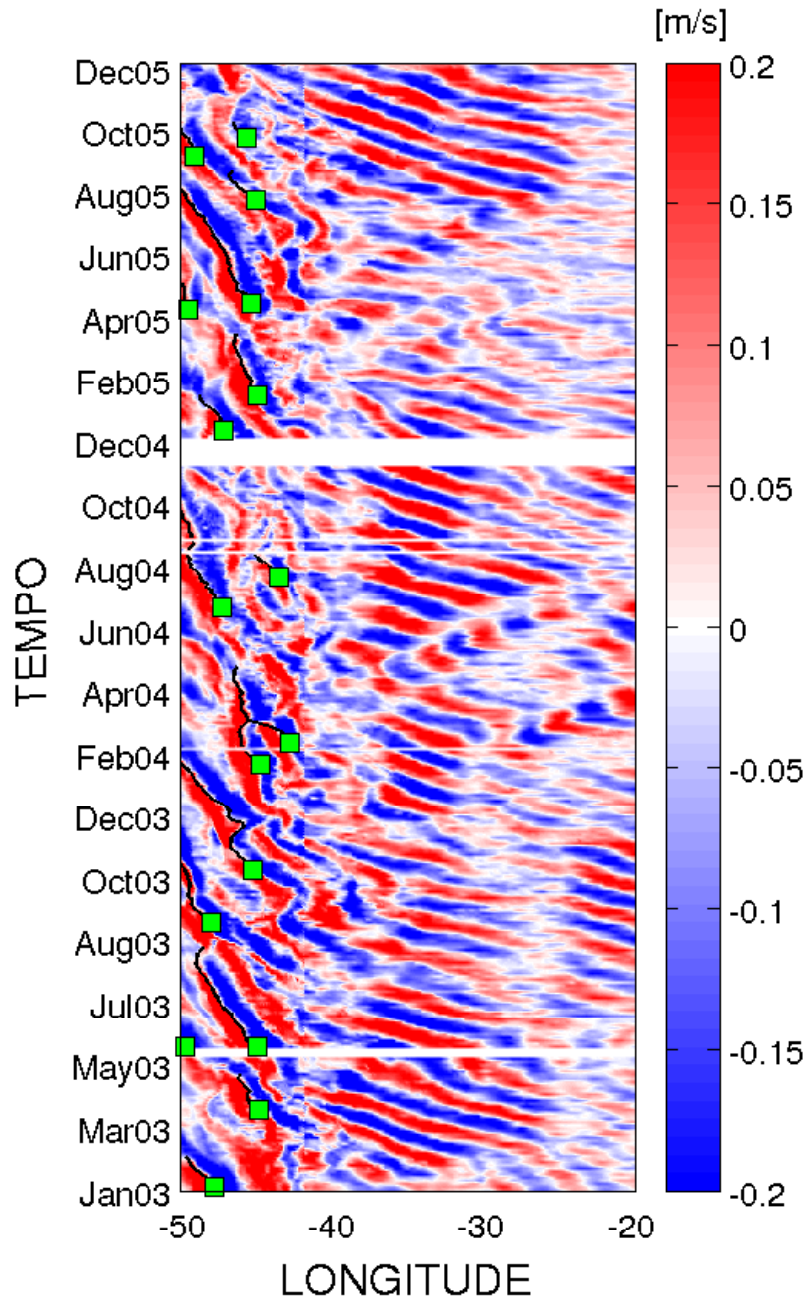


Figura 4.21: Velocidade em subtermoclina perpendicular ao eixo indicado na Figura 4.20, ao longo do período estudado. Os quadrados verdes indicam o momento e longitude em que um vórtice é formado.

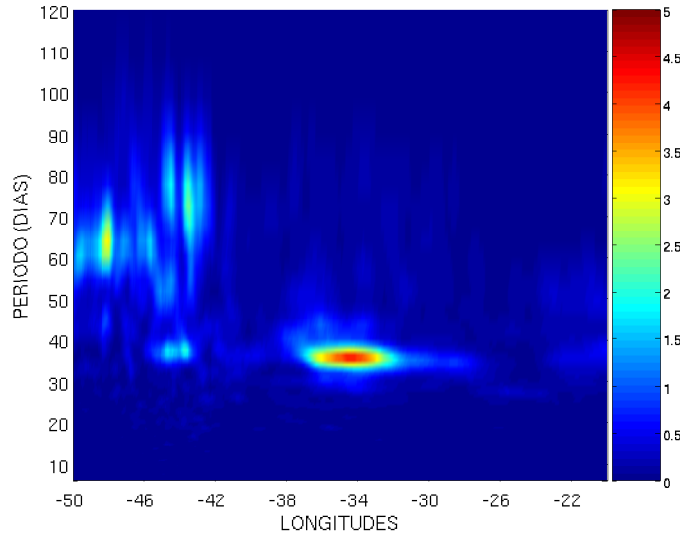


Figura 4.22: Espectro dos sinais em velocidade meridional identificados em subtermoclina durante o período estudado.

4.3.3 Interações entre regiões da coluna d'água

Após identificação da formação de vórtices em diferentes regiões da coluna d'água, foram analisadas as possíveis interações entre os mesmos. Foi verificado que a presença de um vórtice em uma porção da coluna d'água pode implicar na formação ou desprendimento de um vórtice em outra porção. Isto ocorre no caso de vórtices de termoclina sendo formados por propagação vertical do sinal de um vórtice de subtermoclina ou de superfície, ou no caso de vórtices de subtermoclina e termoclina que atuam como catalisadores para o desprendimento de vórtices das retroflexões CNB-CSE e CNB-CCNE, respectivamente. No caso de ausência de clara interação entre as regiões da coluna d'água, a diferença nas regiões de formação dos vórtices também contribui com o estudo do mecanismo de formação dos mesmos, uma vez que sugere a ocorrência de processos distintos de formação de vórtices, ou ao menos geograficamente deslocados, em diferentes regiões da coluna d'água.

A partir da identificação da localização ao longo do tempo dos núcleos dos vórtices das três regiões da coluna d'água estudadas, foram identificadas diferentes formas de interação entre os mesmos (Figura 4.23). São identificados:

- A) vórtices que são identificados somente em uma porção da coluna d'água, independentemente das outras;
- B) vórtices em diferentes porções da coluna d'água com origens independentes, que se sobrepõem e então seguem sobrepostos, ao menos durante certo período;
- C) vórtices desprendidos de uma retroflexão (CNB-CCNE ou CNB-SCE) cujo desprendimento é catalisado por um vórtice previamente formado na porção inferior da coluna d'água;

D) vórtices que possuem componentes sobrepostas, nas três porções da coluna d'água, formados aproximadamente ao mesmo tempo, na mesma região.

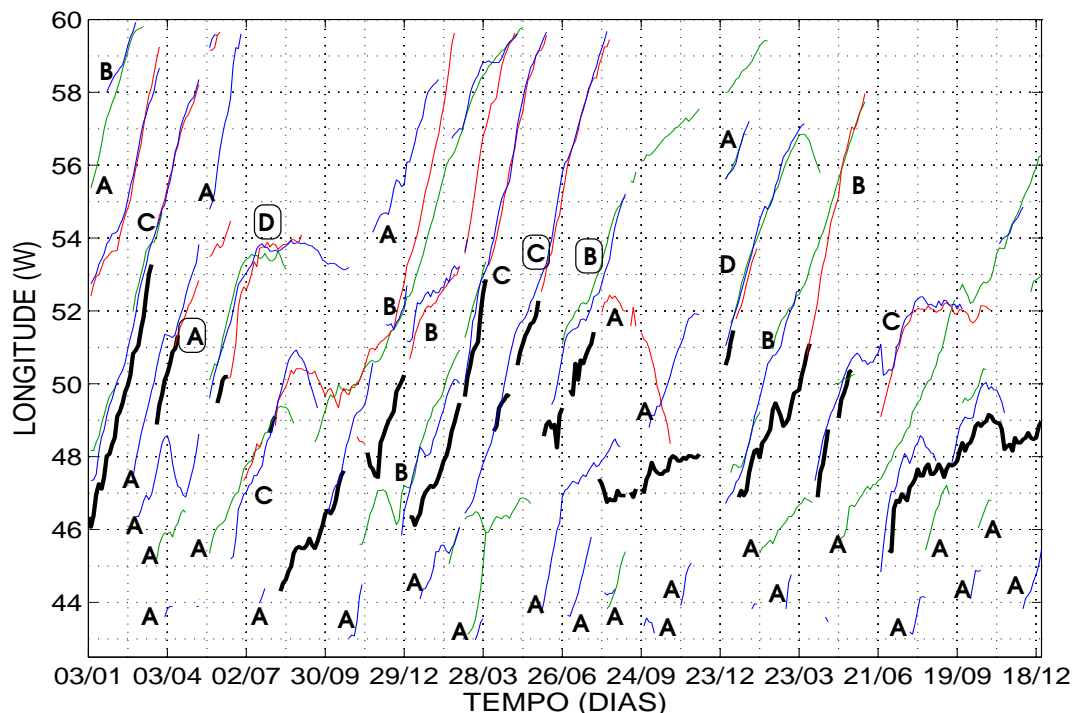


Figura 4.23: Trajetória meridional dos vórtices da CNB ao longo do tempo. Em preto observa-se a posição da retroflexão superficial (CNB-CCNE), em vermelho os vórtices superficiais, em azul os vórtices identificados em termoclina e em verde os vórtices de subtermoclina. As letras identificam o tipo de processo que ocorre e os quadrados asinalam casos que exemplificam os quatro processos e que serão descritos em detalhe no texto.

A seguir serão descritos alguns eventos caracterizando os diferentes casos de interação entre os vórtices identificados por quadrados na figura 4.23.

Processo tipo A

Em abril do ano de 2003 pode ser identificado um processo do tipo A (Figura 4.24). Neste caso, há a formação e desprendimento de um vórtice superficial, praticamente sem sinal em termoclina ou subtermoclina.

Em 09 de abril pode-se verificar a existência da retroflexão superficial, em cerca de 51°W , com um meandro prestes a se destacar (Figuras 4.24a e 4.24b). No meandro, a parte sul apresenta um núcleo superficial e outro a aproximadamente 50 metros de profundidade, ambos com velocidade de $0,6\text{ m/s}$, enquanto a porção norte apresenta núcleo superficial com velocidade ligeiramente menor, que a porção sul, de $0,5\text{ m/s}$. A porção sul do vórtice se estende a cerca de 150 metros de profundidade, e abaixo desta é observado um fluxo em sentido contrário. Este fluxo, com

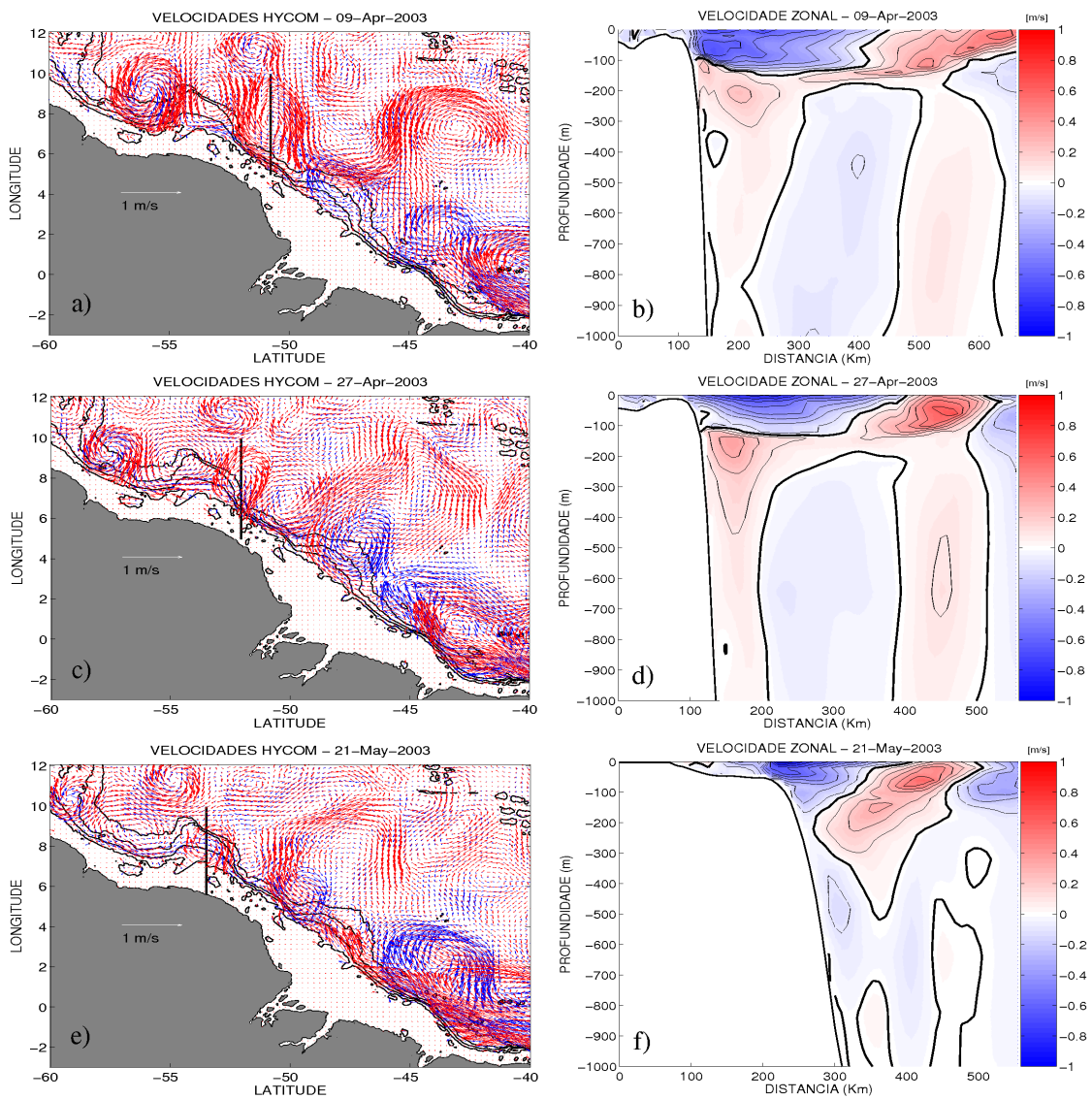


Figura 4.24: Evolução espaço-temporal de um processo do tipo A. Esquerda: Campos de velocidade para a superfície (vermelho) e termoclina (azul). Direita: seções de velocidade zonal, cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade zonal nula.

velocidades máximas de 0,2 m/s a aproximadamente 200 metros de profundidade, é a feição mais significativa da circulação abaixo de 200 metros de profundidade, estando conectado com a porção norte do meandro.

Com o destacamento do vórtice, a retroflexão se retrai, se apresentando mais a leste (Figuras 4.24c e 4.24d). O fluxo para sudeste abaixo da porção sul do vórtice se intensifica, possuindo velocidades máximas de 0,3 m/s. O lado sul perde seu núcleo subsuperficial, apresentando somente um núcleo superficial de 0,7 m/s, enquanto no lado norte ocorre aprofundamento do núcleo para cerca de 50 metros de profundidade, no entanto a velocidade máxima de 0,6 m/s se mantém.

O vórtice desprendido então translada para noroeste, acompanhando a costa (Figura 4.24e). Ao longo da trajetória, o lado sul se fortalece, apresentando velocidade de até 0,9 m/s, e o fluxo abaixo da porção sul se desprende da costa e se une à porção norte do vórtice, resultando em uma estrutura de dois núcleos: um superficial de 0,5 m/s e um subsuperficial de 0,3 m/s (Figura 4.24f), além de uma inclinação para norte do eixo do vórtice.

Processo tipo B

Em outubro de 2004 pode ser observado um processo do tipo B (Figura 4.25). Neste caso, há a geração de um vórtice intensificado em subsuperfície, formado pela sobreposição de vórtices identificados em termoclina e subtermoclina, praticamente sem sinal em superfície.

Há inicialmente um vórtice intensificado em termoclina previamente desprendido da retroflexão CNB-SCE, em cerca de 50°W. Este vórtice se situa a oeste da retroflexão superficial (não mostrado), e a leste de um vórtice de subtermoclina ($\sim 52^\circ\text{W}$)(Figura 4.25a). A estrutura resultante da sobreposição parcial dos vórtices de termoclina e subtermoclina praticamente não possui assinatura em superfície (Figura 4.25b). Esta estrutura possui núcleos de máxima velocidade em profundidades distintas em suas partes norte e sul; o núcleo de máxima velocidade da porção norte, de 0,6 m/s, se situa aproximadamente a 150 metros de profundidade, enquanto a porção sul apresenta um núcleo de máxima velocidade de 0,5 m/s entre 200 e 300 metros de profundidade. Sua extensão vertical se estende de cerca de 20 metros a 400 metros de profundidade. Em superfície, velocidades chegam a 0,5 m/s para noroeste mais próximo à costa, e alternam entre baixas velocidades para sudeste e noroeste à medida em que se afasta da costa.

Posteriormente há alinhamento dos núcleos dos vórtices de termoclina e subtermoclina (Figura 4.25c), causando incremento na extensão da estrutura resultante em aproximadamente 400 metros (Figura 4.25d), assim o vórtice passa a se estender

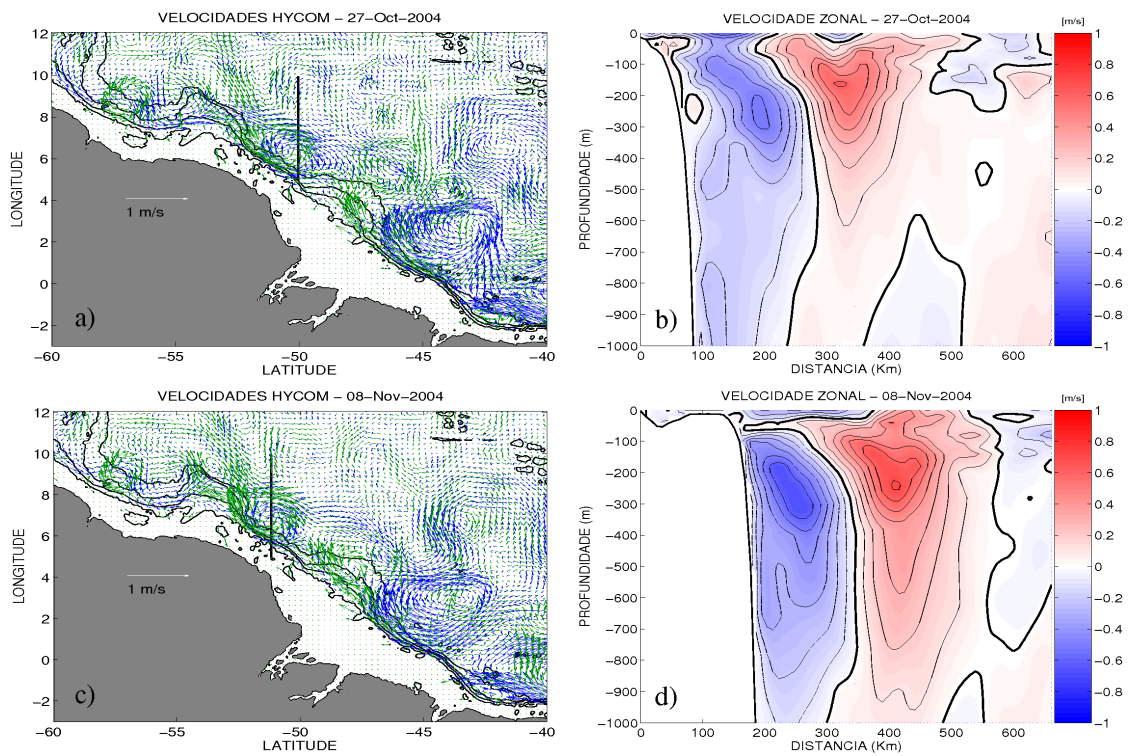


Figura 4.25: Evolução espaço-temporal de um processo do tipo B. Esquerda: Campos de velocidade para a termoclina (azul) e subtermoclina (verde). Direita: seções de velocidade zonal, cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade zonal nula.

até aproximadamente 800 metros de profundidade. Além disso, a velocidade dos núcleos de máxima velocidade dos lados norte e sul é incrementada em 0,1 m/s, além de ocorrer o aprofundamento do núcleo do lado norte, de cerca de 150 metros de profundidade para 230 metros.

Processo tipo C

Entre março e junho de 2004 pode ser identificada a formação de um vórtice intensificado em superfície sobre um vórtice de termoclina previamente desprendido da retroflexão CNB-SCE, ou seja, um processo do tipo C (Figura 4.26).

Inicialmente a retroflexão superficial está estabelecida, se estendendo a cerca de 52°W, prestes a desprender um vórtice (Figura 4.26a). A leste da retroflexão, podem ser observados dois vórtices intensificados em termoclina, provenientes de desprendimento da retroflexão CNB-SCE, em aproximadamente 49 °W e 44°W. Em seção (Figura 4.26b) pode ser identificado o fluxo superficial para noroeste da CNB e da CSEc, com maiores velocidades (0,7 m/s) mais próximo à costa, correspondente à CNB, em comparação com a porção mais afastada da costa, referente à CSEn (0,4 m/s) . Em termoclina é identificado um vórtice com núcleos de máxima velocidade em cerca de 150 metros de profundidade, com velocidades de 0,7 m/s no lado sul e 0,5 m/s no lado norte do vórtice. No restante da coluna d'água, há junto à costa fluxo para sudeste com núcleo a aproximadamente 600 metros de profundidade. No restante da coluna d'água os fluxos são pouco significativos em relação aos acima descritos.

Posteriormente é formado sobre o vórtice de termoclina um meandro da retroflexão CNB-CCNE (Figura 4.26c). Apesar de estarem sobrepostos, os núcleos de velocidade referentes ao meandro em superfície e ao vórtice subsuperficial, tanto no lado norte quanto no lado sul, podem ser discernidos (Figura 4.26d). Além disso, o meandro em superfície não é alinhado com o vórtice de termoclina; embora ambos estejam junto à costa, pelo fato de o vórtice de termoclina ter diâmetro reduzido em relação ao meandro superficial, seu núcleo fica mais próximo à costa. O meandro em superfície é mais intenso que o vórtice de termoclina, apresentando velocidades de até 0,7 m/s em seu lado sul e 0,5 m/s em seu lado norte, enquanto o vórtice de termoclina apresenta velocidade máxima de 0,5 m/s em seu lado sul e 0,4 m/s em seu lado norte. Os núcleos de velocidade do vórtice em termoclina ainda se apresentam aproximadamente à mesma profundidade que apresentavam logo após o desprendimento, de aproximadamente 150-200 metros.

Após o desprendimento do vórtice, a retroflexão superficial se retrai (Figura 4.26e) e a estrutura resultante da sobreposição do meandro recentemente destacado

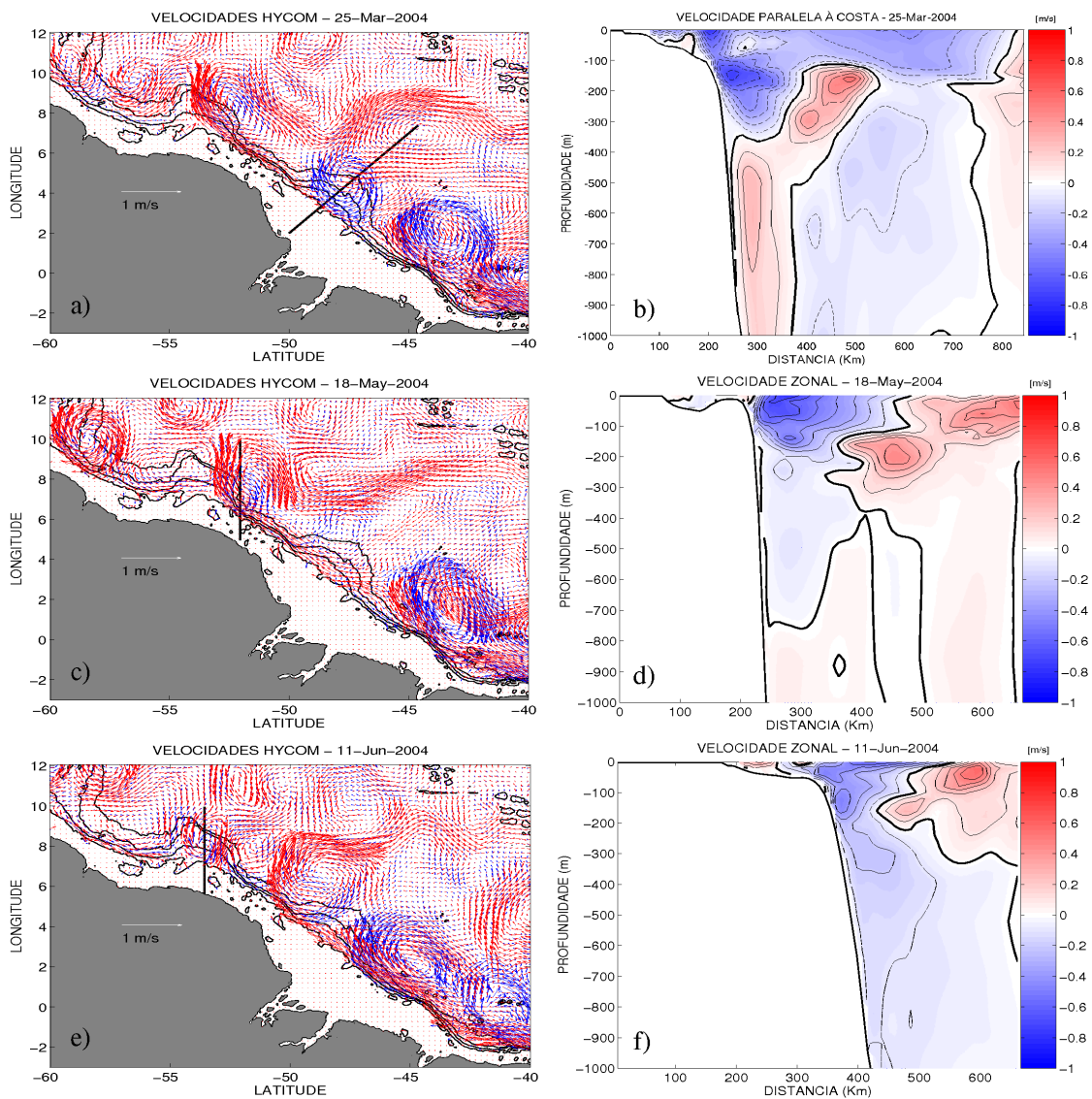


Figura 4.26: Evolução espaço-temporal de um processo do tipo C. Esquerda: Campos de velocidade para a superfície (vermelho) e termoclina (azul). Direita: seções de velocidade perpendicular à seção cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade nula.

ao vórtice em termoclina tem suas velocidades reduzidas tanto em superfície quanto em termoclina, uma vez que os núcleos ainda podem ser discernidos. Suas velocidades máximas decrescem para 0,5 m/s em ambos os lados em superfície, e em termoclina para 0,4 m/s em seu lado sul e 0,2 m/s em seu lado norte (Figura 4.26f), com a porção de termoclina apresentando diâmetro reduzido em relação à superficial. Conseqüentemente, o eixo da estrutura resultante, como uma feição composta pelos dois vórtices de diferentes níveis, é inclinado para norte.

Processo tipo D

Em maio de 2003 pode ser observado um processo do tipo D (Figura 4.27), isto é, um vórtice de grande extensão vertical formado por sobreposição de componentes nas três regiões da coluna d'água, formadas aproximadamente ao mesmo tempo e na mesma região.

Inicialmente, a retroflexão superficial se sobrepõe a um vórtice subsuperficial que possui componentes em termoclina e subtermoclina (Figura 4.27a). A sobreposição da retroflexão CNB-CCNE a estes vórtices dá origem a uma estrutura de velocidade verticalmente descontínua, na qual as máximas velocidades, de cerca de 0,7 m/s, ocorrem em termoclina (Figura 4.27b).

Posteriormente pode-se observar que não há formação da retroflexão, mas sim de um vórtice superficial sobre o vórtice subsuperficial (Figura 4.27c). O vórtice superficial formado possui maior diâmetro que o subsuperficial, com seu núcleo posicionado mais a leste. A partir da análise da estrutura vertical da estrutura resultante desta sobreposição a partir de uma seção atravessando o núcleo do vórtice superficial (não mostrado), as velocidades máximas são de 0,9 m/s no lado sul e 1 m/s no lado norte, e sua extensão vertical é de 220 metros no lado sul e 170 metros no lado norte. Considerando uma seção atravessando o núcleo do vórtice subsuperficial (Figuras 4.27d), verifica-se uma estrutura vertical distinta do caso anterior, com extensão vertical de mais de 1000 metros no lado sul e 300 metros no lado norte, com velocidade máxima para 0,9 m/s em ambos os lados. Há duas profundidades de intensificação discerníveis, uma em superfície e outra em aproximadamente 150 metros de profundidade. Esta diferença das estruturas verticais é originada pelo desalinhamento dos núcleos dos vórtices superficial e subsuperficial. Posteriormente ocorre o alinhamento dos núcleos das porções superficial e subsuperficial (Figura 4.27e), ocorrendo deslocamento para noroeste da estrutura resultante, com intensas velocidades (0,9 e 1,2 m/s nos lados sul e norte, respectivamente) e expressiva extensão vertical (400 a 600 metros de profundidade) (Figura 4.27f). A diferenciação entre os núcleos do vórtice superficial e do subsuperficial já não é tão clara.

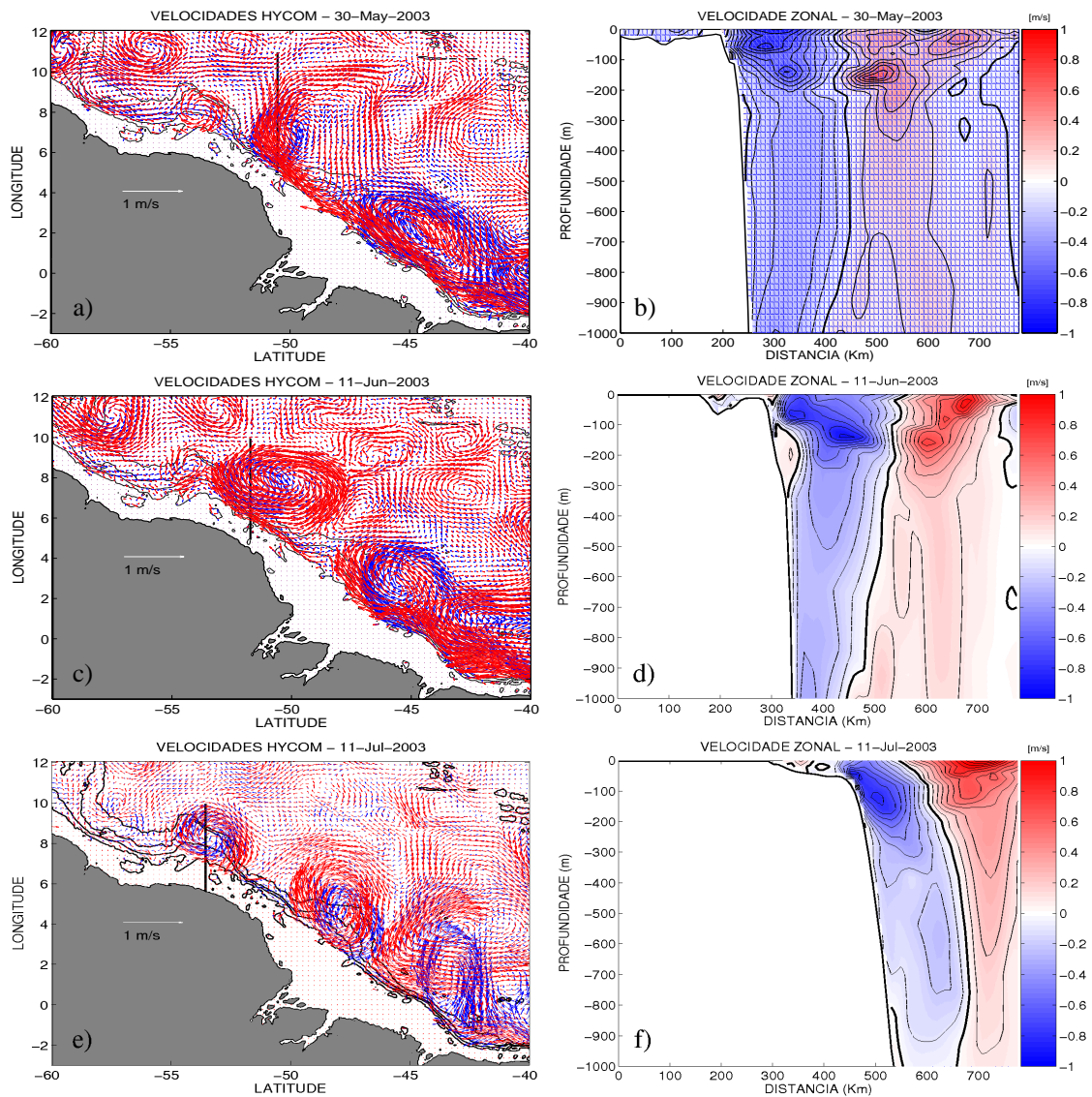


Figura 4.27: Evolução espaço-temporal de um processo do tipo D. Esquerda: Campos de velocidade para a superfície (vermelho) e termoclina (azul). Direita: seções de velocidade zonal, cuja localização é indicada pela figura à esquerda. Em preto, as isolinhas de velocidade com intervalo de 0,1 m/s. A linha espessa corresponde à isolinha de velocidade zonal nula.

Capítulo 5

Sumário e Conclusões

Neste estudo, a fim de investigar as causas da variação da estrutura vertical dos vórtices da Corrente Norte do Brasil e os processos que determinam esta variação, foi realizada a análise de três anos de resultados de uma simulação global em alta resolução do modelo numérico HYCOM na região da retroflexão da Corrente Norte do Brasil.

Foi verificado que a estrutura vertical dos vórtices da CNB é resultado de interações entre vórtices formados em diferentes porções da coluna d'água. De acordo com a posição relativa destes vórtices, a assinatura da estrutura resultante pode se estender a diferentes regiões da coluna d'água, podendo apresentar intensificação em diferentes profundidades. Vórtices rasos consistem em vórtices formados somente na porção superficial da coluna d'água, sem assinatura em termoclina ou subtermoclina. Vórtices intensificados em superfície com grande extensão vertical são resultantes da sobreposição de vórtices formados nas três regiões da coluna d'água.

Os vórtices identificados nas diferentes porções da coluna d'água são diferentes entre si. Vórtices identificados em maiores profundidades possuem em geral diâmetro reduzido em relação aos identificados mais próximo à superfície. Vórtices de subtermoclina apresentaram raio de máxima velocidade de 90km, enquanto os de termoclina apresentam raio de máxima velocidade de 125 km e os de superfície de 151 km, valores condizentes com os estudos observacionais realizados na região. O fato de em geral um vórtice de grande extensão vertical ter maior diâmetro em superfície e este se reduzir à medida em que se aprofunda na coluna d'água, verificado em estudos anteriores, também pode ser identificado nos resultados. A região de formação dos vórtices também se modifica nas diferentes porções da coluna d'água. Os vórtices de superfície são formados, em sua maioria, a partir da retroflexão CNB-CCNE, embora tenham sido formados vórtices em períodos nos quais esta não se encontrava bem definida. Em termoclina, os vórtices são formados principalmente por desprendimento da retroflexão CNB-SCE, em aproximadamente 44°W. Os vórtices de termoclina que não foram originados nesta região não possuem

região preferencial de formação. Em subtermoclina a formação de vórtices não é relacionada a uma retroflexão da corrente, no entanto vórtices são formados em geral entre as longitudes 45 e 51 °W.

Foram identificados diferentes mecanismos de geração de vórtices nas diferentes porções da coluna d'água. Em superfície, 14 vórtices têm sua formação associada à chegada à fronteira oeste de sinais que se propagam na CCNE. Estes sinais possuem comprimento de 660 a 990 Km, e velocidade de propagação de -0,1 m/s, condizente com ondas de Rossby nesta latitude. Em termoclina, 25 dos 37 vórtices formados são desprendidos da retroflexão CNB-SCE, que ocorre em aproximadamente 44°W. Semelhantemente aos vórtices superficiais, o desprendimento de vórtices da retroflexão CNB-SCE é associado à chegada de sinais que se propagam na SCE. Estes sinais possuem comprimento de onda e velocidade de propagação de 1110-1770 Km e -0,5 m/s, respectivamente, portanto maiores que os sinais identificados na CCNE, com características próximas ao limite superior para ondas de instabilidade tropical indicados por JOCHUM *et al.* (2004). Em subtermoclina foi identificada a formação de 23 vórtices, cujo processo de formação não é relacionado com uma retroflexão, dos quais sete vórtices não tiveram sua origem determinada.

Além da formação independente de vórtices em cada porção da coluna d'água, foram identificados vórtices formados por propagação vertical do sinal de um vórtice na porção sobrejacente ou subjacente da coluna d'água; doze vórtices de termoclina foram formados fora da região da retroflexão CNB-SCE, sendo 6 por propagação vertical do sinal de vórtices de subtermoclina e 6 de vórtices superficiais. Mecanismo semelhante foi observado em subtermoclina, onde 12 vórtices foram formados por propagação vertical do sinal de vórtices de termoclina, e 3 são formados na região da retroflexão CNB-SCE.

Além da implicação da propagação vertical do sinal na formação de vórtices em outras regiões da coluna d'água, foi identificado que vórtices de termoclina e subtermoclina podem atuar como catalisadores para o desprendimento de vórtices da retroflexão superficial e de termoclina, respectivamente. Dos vórtices superficiais, 7 foram formados em ocasiões em que a retroflexão superficial se estabeleceu sobre um vórtice de termoclina, desprendendo um vórtice superficial sobre o de termoclina previamente desprendido. No caso dos vórtices de subtermoclina, 2 atuam como catalisadores para o desprendimento de vórtices da retroflexão CNB-SCE.

Quanto à atuação de vórtices de termoclina como catalisadores para o desprendimento de vórtices em superfície, poucas comparações podem ser realizadas com estudos observacionais, uma vez que para estudo desse processo as medições teriam que ser realizadas entre a retroflexão CNB-SCE e a retroflexão CNB-CCNE (~ 44°W-50°W), e estudos com observações nessa região são escassos. JOHNS *et al.* (1998), a partir de um mooring em 47°W, identificam oscilações com períodos de 60-

90 dias com máxima energia em aproximadamente 300 metros de profundidade, que os autores especulam estar associadas a feições que podem atuar como catalisadores para o desprendimento de vórtices da CNB. De fato, apesar de ocorrer em menor profundidade, no presente estudo foram identificadas oscilações com esta faixa de períodos na região de propagação de vórtices de termoclina, em aproximadamente 47°W. Considerando que 50% dos vórtices superficiais simulados têm seu desprendimento promovido por vórtices de termoclina, os resultados sugerem que este é um processo relevante porém ainda pouco explorado na região.

Podendo ser formados a partir de mecanismos distintos em diferentes regiões, os vórtices de diferentes porções da coluna d'água interagem entre si. Foi identificada a sobreposição de vórtices de diferentes porções da coluna d'água ao longo de sua trajetória. Desta sobreposição pode resultar uma estrutura coesa, que se comporta uniformemente na coluna d'água ao longo da trajetória (ou de parte dela), ou pode ocorrer a translação independente das componentes de diferentes regiões da coluna d'água, embora sempre em sentido noroeste. Desta forma, os resultados sugerem uma dependência temporal e espacial da estrutura vertical dos vórtices da CNB, resultante da posição relativa das componentes das diferentes porções da coluna d'água.

A atividade de mesoescala presente em termoclina e subtermoclina nos resultados é superestimada em relação ao descrito em estudos anteriores. Foram formados 10 vórtices em subtermoclina e 25 vórtices de termoclina, isto é, 43% dos vórtices de subtermoclina e 67% dos de termoclina, independentes das regiões adjacentes, isto é, não causados por propagação vertical de sinal. O número de vórtices subsuperficiais identificados leva a uma estimativa de formação de 3,3 vórtices de subtermoclina e 8,3 vórtices de termoclina ao ano. Esta estimativa é superior à de 2 vórtices subsuperficiais a cada ano, realizada tanto a partir de um estudo observacional com dados de um mooring (JOHNS *et al.*, 2003) quanto a partir de modelagem numérica (GARRAFFO *et al.*, 2003). No entanto, deve ser considerado que em seu estudo observacional, JOHNS *et al.* (2003) realizaram sua estimativa a partir de medições em 9°N, 53°W, longitude a partir da qual a maioria dos vórtices subsuperficiais identificados no presente estudo se encontra sob um vórtice superficial ou já se desintegrou em meio às correntes. Em 53°W, somente podem ser identificados no presente estudo 3 vórtices subsuperficiais sem sinal em superfície, o que resultaria em uma taxa de formação de apenas um vórtice subsuperficial ao ano caso fossem realizadas análises em somente um ponto, como a metodologia utilizada por JOHNS *et al.* (2003). GARRAFFO *et al.* (2003), por sua vez, realizaram sua análise a partir de campos instantâneos de velocidade em diferentes níveis, ou seja, a mesma metodologia empregada no presente estudo, indicando que a sua simulação, realizada com o modelo MICOM, precursor do modelo HYCOM, de fato produz menor número de vórtices

subsuperficiais que no presente estudo. No entanto, não pode ser confirmada a representatividade da taxa de formação de vórtices subsuperficiais estimada, devido à escassez de dados medidos na região com este fim. Vale ressaltar que nos resultados do presente estudo, 6 vórtices de subtermoclina promovem a formação de vórtices em termoclina, e dos vórtices de termoclina, 7 atuam como catalisadores para o processo de desprendimento de vórtices superficiais. Portanto, os vórtices subsuperficiais não só são estruturas presentes como também implicam na formação de vórtices nas camadas adjacentes, interferindo na formação e estrutura vertical dos vórtices da CNB simulados, o que sugere que este é um processo relevante na região, passível de ser considerado escopo para futuros estudos numéricos e observacionais.

A formação e interação entre vórtices de diferentes porções da coluna d'água não parece ser uma característica particular da simulação analisada. Além da vasta validação dos resultados desta simulação em diferentes regiões do planeta e corroboração com dados observacionais na região de estudo, há representação de processos semelhantes pelo modelo MOM e por outra simulação do modelo HYCOM desenvolvida pelo GRUPO da COPPE/UFRJ. Estas comparações atestam a robustez do modelo, indicando que a estrutura vertical dos vórtices da CNB de fato é resultante da interação entre vórtices em diferentes níveis.

Os resultados aqui analisados, com discretização vertical em 32 camadas isopícnais, mostram que nas retroflexões e nos vórtices da CNB é presente uma dinâmica em três camadas, na qual a superfície, termoclina e subtermoclina atuam como regiões distintas. A separação entre superfície e termoclina se mostrou fundamental, uma vez que os mecanismos de formação de vórtices em termoclina são distintos das outras regiões da coluna d'água, e a avaliação de sua interação com as demais só é possível considerando-a como uma porção individual. Este fato torna a discretização vertical do presente estudo mais adequada em relação a estudos anteriores, nos quais superfície e termoclina foram agrupadas em uma só camada. Desta forma estende-se as proposições de JOCHUM e MALANOTTE-RIZZOLI (2003) e DA SILVEIRA *et al.* (2000) de que o processo de formação de vórtices da CNB até 1000 metros poderia ser representado satisfatoriamente a partir de um modelo de duas camadas, para a proposição de que um modelo de três camadas é mais adequado.

Referências Bibliográficas

- ARHAN, M., TREGUIER, A. M., BOURLÈS, B., et al., 2006, “Diagnosing the annual cycle of the Equatorial Undercurrent in the Atlantic Ocean from a general circulation model”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 36, pp. 1502–1522.
- BARNIER, B., REYNAUD, T., BECKMANN, A., et al., 2001, “On the seasonal variability and eddies in the North Brazil Current: insights from model intercomparison experiments”, *Progress in Oceanography*, v. 48, pp. 195–230.
- BLECK, R., 2002, “An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates”, *Ocean Modelling*, v. 37, pp. 55–88.
- BLECK, R., ROOTH, C., HU, D., 1992, “Salinity-driven thermocline transients in a wind- and thermohaline-driven Isopycnic Coordinate Model of the North Atlantic”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 22, pp. 1486–1505.
- BOURLÈS, B., MOLINARI, R., JOHNS, E., et al., 1999, “Upper layer currents in the western tropical North Atlantic (1989-1991)”, *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C1, pp. 1361–1375.
- CARNES, M. R., 2009, *Description and Evaluation of GDEM - V 3.0*. Relatório técnico, Naval Research Laboratory, Oceanography Division, Stennis Space Center.
- CHASSIGNET, E. P., 2007, “The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system”, *Journal of Marine Systems*, v. 65, pp. 60–83.
- CHERUBIN, L., 2000, *Descriptive analysis of the hydrology and mixing of the Mediterranean outflow and effects of topography on the stability of the Mediterranean undercurrents*. Tese de Doutorado, Université de la Méditerranée, Centre d’Océanologie de Marseille.

- DA SILVEIRA, I. C. A., MIRANDA, L. B., BROWN, W. S., 1994, “On the origins of the North Brazil Current”, *Journal of Geophysical Research*, v. 99, pp. 22501–22512.
- DA SILVEIRA, I. C. A., BROWN, W. S., FLIERL, G. R., 2000, “Dynamics of the North Brazil Current retroflection region from the Western Tropical Atlantic Experiment observations”, *Journal of Geophysical Research*, v. 105, pp. 28559–28583.
- DIDDEN, N., SCHOTT, F., 1993, “Eddies in the North Brazil Current retroflection region observed by Geosat altimetry”, *Journal of Geophysical Research*, v. 98, pp. 20,121–20, 131.
- FLAGG, C. N., GORDON, R. L., MCDOWELL, S., 1986, “Hydrographic and Current Observations on the Continental Slope and Shelf of the Western Equatorial Atlantic”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 16, pp. 1412–1429.
- FONSECA, C. A., GONI, G. J., JOHNS, W. E., et al., 2004, “Investigation of the North Brazil Current retroflection and North Equatorial Countercurrent variability”, *Geophysical Research Letters*, v. 31, pp. L21304.
- FRATANTONI, D. M., GLICKSON, D. A., 2002, “North Brazil Current ring generation and evolution observed with seaWiFS”, *Journal of physical oceanography*, v. 32, pp. 1058–1074.
- FRATANTONI, D. M., RICHARDSON, P. L., 2006, “The evolution and demise of North Brazil Current rings”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 36, pp. 1241–1264.
- FRATANTONI, D. M., JOHNS, W. E., TOWNSEND, T. L., 1995, “Rings of the North Brazil Current: their structure and behavior inferred from observations and a numerical simulation”, *Journal of Geophysical Research*, v. 100, pp. 10633–10654.
- GARRAFFO, Z. D., JOHNS, W. E., CHASSIGNET, E. P., et al., 2003, “North Brazil Current rings and transport of southern waters in a high resolution numerical simulation of the North Atlantic”. In: Jochum, M., Malanotte-Rizzoli, P. (Eds.), *Interhemispheric Water Exchange*, v. 68, Elsevier Oceanographic Series.
- GARZOLI, S. L., FFIELD, A., JOHNS, W. E., et al., 2004, “North Brazil Current retroflection and transports”, *Journal of Geophysical Research*, v. 109, pp. C01013.

- GOES, M., MOLINARI, R., DA SILVEIRA, I., et al., 2005, “Retroreflections of the North Brazil Current during February 2002”, *Deep-sea Research I*, v. 52, pp. 647–667.
- GONI, G. J., JOHNS, W. E., 2001, “A census of North Brazil Current rings observed from TOPEX/POSEIDON altimetry: 1992-1998”, *Geophysical Research Letters*, v. 28, pp. 1–4.
- GONI, G. J., JOHNS, W. E., 2003, “Synoptic study of warm rings in the North Brazil Current retroreflection region using satellite altimetry”. In: Jochum, M., Malanotte-Rizzoli, P. (Eds.), *Interhemispheric Water Exchange*, v. 68, Elsevier Oceanographic Series.
- HYCOM, 2009, “HYCOM Global 1/12 Simulation”, Disponível em: < <http://www.hycom.org/dataserver/glb-simulation/expt-05pt8> >. Acesso em: Outubro de 2009.
- JOCHUM, M., MALANOTTE-RIZZOLI, P., 2003, “On the generation of North Brazil Current rings”, *Journal of Marine Research*, v. 61, pp. 147–173.
- JOCHUM, M., MALANOTTE-RIZZOLI, P., BUSALACCHI, 2004, “Tropical Instability Waves in the Atlantic Ocean”, *Ocean Modelling*, v. 7, pp. 145–163.
- JOHNS, W. E., LEE, T. N., SCHOTT, F. A. AND ZANTOPP, R. J., et al., 1990, “The North Brazil Current retroreflection: seasonal structure and eddy variability”, *Journal of Geophysical Research*, v. 95, pp. 22103–22120.
- JOHNS, W. E., LEE, T. N., BEARDSLEY, R. C., et al., 1998, “Annual cycle and variability of the North Brazil Current”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 28, pp. 103–128.
- JOHNS, W. E., ZANTOPP, R. J., GONI, G. J., 2003, “Cross-gyre transport by North Brazil Current rings.” In: Jochum, M., Malanotte-Rizzoli, P. (Eds.), *Interhemispheric Water Exchange*, v. 68, Elsevier Oceanographic Series.
- KILLWORTH, P., 1991, “Cross-equatorial geostrophic adjustment”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 21, pp. 1581–1601.
- MCCLEAN, J. L., KLINCK, J. M., 1995, “Description and vorticity analysis of 50-day oscillations in the western tropical region of the CME Model”, *Journal of physical oceanography*, v. 25, pp. 2498–2517.
- MOLINARI, R. L., 1982, “Observations of eastward currents in the tropical South Atlantic Ocean: 1978-1980”, *Journal of Geophysical Research*, v. 87, pp. 9707–9714.

- NOF, D., PICHEVIN, T., 1996, “The retroflection paradox”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 26, pp. 2344–2358.
- SCHMITZ, W. J., 1996, *On the world ocean circulation: volume 1. Some global features of the North Atlantic Circulation*. Relatório Técnico WHOI-96-03, Woods Hole Oceanographic Institution technical report., june.
- SCHOTT, F. A., FISCHER, J., STRAMMA, L., 1998, “Transports and pathways of the upper-layer circulation in the western tropical Atlantic”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 28, pp. 1904–1928.
- SCHOTT, F. A., DENGLER, M., BRANDT, P., et al., 2003, “The zonal currents and transports at 35°W in the tropical Atlantic”, *Geophysical Research Letters*, v. 30, pp. 1–4.
- STRAMMA, L., SCHOTT, F. A., 1999, “The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean”, *Deep-sea Research II*, v. 46, pp. 279–303.
- STRAMMA, L., RHEIN, M., BRANDT, P., et al., 2005, “Upper ocean circulation in the western tropical Atlantic in Boreal fall 2000”, *Deep-sea Research I*, v. 52, pp. 221–240.
- URBANO, D. F., JOCHUM, M., DA SILVEIRA, I. C. A., 2006, “Rediscovering the second core of the Atlantic NECC”, *Ocean Modelling*, v. 12, pp. 1–15.
- URBANO, D. F., DE ALMEIDA, R. A. F., NOBRE, P., 2008, “Equatorial Undercurrent and North Equatorial Countercurrent at 38°W: A new perspective from direct velocity data”, *Journal of Geophysical Research*, v. 113, pp. C04041.
- WILSON, W. D., JOHNS, W. E., GARZOLI, S. L., 2002, “Velocity structure of North Brazil Current rings”, *Geophysical Research Letters*, v. 29, pp. 1273, doi:10.1029/2001GL013869.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)