



A ESTRUTURA VERTICAL DO SISTEMA CORRENTE DO
BRASIL-CORRENTE DE CONTORNO INTERMEDIÁRIA AO LARGO DO
CABO DE SÃO TOMÉ.

Natalia D'Ávila Lima

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
Fevereiro de 2011

A ESTRUTURA VERTICAL DO SISTEMA CORRENTE DO
BRASIL-CORRENTE DE CONTORNO INTERMEDIÁRIA AO LARGO DO
CABO DE SÃO TOMÉ.

Natalia D'Ávila Lima

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. Leandro Calado, D.Sc

Prof. Carlos Eduardo Parente, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2011

Lima, Natalia D'Ávila

A Estrutura Vertical do sistema Corrente do Brasil-
Corrente de Contorno Intermediária ao largo do Cabo
de São Tomé./Natalia D'Ávila Lima. – Rio de Janeiro:
UFRJ/COPPE, 2011.

XV, 74 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de
Engenharia Oceânica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 71 – 74.

1. Corrente Brasil. 2. Corrente de Contorno
Intermediária. 3. Vórtices. I. Paiva, Afonso de
MoraesII. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*"Seja a mudança que você quer
ver no mundo." (Gandhi).*

Agradecimentos

Agradeço a todos que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho. A meu orientador, Afonso de Moraes Paiva, pelo seu apoio, dedicação e incentivo durante a realização desta dissertação.

Ao Luiz Alexandre de Araújo Guerra pelos conhecimentos e conselhos dados, assim como participação fundamental no desenvolvimento desta pesquisa.

À PETROBRAS, pela oportunidade e autorização do uso dos dados presentes neste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo suporte financeiro que possibilitou esta pesquisa.

Aos colegas do Grupo de Processos Oceânicos (GruPO) do programa de Engenharia Oceânica (PEnO) pela atenção, apoio, ajuda e esclarecimento de dúvidas, em especial a Mariela Gabioux, pela colaboração na finalização deste trabalho.

Aos meus amigos pelo apoio e incentivo dado e que tornaram mais agradável o período de realização desta pesquisa.

Por último, agradeço e dedico este trabalho a meus pais Carlos Quirino Lima e Elisabete Cristina D. Lima e meu irmão Helder Q. L. Lima, que sem dúvidas foram os meus maiores incentivadores e colaboradores.

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 DO SISTEMA CORRENTE DO
BRASIL-CORRENTE DE CONTORNO INTERMEDIÁRIA AO LARGO DO
CABO DE SÃO TOMÉ.

Natalia D'Ávila Lima

Fevereiro/2011

Orientador: Afonso de Moraes Paiva

Programa: Engenharia Oceânica

A estrutura vertical do sistema CB-CCI ao largo do Cabo de São Tomé foi investigada a partir da análise conjunta de séries temporais de velocidade da corrente medidas in situ na Bacia de Campos e imagens de TSM obtidas pelo satélite GOES 12 durante o período de 2006 a 2007. Também foram utilizados 5 anos de resultados de uma simulação numérica regional de alta resolução usando modelo HYCOM. Analisando os dados de velocidade durante períodos de estabilidade da corrente foi possível observar que CB e CCI estiveram presentes acima de 600 m da coluna d'água e a profundidade de separação entre elas variou de 255 a 385 m. Foi possível identificar também ao largo do Cabo de São Tomé a existência de nove vórtices ciclônicos, que geraram uma variabilidade significativa na velocidade da corrente, mudando a profundidade e a intensidade da CB e também da porção superior da CCI. O sistema CB-CCI apresentou uma forte estrutura baroclínica, entretanto a variabilidade do sistema, associada ao meandramento da corrente e a formação de vórtices, teve uma componente barotrópica significativa, entre 78,57% e 86,43%. Os resultados do HYCOM mostraram que os vórtices, identificados no modelo, foram gerados inicialmente na CB e ao longo de seu desenvolvimento interagiram com a CCI, e se estenderam ao longo de todo o sistema CB-CCI de forma assimétrica. CB e CCI mostraram-se fora de fase durante a formação dos vórtices simulados.

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 BRAZIL CURRENT-INTERMEDIATE
COUNTER CURRENT SYSTEM NEAR CAPE SÃO TOMÉ

Natalia D'Ávila Lima

February/2011

Advisor: Afonso de Moraes Paiva

Department: Ocean Engineering

The vertical structure of the BC-IWBC system near Cape São Tomé was investigated by analysis of the two years long current velocity time series measured in the Campos Basin and by SST images obtained by the GOES 12 satellite, both during the period from 2006 to 2007. The data from 5 years of a numerical simulation using high-resolution regional model Hycom were also used. Analyzing the velocity data during periods of stability was observed that both the BC and the IWBC were present above 600 meter water column depth and the separation were between them ranged from 255 to 385 m. It was identified that nine cyclonic eddies were formed near Cape São Tomé and they generated significant variability in the current speed. The eddies development changed the depth and intensity of the BC and also the upper portion of the IWBC. However, the BC-IWBC system presented a strong baroclinic structure and the variability of system associated to current meandering and formation eddy, had a significant barotropic component, between 78,57% and 86,43%. The HYCOM results showed that the eddies identified in the model were first generated on the BC and only after theirs development they interact with the IWBC. The eddies spread throughout the system BC-IWBC asymmetrically. BC and IWBC showed out of phase during the formation of the simulated eddies.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Sistema CB-CCI	4
2.2 Estruturas de mesoescala da CB vórtices e meandros	10
3 Metodologia	15
3.1 Dados de ADCP	15
3.2 Funções Ortogonais Empíricas convencional e complexa	18
3.3 Temperatura da Superfície do Mar	21
3.4 Modelagem Numérica	22
4 Resultados e Discussões	24
4.1 Comportamento da corrente em superfície	24
4.2 Estrutura Vertical da Corrente	36
4.2.1 Sistema CB-CCI	37
4.2.2 A estrutura vertical da corrente durante a formação de vórtices	43
4.2.3 Modelagem Numérica	55
5 Síntese e Conclusões	68
Referências Bibliográficas	71

Lista de Figuras

- 2.1 Esquema das correntes de contorno oeste e massas d'água ao largo da costa sudeste brasileira, extraído de SOUTELINO (2008), segundo os resultados de STRAMMA e ENGLAND (1999). Em vermelho e azul claro a CB transportando AT e ACAS. Em azul a CCI transportando AIA e em cinza a CCP (Corrente de Contorno Profunda) transportando a APAN. 8
- 2.2 Seção zonal de velocidade meridional em 21°S de latitude representando o sistema CB-CCI ao largo do sudeste brasileiro. Observa-se a CB na porção superior e a CCI na porção inferior do sistema. Com base em resultados de uma simulação numérica da circulação oceânica da costa sudeste brasileira feita com o modelo Princeton Ocean Model (POM) (resolução de 10km) por um grupo de pesquisas da COPPE. 9
- 2.3 Interpretação da hipótese de CAMPOS (1995) adaptada a região ao largo do Cabo de São Tomé. A figura mostra o comportamento da corrente ante a mudança de orientação da linha de costa ao sul do Cabo de São Tomé. 12
- 3.1 Imagem de TSM do dia 8 de fevereiro de 2008 - GOES 12. A figura mostra a formação do vórtice do Cabo de São Tomé e a localização de cada fundeio (G, F, B, A, C, D e E), em ordem de localização mais ao N. 16
- 3.2 Período de amostragem em cada fundeio. Note que os dados não são contínuos ao longo do tempo. G, F, B, A, C, D e E representam cada um dos fundeios e estão ordenados de acordo com sua localização de norte para sul. 17

4.1	Gráfico de barras verticais apresentando o intervalo de ocorrência de 8 vórtices identificados. Cada barra vertical rachurada representa um vórtice. Não foi possível determinar o intervalo de ocorrência de um dos vórtices (vórtice 5).	25
4.2	Imagens de TSM GOES 12 ilustrando um vórtice emitido para o giro Subtropical do Atlântico sul (em cima) e um vórtice reabsorvido pela corrente (em baixo).	26
4.3	Gráfico de vetores de velocidade registrados em superfície pelo fundeio F durante a formação e desenvolvimento do vórtice 6. Dados filtrados com filtro do tipo passa-baixa e frequência de corte de 0.2 ciclos por dia.	28
4.4	Gráfico de vetores de velocidade registrados em superfície pelo fundeio C durante a formação e desenvolvimento do vórtice 1. Dados filtrados com filtro do tipo passa-baixa e frequência de corte de 0.2 ciclos por dia.	30
4.5	Sequência de imagens de TSM obtidas pelo satélite GOES 12 de 06/06/07 a 06/07/07 mostrando a evolução espacial do vórtice 7. O triângulo representa a localização do fundeio B e o quadrado o fundeio C.	32
4.6	Gráfico de vetores de velocidade registrados em superfície pelo fundeio B (painel superior) e fundeio C (painel inferior) durante a formação e desenvolvimento do vórtice 7. Dados filtrados com filtro do tipo passa-baixa e frequência de corte de 0.2 ciclos por dia.	33
4.7	Modelo Conceitual de desenvolvimento dos vórtices do Cabo de São Tomé identificados nos dados de ADCP e imagens de TSM. Inicialmente a CB é estável (a). Ela se instabiliza (b) e desenvolve o meandro (c) que ao se fechar migra para sul e forma um vórtice ciclônico. O vórtice pode se separar da corrente (d1) ou ser reabsorvido (d2). Os vetores representam como os fundeios hipotéticos registrariam o evento.	35
4.8	Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundeio F. A linha em vermelho destaca a variação de velocidade de -0.4 m/s (negativo, para sul) a 0.3 m/s (positivo, para norte) da superfície ao fundo. A linha preta destaca a profundidade média de separação do sistema CB-CCI entre 260 m.	37

4.9	Média e desvio médio quadrático das componentes paralela (4.9a) e transversal (4.9b) da velocidade no fundeio F. Note a separação entre a CB e a CCI em 260m.	39
4.10	Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundeio D. A linha vermelha destaca a variação de velocidade de -0.7 m/s a 0.3 m/s da superfície ao fundo. A linha preta destaca a profundidade média de separação do sistema CB-CCI de 255 m.	40
4.11	Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundeio E. A linha vermelha destaca a variação de velocidade de -0.6 m/s a 0.2 m/s da superfície ao fundo. A linha preta destaca a profundidade média de separação do sistema CB-CCI de 385 m.	41
4.12	Média e desvio médio quadrático das componentes paralela (4.12a , 4.12c) e transversal (4.12a , 4.12c) da velocidade nos fundeios D e E. Note a separação entre a CB e a CCI em 255 m no fundeio D e 385 m no fundeio E.	42
4.13	Evolução temporal do perfil de velocidade transversal à linha de costa no fundeio E. Vermelho: formação do meandro; verde: vórtice 7 e amarelo: vórtice 8.	45
4.14	Evolução temporal do perfil de velocidade paralela à linha de costa no fundeio E. Vermelho: formação do meandro; verde: vórtice 7 e amarelo: vórtice 8.	45
4.15	Evolução temporal do perfil de velocidade transversal a linha de costa no fundeio F durante período de formação do vórtice 6.	46
4.16	Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundeio F durante período de formação do vórtice 6.	46
4.17	Estrutura dos dois primeiros modos estatísticos (M1 e M2) da EOF convencional da velocidade transversal a linha de costa nos fundeios F (figura 4.17a), E (figura 4.17b) e D (figura 4.17c).	50
4.18	Série temporal de amplitude dos dois primeiros modos estatísticos (M1 e M2) da EOF convencional da velocidade transversal a linha de costa nos fundeio E (figura 4.18b) e F (figura 4.18c) normalizada pela amplitude máxima dos modos.	51

4.19	Estrutura dos dois primeiros modos estatísticos (M1 e M2) da EOF complexa da velocidade no fundeio F.	53
4.20	Série temporal de amplitude dos dois primeiros modos estatísticos da EOF complexa da velocidade no fundeio F normalizada pela amplitude máxima dos modos. A figura 4.20a mostra as componentes meridional (azul escuro) e zonal (azul claro) de M1. A figura 4.20b mostra as componentes meridional (verde escuro) e zonal (verde claro) de M2. o retângulo representa o período de ocorrência do vórtice 6.	54
4.21	Batimetria e localização da seção inclinada extraída do modelo HYCOM. O círculo mangenta (40°15'W de longitude e 22°45' de latitude) e a triângulo verde (40°33'W de longitude e 22°40' de latitude) representam os pontos de onde foram extraídas as séries temporais. A figura também mostrou a proximidade dos fundeios de ADCP D e E em relação aos pontos escolhidos no modelo.	56
4.22	Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa extraídos nos pontos 4.22a e 4.22b durante dois períodos de estabilidade do sistema.	57
4.23	Evolução temporal do perfil de velocidade transversal (4.23a) e paralela (4.23b) a linha de costa extraídos no ponto de 40°15'W de longitude e 22°45' de latitude (figura 4.21) do domínio do modelo durante dois períodos de formação de vórtice.	58
4.24	Seção inclinada de velocidade paralela a linha de costa média calculada para 5 anos de simulação (2004 a 2005) gerados a partir do modelo HYCOM.	59
4.25	Comparação entre resultados de TSM do modelo e dados de TSM do GOES 12. Em cima: TSM simulada no dia 5 de agosto de 2004 mostrando o vórtice I. Em baixo: TSM GOES 12 no dia 29 de julho de 2006 mostrando o vórtice 4.	62
4.26	Comparação entre resultados de TSM do modelo e dados de TSM do GOES 12. Em cima: TSM simulada no dia 23 de setembro de 2007 mostrando o vórtice I. Em baixo: TSM GOES 12 no dia 3 de setembro de 2007 mostrando o vórtice 8.	63

4.27	Evolução temporal e espacial do vórtice formado no sistema CB-CCI em agosto de 2004. À esquerda: campos de velocidade da corrente - CB (azul) e CCI (vermelho). À direita: seção inclinada de velocidade zonal da corrente.	64
4.28	Evolução temporal e espacial do vórtice formado no sistema CB-CCI em outubro de 2007. À esquerda: campos de velocidade da corrente - CB (azul) e CCI (vermelho). À direita: seção inclinada de velocidade zonal da corrente.	65
4.29	Visão esquemática da interpretação dos resultados da simulação analisada nas figuras 4.27 e 4.28 . A linha azul representa a CB fluindo em superfície e a linha vermelha rachurada representa a CCI fluindo em profundidades intermediárias. a) Sistema CB-CCI estável. b) O sistema se instabiliza e forma o meandro na CB. CB e CCI não estão em fase. c) Forma-se o vórtice na CB. d) O vórtice formado na CB interage com a CCI. e1) O vórtice se desenvolve no sistema e f) é emitido	67

Lista de Tabelas

4.1	Período de desenvolvimento dos vórtices.	27
4.2	Velocidade média em superfície da corrente para períodos de fraco meandramento nos fundeios A, B, C, D, E, F e G.	29
4.3	Períodos de estabilidade e instabilidade selecionados para análise da estrutura vertical da corrente em cada fundeio.	36
4.4	Porcentagem dos dois primeiros modos estatísticos da EOF nos fundeios D, E e F.	47

Lista de Abreviações

ACAS Água Central do Atlântico Sul

ADCP Acoustic Doppler Current Profiler

AIA Água Intermediária Antártica

APAN Água Profunda do Atlântico Norte

AT Água Tropical

CB Corrente do Brasil

CCI Corrente de Contorno Intermediária

CG Corrente do Golfo

CSE Corrente Sul Equatorial

EOF Funções Ortogonais Empíricas

HYCOM HYbrid Coordinate Ocean Model

TSM Temperatura da Superfície do Mar

Capítulo 1

Introdução

A Corrente do Brasil (CB) é a corrente de contorno oeste associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul. Ela flui sobre o talude continental, bordejando sobre a quebra da plataforma continental, com direção predominante para SW, mas devido a presença recorrente de acentuados meandros que eventualmente se fecham em vórtices é comum que, ao largo da costa SE Brasileira, a CB sofra variação significativa na sua direção e intensidade. O comportamento da CB quando se desenvolve um meandro ou se forma um vórtice, é complexo, pois estas estruturas são altamente variáveis temporalmente e espacialmente.

A existência de vórtices na costa SE Brasileira, gerados pelo meandramento da CB foi citada primeiramente na literatura por MASCARENHAS *et al.* (1971). Os autores descreveram a presença de vórtices ciclônicos e anti-ciclônicos ao largo de Cabo Frio e associaram a formação dessas estruturas às feições topográficas da região. CAMPOS (1995) discutiram sobre aspectos dinâmicos da CB e atribuíram às causas do meandramento à abrupta mudança da orientação da linha de costa e do gradiente de topografia de fundo que, devido a conservação de vorticidade potencial

ao longo do talude gerariam uma onda de Rossby topográfica. O crescimento do meandro e a formação do vórtice ocorreriam devido a processos de instabilidade baroclínica (CALADO *et al.*, 2001; FERNANDES *et al.*, 2009; MANO *et al.*, 2009; SILVEIRA *et al.*, 2008). Os principais locais de formação de vórtices gerados pela CB na costa sudeste brasileira são Cabo Frio, Cabo de São Tomé e Vitória.

A grande maioria das pesquisas sobre os processos de mesoescala associados a meandros e vórtices da CB na região entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio foram com base em resultados de modelos (CALADO *et al.*, 2010, FERNANDES *et al.*, 2009; MANO *et al.*, 2009) e somente em 2008 foi publicado o primeiro trabalho sobre a dinâmica desses meandros baseado em observações diretas (SILVEIRA *et al.*, 2008). A partir da análise de uma série temporal de velocidade de corrente de 152 dias, SILVEIRA *et al.* (2008) observaram padrões do perfil vertical médio do sistema CB-CCI (Corrente do Brasil-Corrente de Contorno Intermediária) e da estrutura vertical de um meandro.

Em estudo recente, LIMA (2008) desenvolveu um modelo conceitual que descreve a formação e desenvolvimento em superfície dos vórtices gerados ao largo do Cabo de São Tomé e as diferentes formas como o sinal destas feições seriam registradas por fundeios posicionados em diferentes locais. O modelo conceitual foi construído com base em observações do comportamento de vórtices ciclônicos, os quais foram identificados na análise de dois anos de dados de intensidade e direção de corrente superficial medidos pontualmente por ADCPs posicionados em diferentes locais do talude da Bacia de Campos, e composições de imagens de temperatura da superfície do mar obtidas por satélite.

O objetivo deste estudo foi aumentar o conhecimento sobre a estrutura vertical

do sistema CB-CCI durante períodos de estabilidade e períodos de meandramento e formação de vórtices na região do Cabo de São Tomé. Esta pesquisa deu continuidade ao trabalho de LIMA (2008), estendendo seus estudos às análises das séries temporais de velocidades da corrente coletadas em diversas profundidades por sete fundeios. Estas séries temporais são inéditas e longas (aproximadamente 701 dias), amostrando a velocidade da corrente até um máximo de 600 m, com resolução vertical de 24m.

A interpretação da observação pontual dos processos de interesse do sistema CB-CCI, é de grande complexidade devido a limitação espacial na amostragem da corrente. A análise conjunta das séries temporais de dados de correntes medidos pontualmente, imagens de temperatura da superfície do mar (TSM), obtidas de sensoriamento remoto, e resultados de simulações numéricas regionais de alta resolução ($1/12^\circ$) usando o modelo HYCOM porém, possibilitaram uma melhor interpretação desses processos. Para atender ao objetivo deste estudo, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- investigar o comportamento médio do sistema CB-CCI e sua estrutura modal;
- investigar a componente barotrópica da perturbação da corrente associada a formação e desenvolvimento de meandros e vórtices na região ao largo do Cabo de São Tomé;
- investigar a interação dos vórtices identificados ao largo do cabo de São Tomé com a Corrente Intermediária;

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Sistema CB-CCI

A Corrente do Brasil (CB) é a Corrente de Contorno Oeste associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul. É formada quando a Corrente Sul Equatorial (CSE) encontra a costa brasileira e se bifurca. O ramo que flui para o sul origina a CB e o ramo que flui para norte origina a Subcorrente Norte do Brasil (STRAMMA *et al.*, 1990; PETERSON e STRAMMA, 1991; STRAMMA, 1991; WIENDERS *et al.*, 2000). Sua origem ocorre ao norte de 10°S começando sua organização ainda distante da margem continental. Em aproximadamente 14,5°S a CB se organiza como corrente de contorno oeste, fluindo junto a margem continental leste brasileira (SOUTELINO, 2008). O transporte da CSE, em direção a costa brasileira, é de aproximadamente 8 Sv. Destes, 4Sv são transportados para sul na formação da CB. Conseqüentemente, em sua região de origem, ela é visivelmente mais fraca que outras correntes de contorno oeste (PETERSON e STRAMMA, 1991). A CB então flui para sul sobre o talude continental, bordejando a América do Sul sobre a quebra

da plataforma continental até a região da Convergência Subtropical (entre 33°S e 38°S) onde se encontra com a Corrente das Malvinas e se afasta da costa.

Ao sul de 10°S, a CB é uma corrente rasa, quente e salina, transportando basicamente Água Tropical (AT) em níveis superficiais. Apesar de receber contribuição efetiva da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) em aproximadamente 20°S, que a torna mais profunda e aumenta seu transporte em direção ao sul (SILVEIRA *et al.*, 2000), a CB permanece com transporte baixo ao longo de seu escoamento. Estimativas de transporte calculados para as regiões entre 10° e 25°S não ultrapassaram 11 Sv (PETERSON e STRAMMA, 1991). Na zona de Convergência Subtropical, estimativas feitas a partir de cálculos geostróficos, mostram transportes em 33°S de 17,5 Sv (STRAMMA, 1988) e em 38°S de 19 Sv (GORDON e GREENGROVE, 1986). Portanto, a CB é descrita na literatura como uma corrente fraca, em termos de transporte, principalmente se comparada a corrente de contorno oeste do Oceano Atlântico Norte, a Corrente do Golfo (CG).

Depois de separar a circulação oceânica em componente eólica e termohalina, STOMMEL (1965) creditou a diferença de transporte entre a CB e a CG à possibilidade da componente termohalina ter sentido oposto daquela gerada pelo vento no Atlântico Sul. No caso da CG as componentes se somariam. Apesar de estudos observacionais mais recentes sugerirem uma maior complexidade do padrão de circulação, a hipótese apresentada por Stommel ainda não foi contestada.

Ao revisar aspectos cinemáticos e dinâmicos da CB, SILVEIRA *et al.* (2000) deixam claro que o padrão de circulação entre 20° e 25°S, assemelha-se ao esquema proposto por Stommel (SILVEIRA *et al.* (2000), p. 2, fig. 2). Nos primeiros 1500 m de profundidade, esta circulação é composta por um complexo sistema de

correntes de contorno oeste fluindo em sentidos opostos, formado em superfície pela CB fluindo para sul-sudoeste transportando basicamente AT e ACAS e, em níveis intermediários, pelo fluxo para norte-nordeste da Corrente de Contorno Oeste Intermediária (CCI) transportando a Água Intermediária Antártica (AIA) (BOEBEL, 1999a). Este é o chamado sistema CB-CCI. Como a região de estudo do presente trabalho localiza-se entre 21° e 23°S, ou seja, região cujo sistema CB-CCI está presente, torna-se necessário um melhor entendimento deste sistema.

A região do sistema CB-CCI é composto pelo empilhamento de três massas d'água: a AT, a ACAS e a AIA. A AT é uma massa d'água característica da porção superior do Giro Subtropical. Formada no Atlântico Sul Tropical, região onde a taxa de evaporação excede a taxa precipitação, é caracterizada por altos valores de temperatura e salinidade que marcam as propriedades termohalinas da CB em sua região de origem; uma corrente rasa, quente e salina (SILVEIRA *et al.*, 2000). Ao longo do seu transporte para sul pela CB, a AT se mistura com água de origem costeira, menos quente e salina, apresentando entre 20° e 25°S de latitude, temperatura e salinidade maiores que 20°C e 36 respectivamente (EMÍLSON, 1961). Abaixo da AT, a CB transporta a ACAS.

A ACAS é uma massa d'água formada por subducção na região da Convergência Subtropical, espalha-se em nível picnoclínico pelo Oceano Atlântico Sul, fluindo para norte até entrar como parte da circulação do Giro Subtropical, onde é transportada dentro da Corrente do Atlântico Sul e pela Corrente de Benguela. A ACAS escoia pela costa africana sendo parte do fluxo da Corrente de Benguela até ser transportada pela CSE. Como em superfície, em nível picnoclínico a CSE atinge a costa do continente sul americano e se bifurca, constituindo parte da CB. Apesar de

não ser ainda muito bem definida a exata localização da bifurcação, sabe-se que a sul do Cabo de São Tomé (22°S) ela flui para sul (SILVEIRA *et al.*, 2000). Carregando as características termohalinas de sua região de formação, a ACAS é responsável pela alta variação de salinidade dentro do Giro Subtropical, apresentando temperaturas entre 6°C e 20°C e salinidade entre 34.6 e 36. Ao longo de seu escoamento junto a CB mantém suas propriedades bastante uniformes (STRAMMA e ENGLAND, 1999).

A AIA é uma massa d'água formada na região da convergência Subantártica, que flui no sentido norte até 40°S onde entra no Giro Subtropical como parte de uma recirculação mais profunda (nível subpicnoclínico). Seguindo o Giro Subtropical, esta massa flui ao encontro do continente sul americano, bifurcando-se aproximadamente entre 25°S e 28°S de latitude, próximo ao platô de Santos. A norte de 25°S, parte flui no sentido norte sendo definida por BOEBEL (1999a) como a CCI. Ao sul de 28°S, parte da AIA flui para sul como um fluxo largo subjacente à CB. Abaixo da AIA, a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN) flui para sul. Ao sul de 28°S então, a AT, ACAS, AIA e APAN fluem no mesmo sentido. A AIA, ao norte de 50°S, pode ser reconhecida por camadas de mínima salinidade, que variam entre 34,2 e 34,6. Sua variação de temperatura é pequena, com limites entre 3°C e 6°C.

A figura 2.1 é um resumo esquemático das correntes de contorno oeste que fluem ao largo da costa brasileira e as massas de água transportadas por estas correntes. Em vermelho e azul claro a CB transportando AT e ACAS. Em azul a CCI transportando AIA e em cinza a CCP (Corrente de Contorno Profunda) transportando a APAN.

Uma representação do sistema CB-CCI foi vista na seção zonal de velocidade

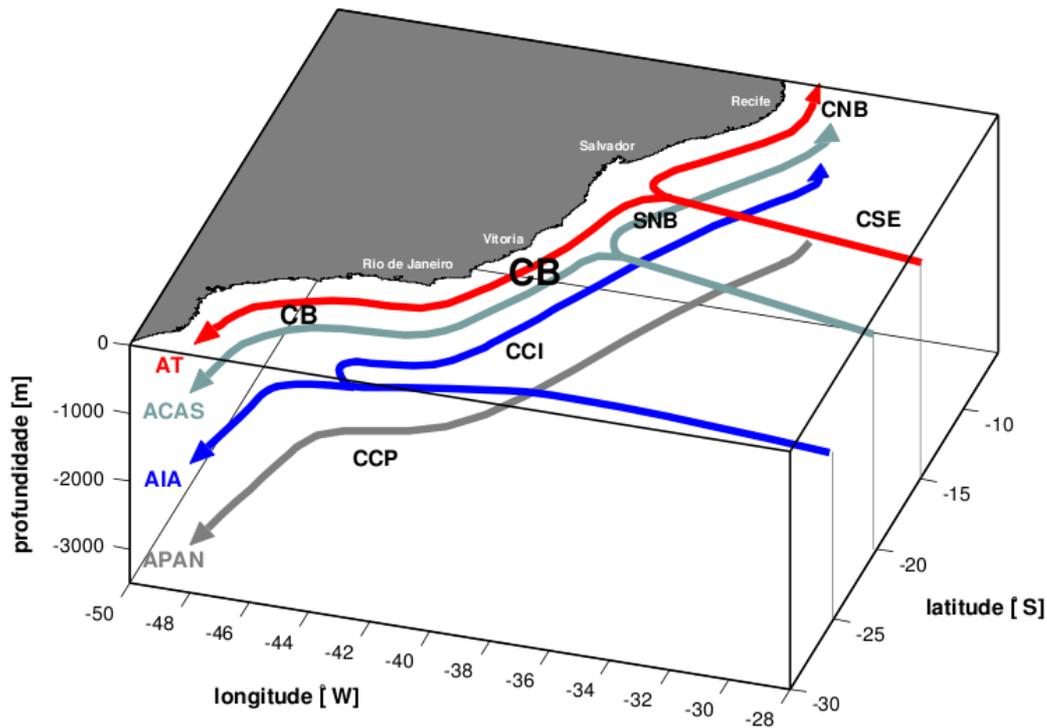


Figura 2.1: Esquema das correntes de contorno oeste e massas d'água ao largo da costa sudeste brasileira, extraído de SOUTELINO (2008), segundo os resultados de STRAMMA e ENGLAND (1999). Em vermelho e azul claro a CB transportando AT e ACAS. Em azul a CCI transportando AIA e em cinza a CCP (Corrente de Contorno Profunda) transportando a APAN.

meridional da corrente apresentado na figura 4.7. Observa-se na porção superior um fluxo da CB para sul até profundidades intermediárias (400-500 m). Abaixo de 500 m existe uma inversão do fluxo para norte associada a CCI, resultando em um forte cisalhamento vertical de velocidade.

A largura da CB em superfície varia entre 100-120 km, e seu núcleo está centrado em 50 m de profundidade enquanto que a largura da CCI é ± 30 Km (BOEBEL,

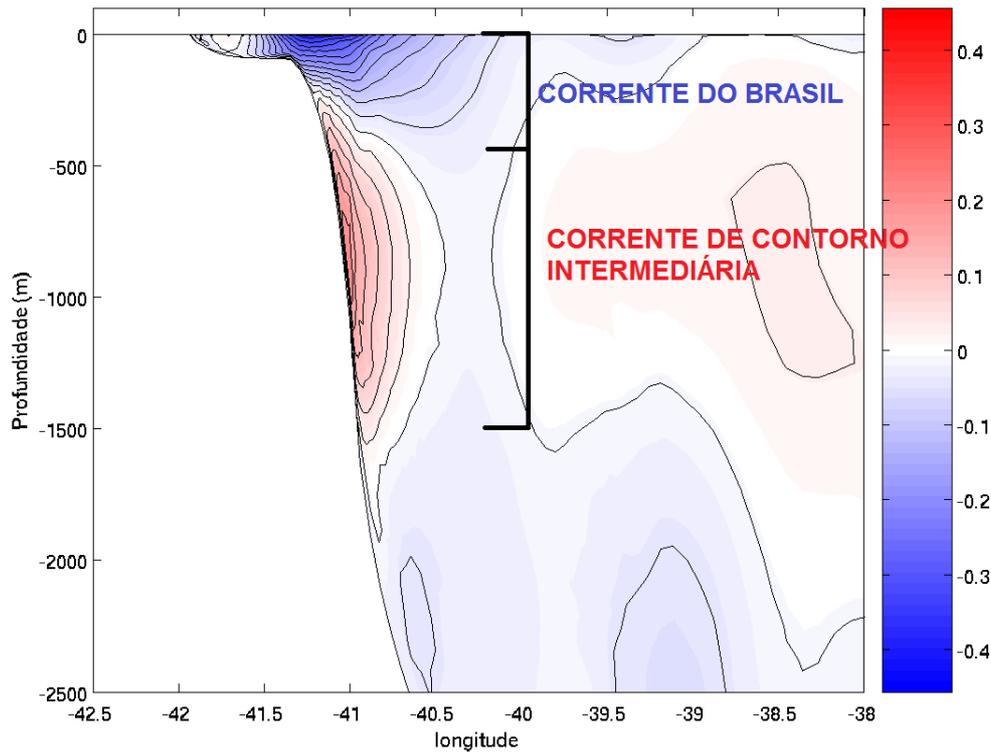


Figura 2.2: Seção zonal de velocidade meridional em 21°S de latitude representando o sistema CB-CCI ao largo do sudeste brasileiro. Observa-se a CB na porção superior e a CCI na porção inferior do sistema. Com base em resultados de uma simulação numérica da circulação oceânica da costa sudeste brasileira feita com o modelo Princeton Ocean Model (POM) (resolução de 10km) por um grupo de pesquisas da COPPE.

1999a) com núcleo centrado entre 800 e 1000 m de profundidade (SCHMID *et al.*, 1995). Valores médios no núcleo da CB e CCI foram apresentados por SILVEIRA *et al.* (2008). Após analisar dados de correntógrafos fundeados próximo a 23°S, o autor observou valores médios de 0,41 m/s na CB e 0.22 m/s na CCI. Assim como a CB, os valores de transporte da CCI na região são baixos e não ultrapassam 4 Sv

(SCHMID *et al.*, 1995).

Mesmo sendo considerada na literatura como uma corrente fraca, por apresentar baixo transporte e baixos valores de velocidade, a CB é caracterizada pela presença recorrente de acentuados meandros que eventualmente se fecham em vórtices. Entre as estruturas vorticais geradas ao largo do sudeste brasileiro estão o Vórtice de Vitória (SCHMID *et al.*, 1995), o Vórtice do Cabo de São Tomé (GARFIELD III, 1990) e o Vórtice de Cabo Frio (MASCARENHAS *et al.*, 1971). O processo de interação desses vórtices com a CCI ainda é pouco conhecido. O vórtice do Cabo de São Tomé constitui parte das feições de estudo deste trabalho.

2.2 Estruturas de mesoescala da CB

vórtices e meandros

O desenvolvimento de significativa atividade de mesoescala associada ao crescimento e propagação de meandros e vórtices a CB entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio, tem sido observado desde o final de 1970 a partir de estudos clássicos de oceanografia observacional, tais como Mascarenhas *et al.*, (1971) e Signorini (1978). Os primeiros autores descreveram a presença de estruturas vorticais ao largo da costa SE brasileira e as associaram às feições topográficas da região. Ao discutir a circulação entre o Cabo de São Tomé e a Baía de Guanabara, Signorini descreve um vórtice anticiclônico encontrado ligeiramente ao norte do Cabo Frio. Posteriormente, a partir de dados hidrográficos e imagens de satélite GARFIELD III (1990) apresenta evidências da presença de vórtices próximo ao Cabo de São Tomé. SCHMID *et al.* (1995), identificou um vórtice ciclônico próximo a cidade de Vitória.

No oceano, vórtices geralmente ocorrem associados a correntes oceânicas fortes como um produto final de processos de instabilidade. A instabilidade geofísica ocorre quando a corrente excede a capacidade do balanço fundamental (por exemplo a geostrofia), que pode ocorrer devido à presença de forte cisalhamento no seu perfil horizontal (instabilidade barotrópica) e ou vertical (instabilidade baroclínica). Os vórtices são precedidos do crescimento de ondas e meandros, parte do fluxo se fecha e a corrente original volta ao fluxo zonal, linear (OLSON, 1991; CUSHMAN-ROISIN, 1994).

Uma hipótese para a formação de meandros pela CB foi proposta por Campos (1995) ao discutir sobre aspectos dinâmicos deste sistema ao largo de Cabo Frio. Seguindo esta hipótese podemos explicar também a formação de meandros pela CB ao largo do Cabo de São Tomé. As causas do meandramento da CB foi atribuído à abrupta mudança da orientação da linha de costa e do gradiente de topografia de fundo que, por conservação de vorticidade potencial gerariam uma onda de Rossby topográfica ao longo do talude. O autor explica que a CB escoava praticamente no sentido norte-sul ao norte do Cabo de São Tomé. Quando esta orientação muda para leste-oeste ao sul do Cabo de São Tomé, o escoamento da CB tende a continuar, por inércia, para sul e atinge regiões mais profundas, conduzindo a um estiramento da coluna de água. Pela conservação de vorticidade potencial, a CB deve, então, adquirir vorticidade relativa negativa, o que a faz defletir para regiões mais rasas. Espalha-se sobre a plataforma continental, adquirindo vorticidade relativa positiva (figura 2.3). A sucessão de núcleos de vorticidade positiva (anticiclones) e vorticidade negativa (ciclones) representa a manifestação de uma onda de Rossby.

O crescimento do meandro e a formação do vórtice ocorre devido a processos

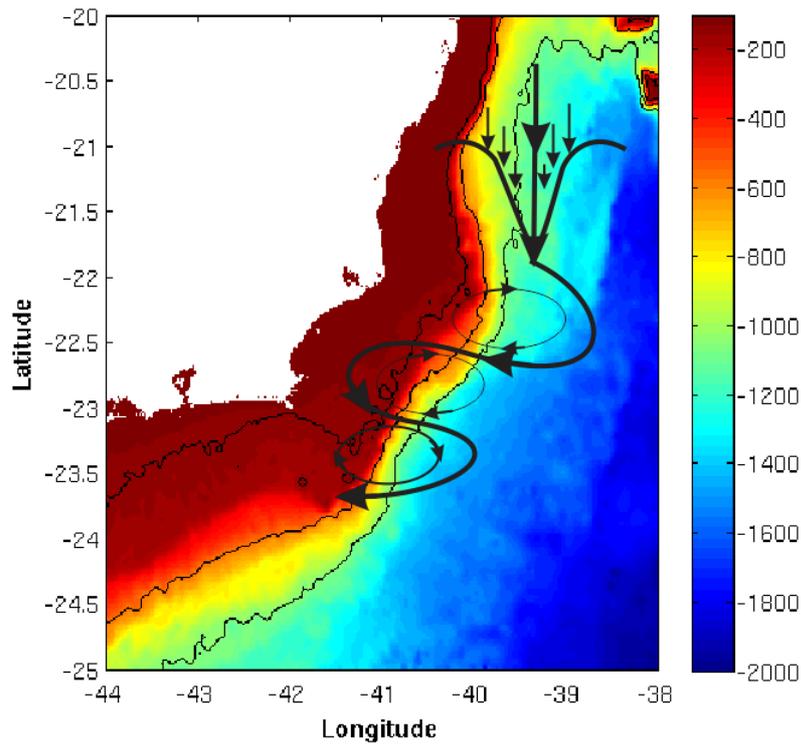


Figura 2.3: Interpretação da hipótese de CAMPOS (1995) adaptada a região ao largo do Cabo de São Tomé. A figura mostra o comportamento da corrente ante a mudança de orientação da linha de costa ao sul do Cabo de São Tomé.

de instabilidade baroclínica de primeiro modo (CALADO *et al.*, 2001; SILVEIRA, *et al.*, 2004; SILVEIRA *et al.*, 2008; FERNANDES *et al.*, 2009; MANO *et al.*, 2009). Como descrito anteriormente, o fluxo médio do sistema CB-CCI abaixo de profundidades intermediárias é marcado por uma inversão na direção da velocidade da corrente. Consequentemente, o perfil vertical da vorticidade potencial média muda de sinal ao longo da profundidade e a estrutura vertical do sistema CB-CCI atinge as condições necessárias para gerar instabilidade baroclínica (SILVEIRA *et al.*, 2008). Se o processo de instabilidade baroclínica for capaz de drenar energia potencial disponível do fluxo médio, o meandro cresce, se fecha e origina o vórtice.

Depois de formados os vórtices gerados pela CB entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio podem ser emitidos para o interior do Giro Subtropical ou simplesmente ser reabsorvidos pela corrente (LIMA, 2008).

MANO *et al.* (2009) reproduziram, mediante modelagem numérica com o Princeton Ocean Model (POM), a formação de um vórtice ciclônico ao largo de Cabo Frio. Os resultados indicaram a possibilidade de vórtices gerados a partir processos de instabilidade baroclínica primeiramente aparecerem em profundidades intermediárias (600m) e posteriormente se propagarem para a superfície. O sinal do vórtice só atingiria a superfície 30 dias após sua formação. Ainda não existem observações diretas deste fenômeno.

O primeiro estudo baseado em observações diretas sobre a dinâmica dos meandros ciclônicos da região entre Cabo de São Tomé e Cabo Frio foi publicado somente em 2008 por SILVEIRA *et al.* A partir da análise de uma série temporal de velocidade de corrente de 152 dias, foi possível observar padrões do perfil vertical médio do sistema CB-CCI e da estrutura vertical de um meandro. Para investigar a estrutura do meandro, foi realizada uma análise de funções ortogonais empíricas (EOF) que revelaram que o primeiro modo respondia pela maior parte (82%) da variância total. A análise dos modos dinâmicos dos modos da EOF confirmou que a componente barotrópica é mais importante na estrutura vertical do meandro que no fluxo médio da corrente. Foi feita uma análise espectral da componente temporal das amplitudes deste modo, entretanto, não foi encontrado nenhuma periodicidade significativa associada ao meandro estudado. SILVEIRA *et al.* (2008), relacionou este último resultado ao tamanho da série temporal usada (152 dias).

É importante notar que as pesquisas sobre os processos de mesoescala associados

a meandros e vórtices da CB na região entre o Cabo de São Tomé e Cabo Frio são incipientes. Enquanto a origem e as características em superfície das estruturas de mesoescala da CB têm sido investigadas desde a década de 70, seu perfil vertical ainda permanece pouco conhecido. A grande maioria das pesquisas foi baseada em resultados de modelos e apenas um trabalho foi publicado sobre a dinâmica desses meandros baseado em observações diretas.

Capítulo 3

Metodologia

3.1 Dados de ADCP

Foram analisados 2 anos de dados de perfis verticais de intensidade e direção de corrente coletados a partir do fundeio de sete perfiladores de correntes acústicos (figura 3.1), Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), localizados na quebra da plataforma continental e talude da Bacia de Campos. Os modelos de ADCPs utilizados foram Ocean Observer BroadBand de 38 kHz e 75 kHz, fabricados pela teledyne RD Instruments (TRDI) e foram instalados com os transdutores apontados para baixo. Foi realizada uma amostragem a cada hora e cada amostra correspondeu a um valor médio medido no período de 10 minutos. A figura 3.2 mostra o intervalo de dados disponíveis para o estudo. Observa-se que o registro mais antigo de dados corresponde a 29 de janeiro de 2006 e o mais recente a 31 dezembro de 2007, totalizando 701 dias de dados. Os dados não são contínuos ao longo do tempo.

A profundidade local de cada fundeio variou de 570 a 1258 m. A coluna d'água foi dividida em 37 camadas, sendo que a espessura das camadas variou em função

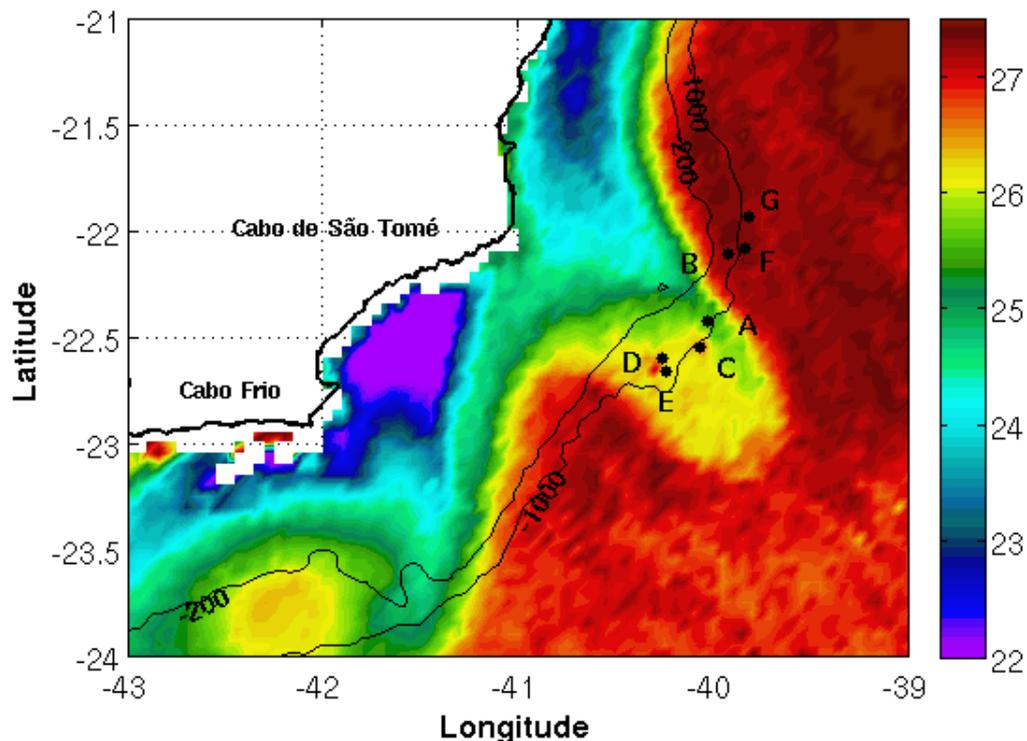


Figura 3.1: Imagem de TSM do dia 8 de fevereiro de 2008 - GOES 12. A figura mostra a formação do vórtice do Cabo de São Tomé e a localização de cada fundeio (G, F, B, A, C, D e E), em ordem de localização mais ao N.

da profundidade local de cada fundeio, sendo 16 m para fundeios mais rasos e 24 m para os mais profundos. Dados de boa qualidade foram registrados até 600 m de profundidade nos fundeios D, E e F possibilitando a observação da porção superior da CCI.

Em LIMA (2008), foram feitas análises preliminares dos dados de ADCP coletados em superfície em todos os fundeios. A partir dos registros de velocidade foram identificados e selecionados longos períodos de inversão da direção da corrente, mudando a direção de S/SO para N, que indicariam a possível formação de meandros e vórtices.

Investigou-se nas imagens de TSM se durante os períodos selecionados

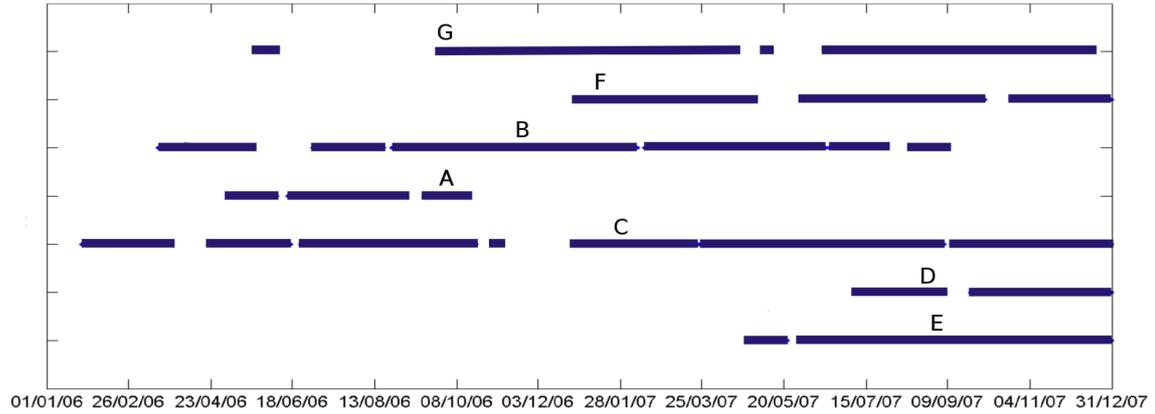


Figura 3.2: Período de amostragem em cada fundeio. Note que os dados não são contínuos ao longo do tempo. G, F, B, A, C, D e E representam cada um dos fundeios e estão ordenados de acordo com sua localização de norte para sul.

observavam-se a formação de estruturas vorticais, estabelecendo-se então os períodos de ocorrência de vórtices apresentado na tabela 4.1. Nesta tabela são apresentados os sete vórtices identificados por LIMA (2008) (vórtices 2, 3, 4, 6, 7, 8 e 9) e mais dois vórtices identificados neste trabalho (vórtices 1 e 5). Os dados de velocidade da corrente coletados em superfície foram ainda decompostos em suas componentes zonal e meridional e determinadas sua densidade espectral. Depois de investigadas frequências de interesse a partir da análise espectral de Fourier, foi utilizado um filtro digital Butterworth do tipo passa-baixa com frequência de corte de 0.2 ciclos por dia para retirar frequências subinercias, e sinal de passagem de frentes frias.

Para ilustrar a análise dos dados em diversas camadas foram escolhidos os dados dos fundeios F, D e E. Estes foram os fundeios com registros de dados bons mais profundos, atingindo aproximadamente 600 m de profundidade. As componentes de velocidade u e v foram rotacionadas de acordo com a direção preferencial de

escoamento da corrente em cada fundeio, passando então a ser decomposta em componente transversal e paralela a linha de costa. Os processos dinâmicos da corrente possivelmente observados nos dados de ADCP foram investigados a partir de análise de funções ortogonais empíricas.

3.2 Funções Ortogonais Empíricas convencional e complexa

A análise das funções ortogonais empíricas (*Empirical Orthogonal Function* – EOF), também conhecida como análise de componentes principais é um método estatístico que fornece uma descrição espacial e temporal compacta da variabilidade de uma série temporal em termos de funções ortogonais ou modos estatísticos (EMERY e THOMSON, 1998). “Introduzido” nas geociências por LORENZ (1956), o método é amplamente utilizado pela maior parte da variância de uma série temporal, ser explicada nos primeiros modos estatísticos. Outra razão é a possibilidade de se relacionar os padrões de cada modo estatístico à modos dinâmicos (ou comportamentos físicos)(KAIHATU, *et al.*, 1997), e por este motivo tem sido utilizada na oceanografia para inferir a energia e escalas espaciais e temporais de diversos processos físicos, entre eles, a variabilidade de correntes oceânicas (EDWARDS e SEIM, *et al.*, 2008, KAIHATU, *et al.*, 1997, KUNDU, *et al.*, 1975, SILVEIRA, *et al.*, 2008). É importante destacar que não existe necessariamente uma relação física ou matemática entre os modos estatísticos das EOFs e os modos dinâmicos.

Para entender melhor o significado das EOFs, será feita uma breve descrição

matemática sobre o método, baseado em KUNDU *et al.* (1975). Apesar do método ter aplicação no domínio do tempo e da frequência, sua descrição será restrita ao domínio do tempo. Considere um conjunto de funções $\psi(z, t)$ uma série ergódica definida por $\psi_k(z_i)$ onde o índice K pode ser considerado como o tempo $t_k (k=1, \dots, K)$ e z_i é definido em um número finito de valores de $z_i (i=1, \dots, N)$. No presente estudo, foi considerado como ψ_k a velocidade paralela (ou transversal) a linha de costa no tempo t_k na profundidade z_i . Em cada tempo t_k os dados $\psi_k(z)$, $i=1, \dots, N$ são plotados como um ponto ou vetor no espaço de N -dimensões, onde existe portanto K pontos no espaço. Então, pode-se definir a seguinte matriz real, simétrica e positiva de coeficientes de correlação:

$$R(z_i, z_j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^N \psi_k(z_i) \psi_k(z_j) \quad (3.1)$$

achando seus autovetores reais e autovalores positivos, definimos por:

$$\sum_{i=1}^N R(z_i, z_j) \phi_n(z_i) = \lambda_n \phi_n(z_j), \quad n = 1, \dots, N, \quad (3.2)$$

as *funções ortogonais empíricas*. Cada autovetor ϕ_n corresponde a um autovalor λ_n , que pode ser diretamente associado a uma certa porcentagem de variância ou energia em cada modo. O campo escalar $\nu_k(z_i)$ pode ser expandido em termos de ϕ_n , definindo uma nova variável E_{km} :

$$E_{km} = \sum_{i=1}^N \tau_k(z_i) \phi_n(z_i), \quad (3.3)$$

onde τ_k representa os coeficientes temporais dos modos (amplitude modal) que podem ser correlacionados no tempo. A nova matriz de correlação não possui termos “fora” da diagonal já que obedece as condições de ortogonalidade, ou seja:

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K E_{kn} E_{km} = \lambda_n \delta_{nm}. \quad (3.4)$$

Note que se a matriz real e simétrica é diagonalizada, um dos termos diagonal é maximizado e outro é minimizado e, é intuitivo que ϕ_1 , ou primeiro modo, explica a energia máxima do conjunto de dados, e que $\phi_2 > \phi_3 > \dots > \phi_n$, concluindo-se que a expansão de $\nu_k(z_i)$ em termos de ϕ_n leva a uma rápida convergência da série.

Portanto, na análise de EOF, determinam-se os autovetores, autovalores e os coeficientes de uma matriz real. Cada autovetor ϕ_n , ou modo, nos oferece um campo espacial que possui uma fração maximizada da variância total ou energia determinada pelo seu autovalor associado λ_n , sendo que a série temporal dos coeficientes (amplitudes) fornece a evolução temporal do espaço em N -dimensões. Pode-se ainda dizer que a energia total é obtida pela soma de λ_n .

A formulação matemática apresentada anteriormente é a chamada EOF convencional. Existem outras variações de EOFs, e devido ao particular interesse deve-se citar as EOFs complexas. Ambas apresentam a mesma formulação matemática (KUNDU e ALLEN (1976)) porém, nas EOFs complexas devemos transformar a natureza vetorial dos dados em um escalar complexo que será definido por $\psi(z, t) = u(z, t) + iv(z, t)$, onde i é $\sqrt{-1}$.

Contudo, os dois métodos podem apresentar aplicações distintas. Vamos então

utilizar a análise de EOF para investigar a estrutura vertical da corrente até 600m de profundidade em períodos de estabilidade e períodos de formação de vórtices. Como existe um interesse em separar as contribuições barotrópicas e baroclínicas da perturbação da corrente nesses diferentes períodos, a análise de EOF convencional será aplicada separadamente as componentes de velocidade transversal e paralela a linha de costa. Com a EOF complexa será feito uma análise conjunta das componentes de velocidade coletadas pelo ADCP, sendo possível inferir além dos modos de maior variabilidade da corrente, em diferentes períodos, também a direção de maior variabilidade.

3.3 Temperatura da Superfície do Mar

Com a finalidade de interpretar espacialmente os fenômenos observados nos dados pontuais de velocidade da corrente foram feitas análises visuais das imagens termais de temperatura da superfície do mar. As imagens diárias foram obtidas pelo satélite GOES 12, com resolução espacial de 6km e as composições de 72h foram produzidas pelo Laboratório de Meteorologia Aplicada (LMA) da UFRJ (PAES *et al.*, 2009), no âmbito de um projeto de pesquisa e desenvolvimento em parceria com a PETROBRAS (PAES, *et al.*, 2005). Foram disponíveis dados de TSM medidas entre os meses de janeiro de 2006 a dezembro de 2007. Das 729 imagens geradas foram selecionadas aquelas onde observou-se a ocorrência dos eventos de formação de vórtices (figura 3.1) portanto, foram analisadas 352 imagens. Assumiu-se que o período de duração de cada evento de formação de vórtices ocorria desde o momento em que observava-se nas imagens de TSM a formação do meandro até o momento em que a estrutura vortical já desenvolvida não era mais observada no domínio das

imagens.

Devido ao problema de cobertura de nuvens algumas imagens foram perdidas causando uma limitação na observação da evolução temporal e espacial dos vórtices. Outra provável limitação é apresentada por ROBINSON (1994). Segundo o autor os fluxos de calor em superfície têm uma influência significativa na capacidade de observar os vórtices através de imagens de satélite, pois o fluxo diminui os gradientes superficiais de temperatura, dificultando assim a identificação do sinal do vórtice no campo de temperatura em superfície do mar. Desta forma, o vórtice pode perder sua assinatura térmica e não aparecer nas imagens.

3.4 Modelagem Numérica

Uma simulação numérica aninhada sinótica de alta resolução ($1/12^\circ$) correspondente ao SW do oceano Atlântico Sul também está disponível para o estudo. Esta simulação foi desenvolvida por um grupo de pesquisa da COPPE atendendo a Rede Temática de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) usando o modelo HYbrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). O HYCOM é um modelo de circulação global em diferenças finitas na horizontal com coordenadas verticais híbridas, podendo utilizar coordenadas isopícnais, sigma ou z, e é considerada uma ferramenta aplicável a qualquer região do oceano (BLECK, 2002).

O domínio desse experimentos compreendeu a região da Meta Área (entre as latitudes 7°N e $35^\circ50'\text{S}$ e entre a longitude de 20°W e a costa brasileira), porém foram selecionados no presente trabalho os resultados do experimento correspondentes a 20° e 24°S de latitude e 38° e 44°W de longitude. O campo de massa foi discretizado em 21 camadas sigma theta na vertical, as forçantes em superfície são campos

sinóticos a cada 6 horas do NCEP e incluem tensão e cisalhamento do vento, fluxo de calor e precipitação. Nos contornos laterais a informação é interpolada a partir dos resultados de um experimento sinótico em $\frac{1}{4}$ de grau abrangendo o Oceano Atlântico. Foi simulado 6 anos de resultados (2003 a 2008), porém foram analisados os anos de 2004 a 2008. Os resultados da simulação serão usados para aumentar o entendimento espacial da evolução dos processos e feições observadas nos dados de ADCP e nas imagens de TSM, pois estende-se a regiões mais profundas podendo-se construir campos de velocidade em diversas profundidades (representativas da CB e CCI) e ao longo no tempo.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4.1 Comportamento da corrente em superfície

Dando continuidade ao trabalho de LIMA (2008), o comportamento da CB em superfície foi estudado a partir do dados de intensidade e direção da corrente correspondentes à primeira camada de medição dos ADCPs (aproximadamente 40 m de profundidade). Os sete ADCPs registraram períodos onde a direção da CB apresentou uma alteração significativa, de S/SW para E, N ou W, indicando um período de possível formação de um vórtice ou desenvolvimento de um meandro no local do fundeio. A análise conjunta dos dados in situ de velocidade, medidos próximo a superfície, e das imagens de TSM permitiu identificar os eventos de inversão de direção da corrente que efetivamente ocorreram devido a formação de vórtices e a evolução dessas feições.

Observou-se que a corrente nesta região exibiu um intenso meandramento ao longo dos dois anos de amostragem, nos quais foram observados a formação de nove vórtices, sendo cinco em 2006 e quatro em 2007. A figura 4.1 ilustra os períodos

de ocorrência de oito dos nove vórtices mencionados. O (vórtice 5) foi observado apenas nas imagens de TSM e seu desenvolvimento não pode ser acompanhado pela perda de imagens devido a cobertura de nuvens e por isso não se encontra na figura 4.1.

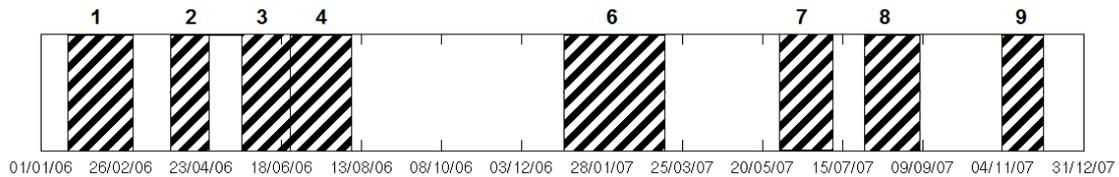
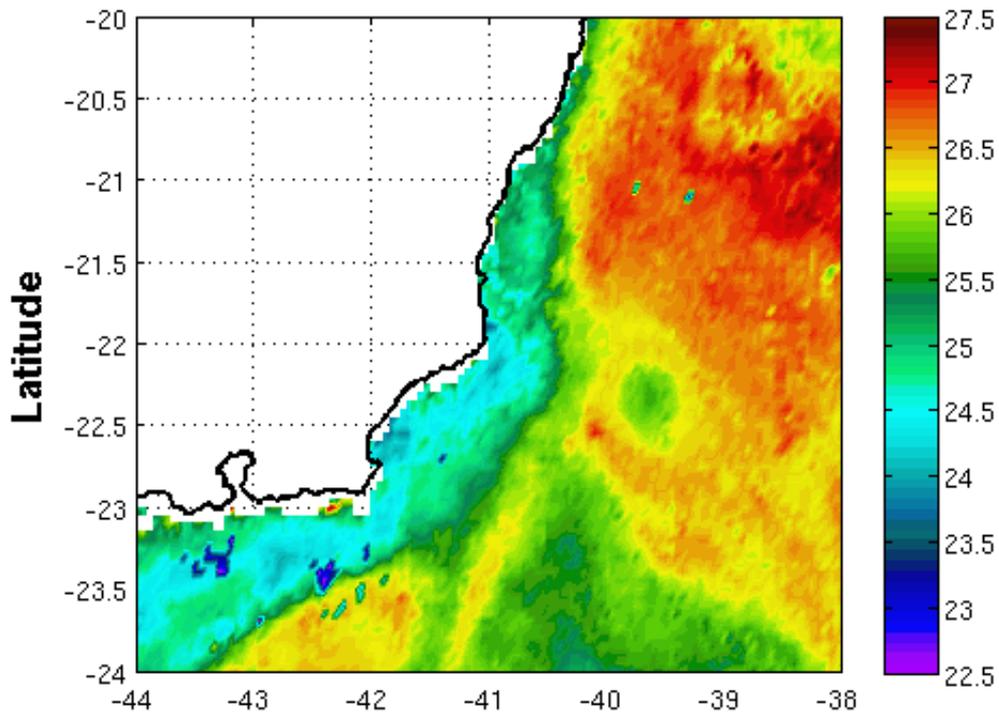


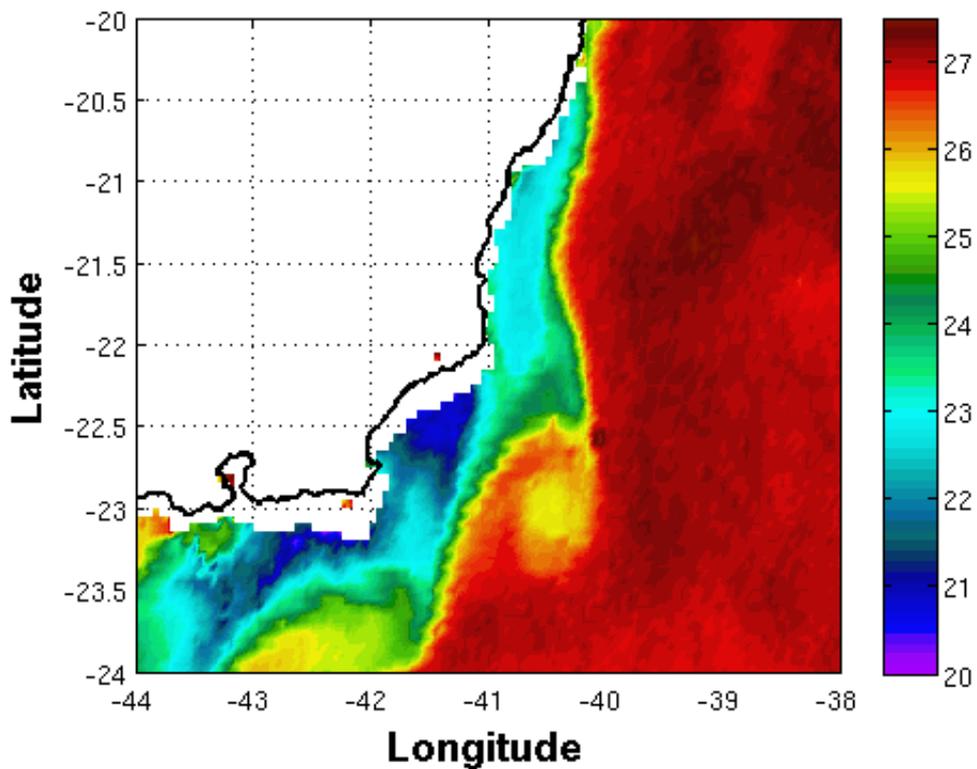
Figura 4.1: Gráfico de barras verticais apresentando o intervalo de ocorrência de 8 vórtices identificados. Cada barra vertical rachurada representa um vórtice. Não foi possível determinar o intervalo de ocorrência de um dos vórtices (vórtice 5).

Os eventos de formação e desenvolvimento dos vórtices duraram entre 22 e 72 dias. A Tabela 4.1 mostra para cada vórtice identificado, as características (coluna 4) e o período de desenvolvimento, desde o estágio de meandro (coluna 2) até o momento em que foi reabsorvido pela corrente ou foi emitido (coluna 3). Dois vórtices se desenvolveram e foram emitidos para o interior do giro subtropical do Atlântico Sul, enquanto cinco vórtices foram reabsorvidos pela CB. Um dos vórtices identificados nas séries temporais de velocidade (vórtice 9) perdeu a assinatura térmica em superfície e não foi possível observar sua evolução nas imagens de TSM. A figura 4.2 ilustra um vórtice que foi emitido e um vórtice que foi reabsorvido pela corrente.

Foram observados outros períodos de intensa atividade de mesoescala da corrente, durante 2007. Nos meses de maio e outubro de 2007 foi observado forte



(a) GOES 12 - 22 de abril de 2006 - vórtice 2



(b) GOES 12 - 13 de março de 2007 - vórtice 6

Figura 4.2: Imagens de TSM GOES 12 ilustrando um vórtice emitido para o giro Subtropical do Atlântico sul (em cima) e um vórtice reabsorvido pela corrente (em baixo).

Tabela 4.1: Período de desenvolvimento dos vórtices.

Vórtice	Início	Fim	Comportamento
1	20-jan-2006	26-mar-2006	Reabsorvido
2	1-abr-2006	1-mai-2006	Emitido
3	1-mai-2006	22-mai-2006	Emitido
4	21-jun-2006	7-ago-2006	Reabsorvido
5	set-2006	out-2006	Desconhecido
6	1-jan-2007	14-mar-2007	Reabsorvido
7	1-jun-2007	7-jul-2007	Reabsorvido
8	1-ago-2007	8-set-2007	Reabsorvido
9	5-nov-2007	4-dez-2007	Desconhecido

meandramento. Entretanto, só foram destacados na tabela 4.1 aqueles períodos onde efetivamente foi identificada a formação de vórtices. O vórtice que teve maior duração foi o vórtice 6 (figura 4.2b). Este vórtice durou cerca de 72 dias e durante o seu desenvolvimento a velocidade da corrente chegou a atingir intensidade de 0.81m/s, na direção SO (212°), no registro do fundeio F (figura 4.3), intensidade maior que o dobro da velocidade média em superfície (0.30 m/s) calculada para este mesmo fundeio durante um período de meandramento local menos intenso, ou seja, que não ocorreu formação de vórtice (31/10/2007 a 05/01/2008).

Foi calculada a velocidade média para os demais pontos de coleta e comparada com as velocidades durante a formação de vórtices. As velocidades médias e os períodos de dados analisados são apresentados na tabela 4.2. O período de dados utilizados também foi durante períodos em que localmente a corrente exibiu meandramento menos intenso. O fundeio D apresentou a maior média de velocidade (0.42 m/s), e registrou cerca de 0.7 m/s, na direção SO (208°) durante a ocorrência do vórtice 9. No fundeio A, onde foi observada a menor velocidade média (0.21 m/s), foram registradas velocidades de até 0.44 m/s, na direção N (359°) durante a ocorrência do vórtice 4. Velocidades médias (0.41m/s) similares à encontrada no

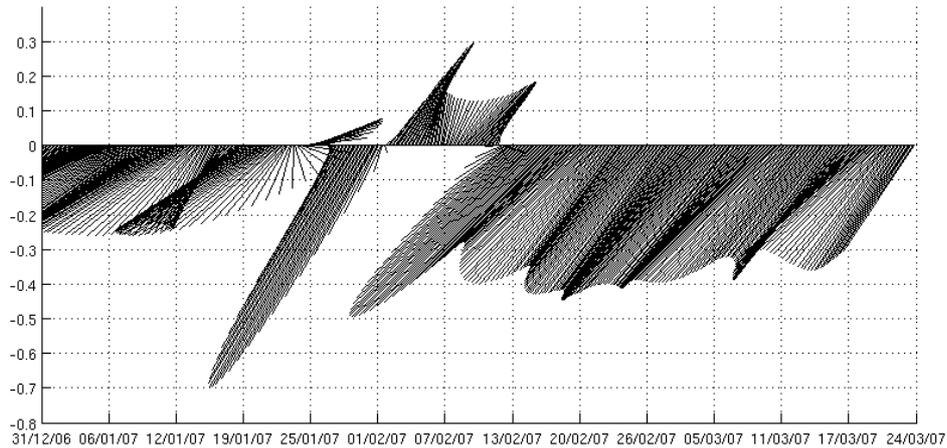


Figura 4.3: Gráfico de vetores de velocidade registrados em superfície pelo fundeio F durante a formação e desenvolvimento do vórtice 6. Dados filtrados com filtro do tipo passa-baixa e frequência de corte de 0.2 ciclos por dia.

fundeio D, são descritas na literatura por SILVEIRA *et al.* (2008) e associadas a valores médios típicos do núcleo da CB. Também foram verificados momentos onde as velocidades eram aproximadamente nulas, menores que 0.1m/s, principalmente no fundeio C, que frequentemente localiza-se no centro do vórtice como pode ser observado na figura 3.1. Os vórtices geraram variabilidade muito significativa no fluxo médio da corrente em superfície, gerando variações de intensidade da corrente da mesma ordem de grandeza da velocidade média observada. Na região de estudo, existem períodos em que observa-se nas imagens de TSM uma CB estável, porém, são mais curtos e menos recorrentes que os períodos de ocorrência de intensa atividade

de mesoescala.

Tabela 4.2: Velocidade média em superfície da corrente para períodos de fraco meandramento nos fundeios A, B, C, D, E, F e G.

Fundeiio	Início	Fim	Velocidade média [m/s]
A	1-ago-2006	31-ago-2006	0,21
B	10-set-2006	31-dec-2006	0,38
C	2-mar-2007	1-mai-2007	0,36
D	1-out-2007	1-dec-2007	0,42
E	1-out-2007	1-dec-2007	0,35
F	31-out-2007	5-jan-2008	0,31
G	1-set-2007	1-dec-2007	0,27

Foram observadas também bruscas mudanças de direção registradas em cada fundeio. Variações na direção do fluxo da corrente de S/SO para N/NE ocorreram em até um dia, permanecendo nesta orientação por vários dias, como observado no fundeio C (figura 4.4) durante a formação do vórtice 1, em que a orientação da corrente próximo a superfície permaneceu N/NE por 38 dias.

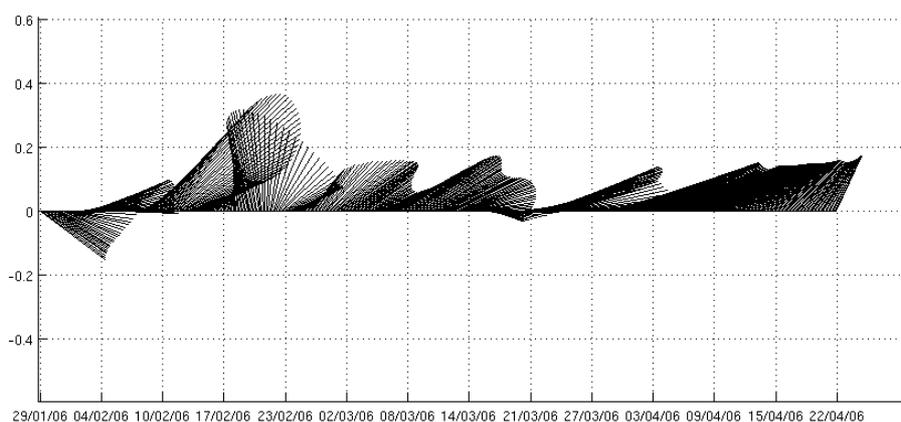


Figura 4.4: Gráfico de vetores de velocidade registrados em superfície pelo fundeio C durante a formação e desenvolvimento do vórtice 1. Dados filtrados com filtro do tipo passa-baixa e frequência de corte de 0.2 ciclos por dia.

Através da sequência de imagens a seguir (figura 4.5) pôde-se observar a evolução do vórtice 7, sua localização espacial e os fundeios que o registraram. No dia 6 de junho observa-se na figura 4.5 um pequeno meandro sobre os fundeios B (triângulo) e C (quadrado). O meandro se desenvolve e no dia 10 de junho observa-se o vórtice 7. As imagens de TSM mostraram o vórtice se deslocando para sul no dia 16. No dia 6 de julho foi reabsorvido pela CB. Nos registros de velocidade o fundeio B mostrou no dia primeiro de junho o início de uma rotação anti-horária (figura 4.6). Aproximadamente no dia 15 de junho a direção retornou para SO. Apesar disto, o fundeio ainda estava sobre influência do vórtice, que é observado no registro como

uma intensificação da corrente. No dia 25 de junho intensidade e direção retornaram ao padrão médio. No Fundeio C o giro nos vetores de velocidade iniciam-se também no dia primeiro de junho (figura 4.6). Entretanto, o giro dos vetores é completo e no sentido horário. No dia 26 a direção da velocidade retorna para SO. Esta mesma linha de análise foi realizada para quase todos os vórtices, com exceção do vórtice 5 que não teve o sinal registrado nos ADCPs.

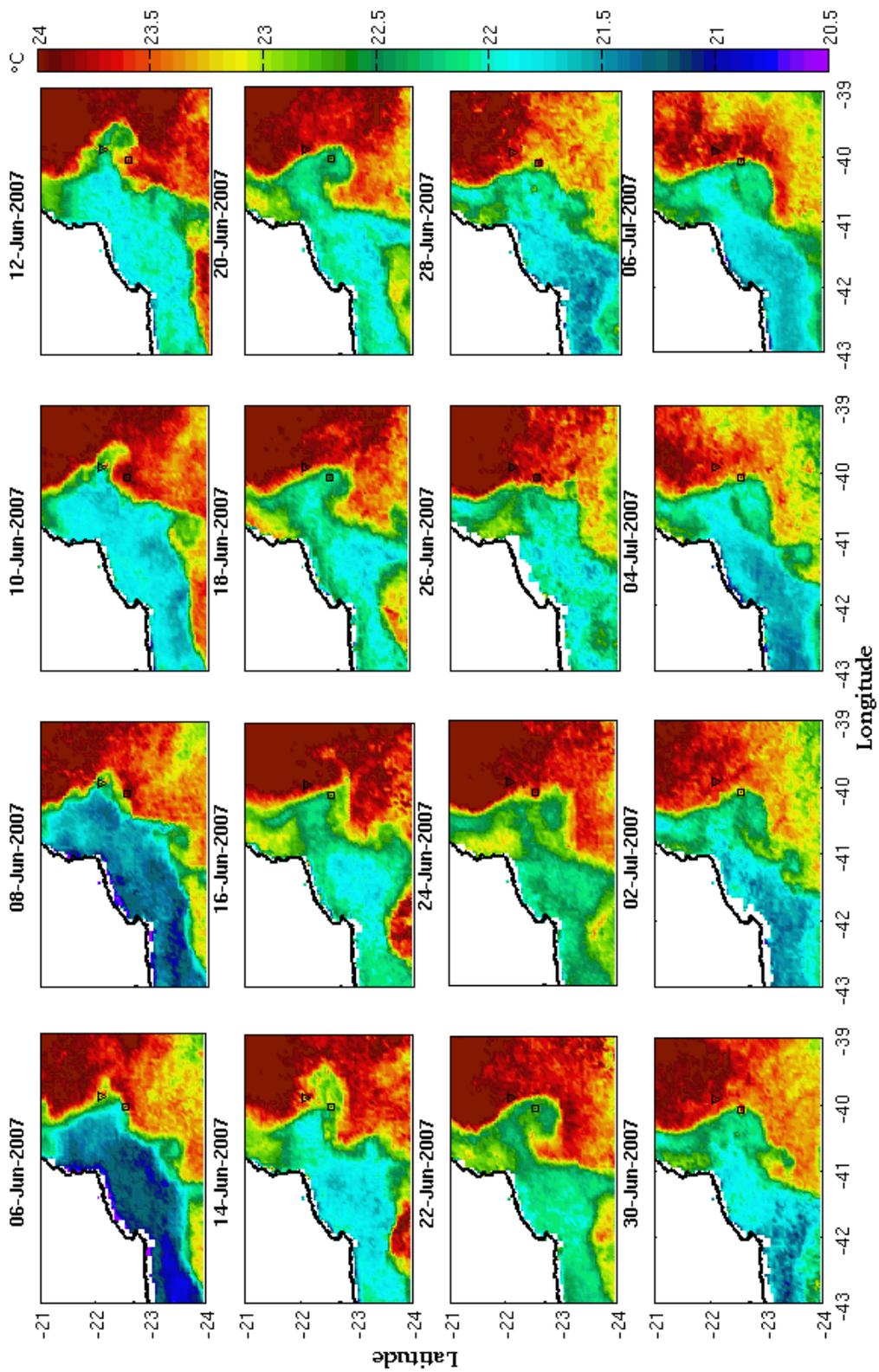


Figura 4.5: Sequência de imagens de TSM obtidas pelo satélite GOES 12 de 06/06/07 a 06/07/07 mostrando a evolução espacial do vórtice 7. O

triângulo representa a localização do fundo B e o quadrado o fundo C.

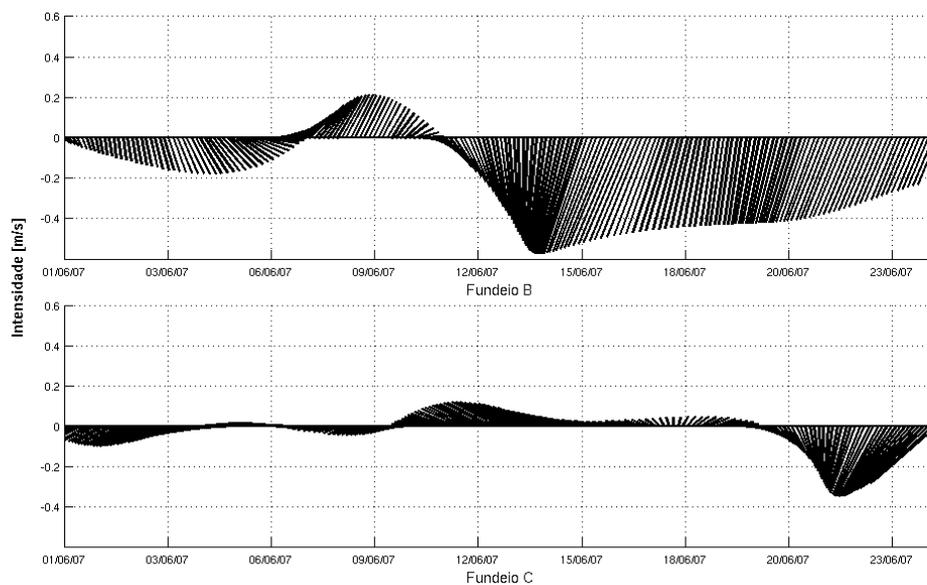


Figura 4.6: Gráfico de vetores de velocidade registrados em superfície pelo fundeio B (painel superior) e fundeio C (painel inferior) durante a formação e desenvolvimento do vórtice 7. Dados filtrados com filtro do tipo passa-baixa e frequência de corte de 0.2 ciclos por dia.

Da análise dos oito eventos registrados nos dados de ADCP observou-se que o conhecimento da posição dos fundeios em relação às feições analisadas foi fundamental para interpretar corretamente os dados. O que observou-se nos registros de dados coletados pelos ADCPs foi que mesmo que todos os vórtices tenham sido ciclônicos, foram observadas rotações nos vetores de direção dos dados de velocidade tanto no sentido horário quanto no sentido anti-horário, completas ou

não. Essa variação dependeu da posição inicial de formação do vórtice em relação a cada fundeio. Nos casos onde foi registrada a rotação no sentido anti-horário, observou-se nas imagens de TSM que a formação do vórtice iniciava-se a sul do fundeio considerado. Da mesma forma, quando o sentido de rotação era horário, o vórtice formava-se ao norte do fundeio. É importante dizer que não necessariamente um vórtice irá causar uma inversão total nos vetores de direção da corrente. As observações foram compiladas em um modelo conceitual simples de desenvolvimento dos vórtices ao largo do Cabo de São Tomé identificados durante o período de estudo, construído por LIMA (2008) e aprimorado no âmbito deste trabalho. O modelo resume a variabilidade dos sinais observados nos fundeios durante a formação dos vórtices.

O modelo é apresentado na figura 4.7. Inicialmente a CB é estável (a). Ela se instabiliza (b) e desenvolve o meandro (c) que ao se fechar migra para sul e forma um vórtice ciclônico. Como observado no vórtice 2 (figura 4.2a) este vórtice pode se separar da corrente (d1) ou ser reabsorvido (d2), como ocorreu no vórtice 7 (figura 4.5). A cada momento (a, b, c, d1 e d2) foram atribuídos vetores de direção da corrente para quatro fundeios hipotéticos representados na figura pelos pontos coloridos (verde, vermelho, azul escuro e azul claro). Os vetores de direção dos fundeios inverteram da seguinte forma: nos fundeios 1 e 2, localizados mais a norte, os vetores giraram no sentido anti-horário; enquanto que nos fundeios 3 e 4, localizados mais a sul, o giro foi horário.

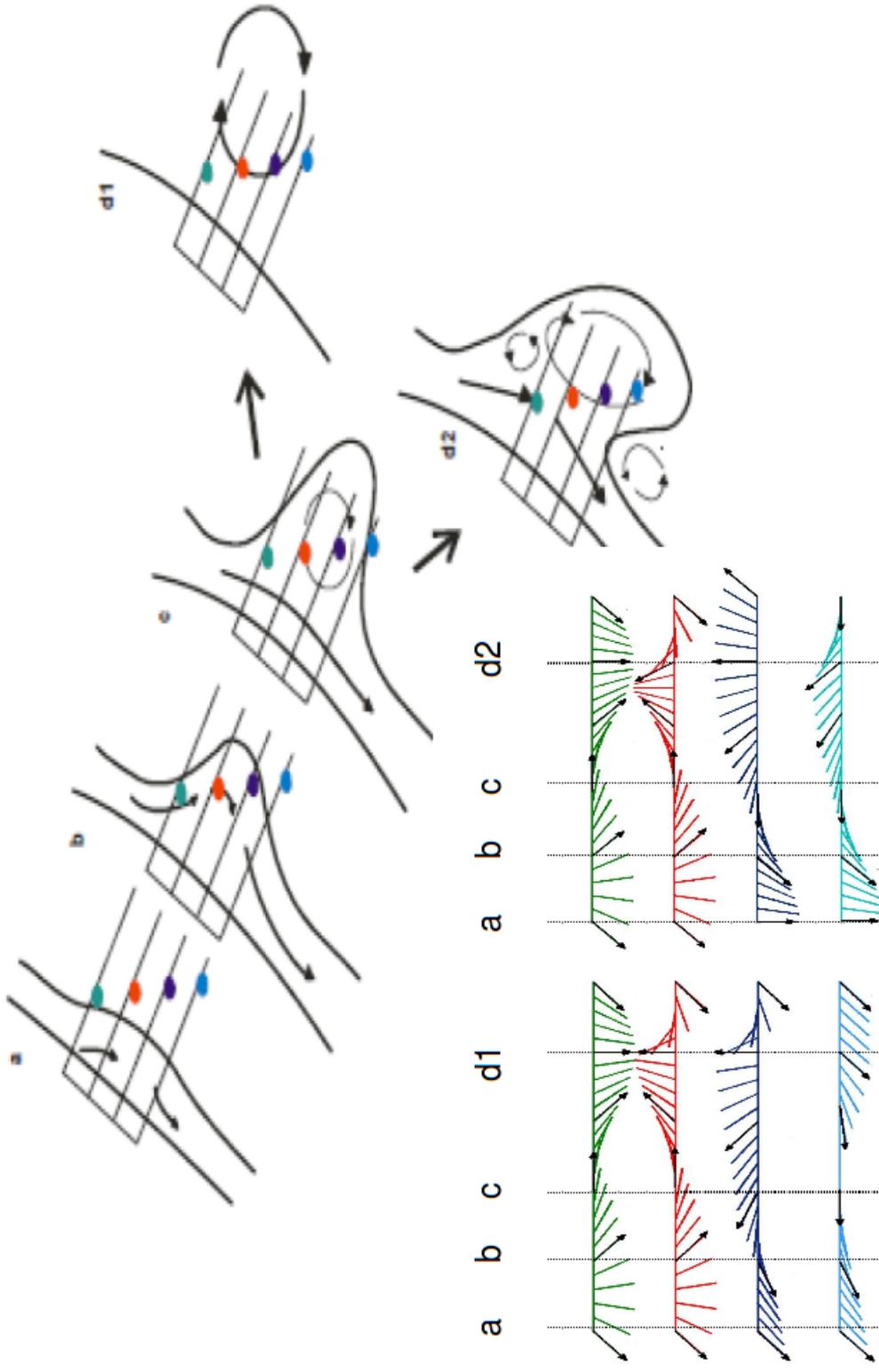


Figura 4.7: Modelo Conceitual de desenvolvimento dos vórtices do Cabo de São Tomé identificados nos dados de ADCP e imagens de TSM. Inicialmente a CB é estável (a). Ela se instabiliza (b) e desenvolve o meandro (c) que ao se fechar migra para sul e forma um vórtice ciclônico. O vórtice pode se separar da corrente (d1) ou ser reabsorvido (d2). Os vetores representam como os fundeios hipotéticos registrariam o evento.

4.2 Estrutura Vertical da Corrente

Na presente análise a estrutura vertical da corrente foi discutida a partir de dados de velocidade coletados em diversas camadas nos fundeios D, E e F e que foram decompostos em velocidade transversal e paralela a linha de costa. Todos os fundeios foram analisados porém, estes fundeios foram escolhidos por serem os mais profundos, amostrando a coluna d'água até aproximadamente 600 m de profundidade. Para cada fundeio foi selecionado um intervalo de tempo que abrangiu período de meandramento intenso e formação de vórtices e períodos de meandramento fraco (não ocorreu formação de vórtice) o que permitiu observar as mudanças na estrutura vertical da corrente geradas pelos processos de mesoescala. Estes períodos são apresentados na tabela 4.3 como períodos de instabilidade (ocorre vórtice) e estabilidade (não ocorre vórtice) respectivamente. Durante os períodos de estabilidade foi possível observar a profundidade de separação entre a CB e a CCI. As componentes zonal e meridional de velocidade foram rotacionadas e passaram a ser denominadas respectivamente como velocidades paralela e transversal a linha de costa. A velocidade transversal da corrente foi usada para discutir a perturbação da corrente (meandramento e formação do vórtice) pois ela se manifesta principalmente na transversal.

Tabela 4.3: Períodos de estabilidade e instabilidade selecionados para análise da estrutura vertical da corrente em cada fundeio.

Fundeio	Período de instabilidade	Período de estabilidade
D	7-jul-2007 a 1-set-2007	1-out-2007 a 1-dec-2007
E	2-mai-2007 a 1-set-2007	1-out-2007 a 1-dec-2007
F	31-dec-2006 a 2-mar-2007	1-nov-2007 a 5-jan-2008

4.2.1 Sistema CB-CCI

A caracterização da estrutura vertical do sistema CB-CCI foi realizada a partir da análise da velocidade da corrente coletada durante os períodos de estabilidade (tabela 4.3). Primeiramente foi discutido o comportamento do sistema no Fundeio F (figura 4.8), onde foram analisados dados de velocidade da corrente coletados durante os meses de novembro a janeiro de 2008. Neste período foi identificado através das imagens de TSM que localmente a CB exibiu pouco meandramento.

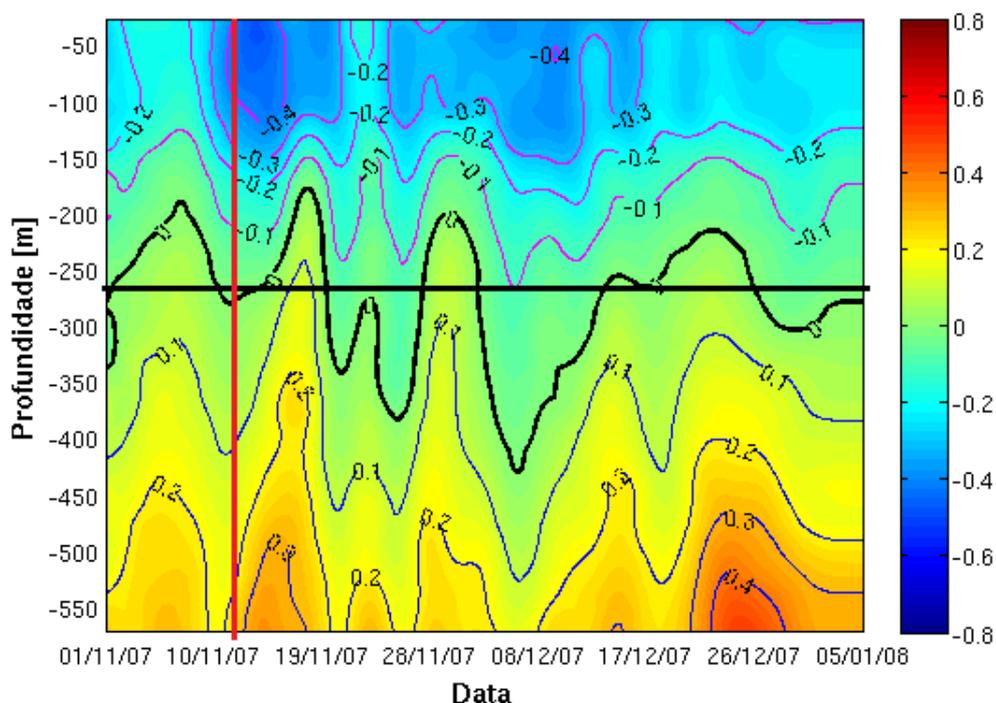


Figura 4.8: Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundeio F. A linha em vermelho destaca a variação de velocidade de -0.4 m/s (negativo, para sul) a 0.3 m/s (positivo, para norte) da superfície ao fundo. A linha preta destaca a profundidade média de separação do sistema CB-CCI entre 260 m.

As séries temporais da velocidade paralela a costa para diferentes profundidades

no fundeio F (figura 4.8) mostraram um intenso fluxo para sul na porção superior da coluna e um intenso fluxo para norte em sua porção inferior (Figura 4.8), indicando a presença do sistema CB-CCI e uma profundidade de separação média entre as duas correntes de 260 m aproximadamente. Observou-se portanto ainda um forte cisalhamento vertical, indicando a existência de uma componente baroclínica de primeiro modo predominante. Em aproximadamente 50 m de profundidade a intensidade da componente paralela a linha de costa chegou a atingir $-0,4$ m/s e em aproximadamente 550 m, $0,4$ m/s.

Nos três fundeios (D, E, e F) foram calculados o perfil médio das duas componentes de velocidade (paralela e transversal a linha de costa) (figura 4.9 e figura 4.12) durante os períodos de estabilidade da corrente selecionados na tabela 4.3 e calculado o desvio médio quadrático da corrente durante eventos de meandramento e formação de vórtices, a fim de se analisar a variabilidade gerada na corrente média por estes. No fundeio F (figura 4.9a) o desvio quadrático médio chega a $\pm 0,3$ m/s em superfície e $\pm 0,1$ m/s em 600 metros de profundidade. O desvio quadrático médio da velocidade transversal também exibiu valores na mesma ordem de magnitude que o fluxo médio, variando de $\pm 0,1$ m/s a $\pm 0,2$ m/s da superfície ao fundo, respectivamente.

Os fundeios D e E exibiram características bastante similares ao observado no fundeio F. Nesses fundeios o sistema CB-CCI também esteve presente, entretanto, as profundidades de separação entre as correntes foram diferentes. No fundeio D, mais próximo a costa, a profundidade de separação média das correntes foi de 255 m (figura 4.10), enquanto que no fundeio E, mais afastado da costa, a profundidade de separação média foi de 385 m (figura 4.10), sugerindo que o fundeio E está localizado

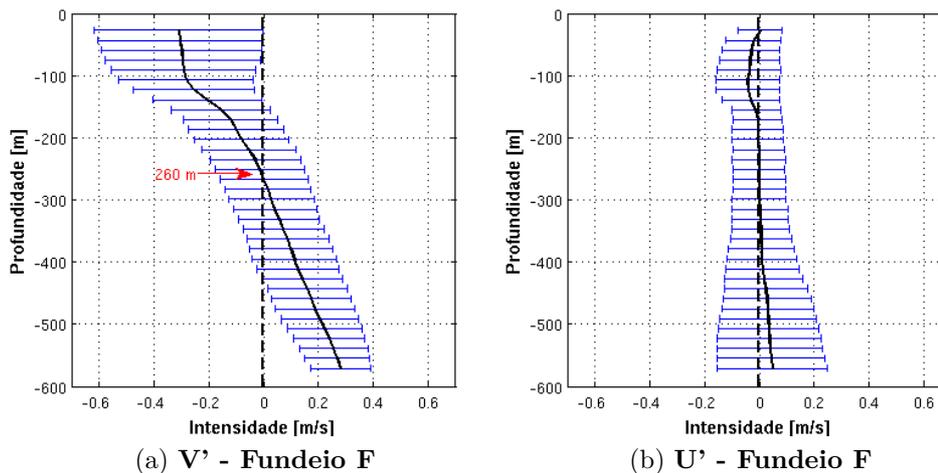


Figura 4.9: Média e desvio médio quadrático das componentes paralela (4.9a) e transversal (4.9b) da velocidade no fundeio F. Note a separação entre a CB e a CCI em 260m.

mais próximo do núcleo da CB do que o fundeio D. Outro indicativo do núcleo da CB está mais próximo ao fundeio E foi a existência de maiores velocidades médias entre 57m e 102m (segunda e quinta camada de medição do ADCP) de profundidade. Enquanto que no fundeio D, para estas profundidades, o perfil de velocidade média variou de -0,37 m/s a -0,34 m/s (figura 4.12a), em E as velocidades variaram de -0.46 m/s a -0.5 m/s respectivamente (figura 4.12c). Foi observado também um forte cisalhamento vertical de velocidades paralela a linha de costa nos fundeios D e E. Velocidades no fundeio D variaram verticalmente de -0,7 m/s a 0,3 m/s da superfície ao fundo e no fundeio E variaram de -0,6 m/s a 0,2 m/s. A variação vertical de velocidade nestes fundeios foi maior que no fundeio F.

Nos três fundeios analisados observou-se que o desvio médio quadrático teve a mesma ordem de magnitude da velocidade da corrente média, significando que vórtices geraram uma variabilidade significativa na velocidade da corrente em toda coluna d'água até 600 m de profundidade.

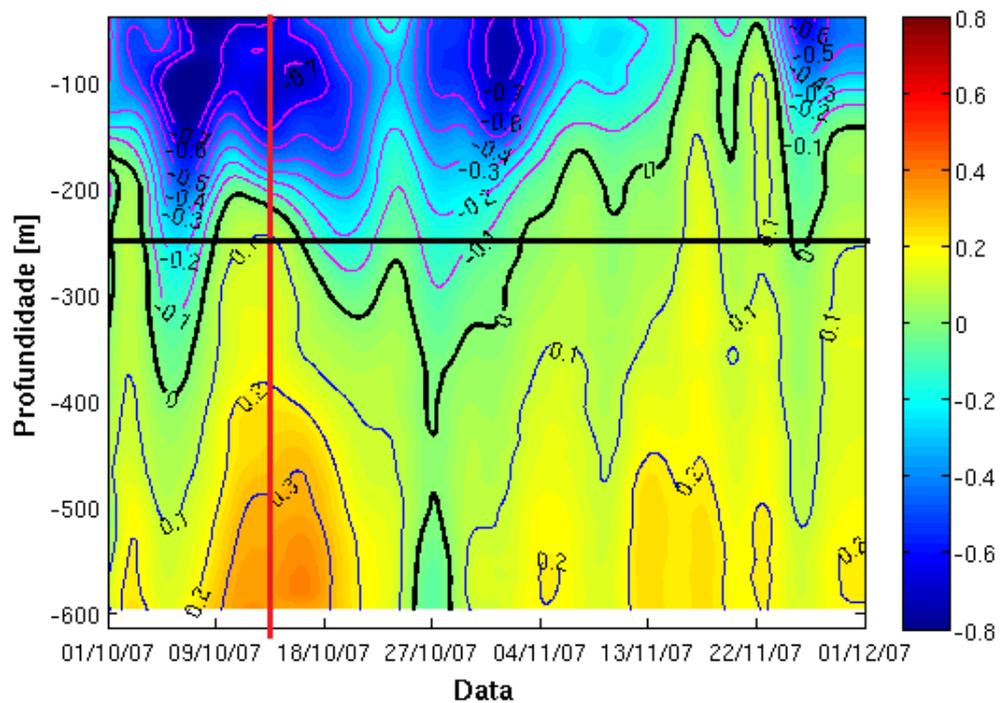


Figura 4.10: Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundo D. A linha vermelha destaca a variação de velocidade de -0.7 m/s a 0.3 m/s da superfície ao fundo. A linha preta destaca a profundidade média de separação do sistema CB-CCI de 255 m.

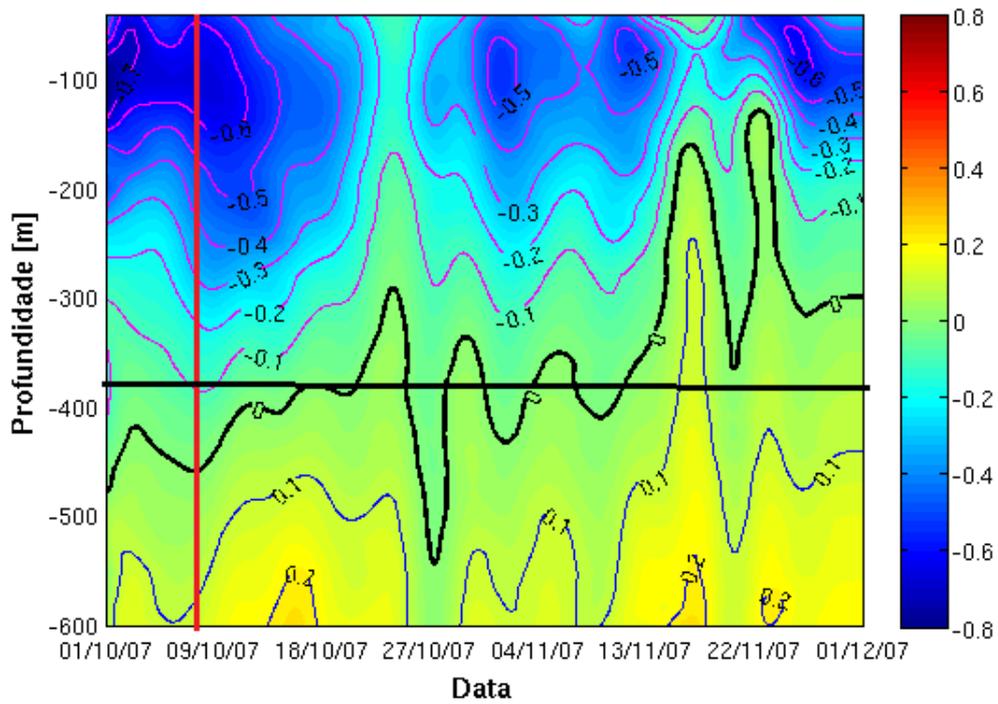
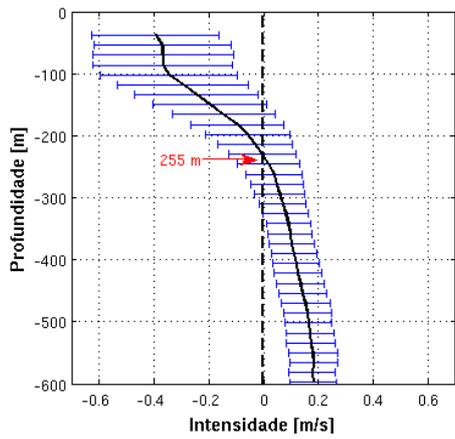
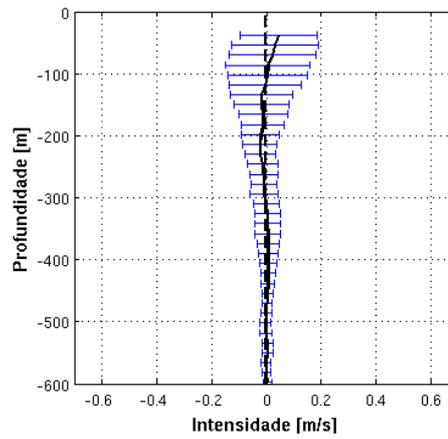


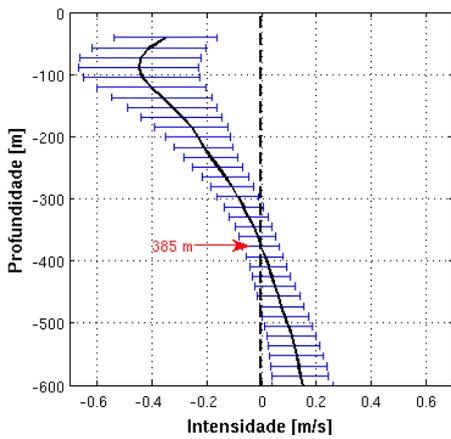
Figura 4.11: Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundeio E. A linha vermelha destaca a variação de velocidade de -0.6 m/s a 0.2 m/s da superfície ao fundo. A linha preta destaca a profundidade média de separação do sistema CB-CCI de 385 m.



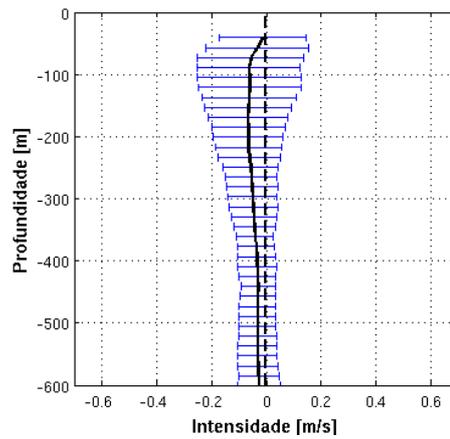
(a) V' - Fundeio D



(b) U' - Fundeio D



(c) V' - Fundeio E



(d) U' - Fundeio E

Figura 4.12: Média e desvio médio quadrático das componentes paralela (4.12a, 4.12c) e transversal (4.12b, 4.12d) da velocidade nos fundeios D e E. Note a separação entre a

CB e a CCI em 255 m no fundeio D e 385 m no fundeio E.

4.2.2 A estrutura vertical da corrente durante a formação de vórtices

O comportamento da corrente também foi analisado durante períodos de desenvolvimento de vórtices (períodos de instabilidade), sendo discutido a partir de dados de velocidade coletados em diversas camadas nos fundeios E e F. Os resultados no fundeio D foram bastante similares ao fundeio E, para o mesmo período de amostragem e por isso não foi discutido. Para analisar a variabilidade gerada pela formação de vórtices na estrutura vertical do sistema CB-CCI novamente calculou-se as velocidades paralela e transversal a linha de costa durante períodos de desenvolvimento dessas feições (tabela 4.3).

No fundeio E, a evolução temporal do perfil de velocidade transversal à linha de costa (figura 4.13), (representativa da perturbação da corrente) mostrou o sinal de um forte meandro e dois vórtices ao longo de cinco meses (maio a setembro de 2007). O meandro ocorreu durante o mês de maio, o primeiro vórtice (vórtice 7, figura 4.5) foi registrado de 01/06/07 a 07/07/07 e o segundo (vórtice 8) de 01/08/07 a 08/09/07, sendo todas as feições identificadas nas imagens de satélite. Durante a ocorrência destes eventos, observou-se no perfil momentos em que toda a coluna d'água apresentava o mesmo comportamento, ou seja, o mesmo sinal, alternando em períodos de velocidade positiva e outros negativa.

A figura 4.14 mostra a velocidade paralela a linha de costa durante o mesmo período. A perturbação gerou mudanças na estrutura vertical da corrente, podendo causar a inversão da direção da corrente ou não. Durante o desenvolvimento do vórtice 7 observou-se mudanças de direção ao longo de toda coluna amostrada,

entretanto, o mesmo não foi observado durante o desenvolvimento do vórtice 8. O período de 28/07/07 a 01/09/07 mostrou um forte cisalhamento vertical da velocidade marcado pela inversão da corrente entre 200 m e 400 m de profundidade. Notou-se portanto que a perturbação esteve presente ao longo de toda a coluna d'água amostrada porém, observando a velocidade paralela à linha de costa (4.14), percebe-se que ainda que se tenha uma perturbação ao longo de toda coluna d'água nem sempre é observada uma inversão da velocidade. Os resultados indicaram que a perturbação possui uma importante componente barotrópica.

O mesmo comportamento foi identificado no fundeio F durante a ocorrência do vórtice 6 (31/12/06 a 02/03/07). A existência de uma componente barotrópica da perturbação ficou ainda mais evidente (figura 4.15), além da coluna d'água exibir o mesmo comportamento no período de 26/01/07 e 02/03/07, ocorreu uma variação de intensidade da velocidade transversal a linha de costa menor que as observadas no fundeio E. Identificou-se também o mesmo vórtice gerando e não gerando inversão de direção ao longo de toda coluna d'água (figura 4.16). Os perfis de velocidade paralela e transversal a linha de costa exibiu o mesmo comportamento dos fundeio E e F, indicando a existência de uma componente barotrópica importante da perturbação.

Para investigar a componente barotrópica da perturbação da corrente foi aplicado a análise de EOF nos dados de velocidade transversal a linha de costa da corrente nos fundeio D, E e F.

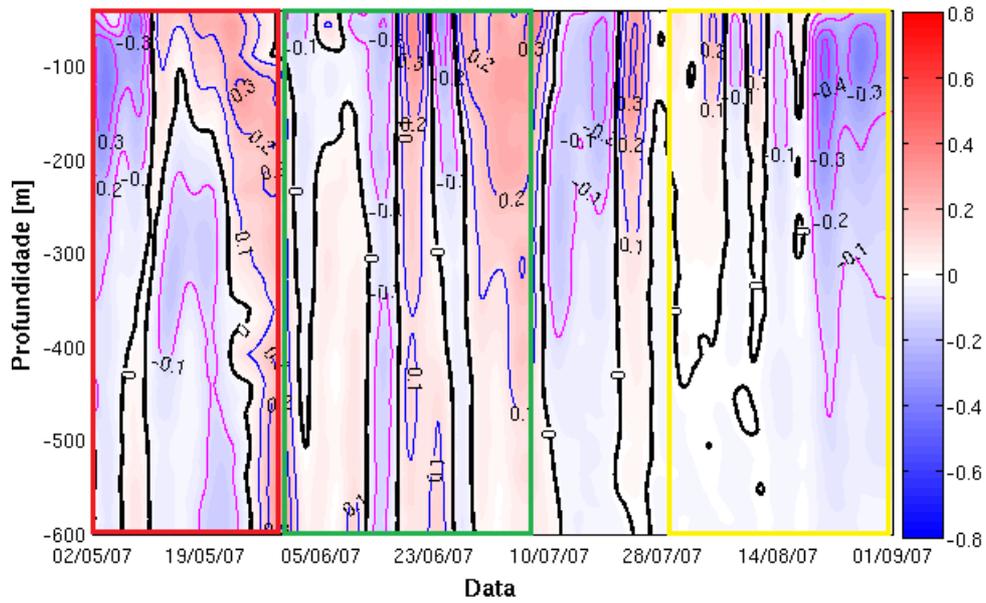


Figura 4.13: Evolução temporal do perfil de velocidade transversal à linha de costa no fundeio E. Vermelho: formação do meandro; verde: vórtice 7 e amarelo: vórtice 8.

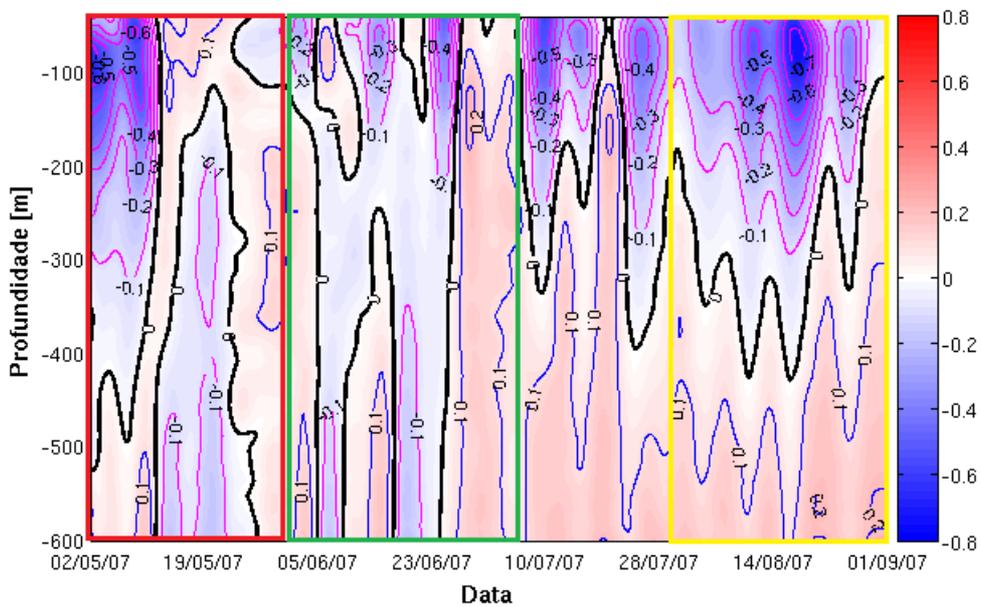


Figura 4.14: Evolução temporal do perfil de velocidade paralela à linha de costa no fundeio E. Vermelho: formação do meandro; verde: vórtice 7 e amarelo: vórtice 8.

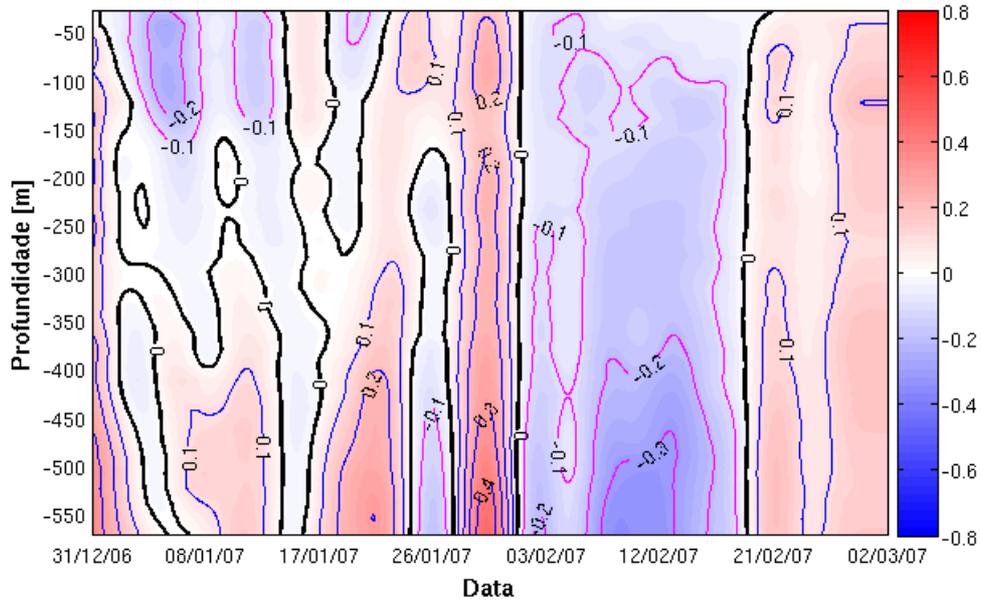


Figura 4.15: Evolução temporal do perfil de velocidade transversal a linha de costa no fundeio F durante período de formação do vórtice 6.

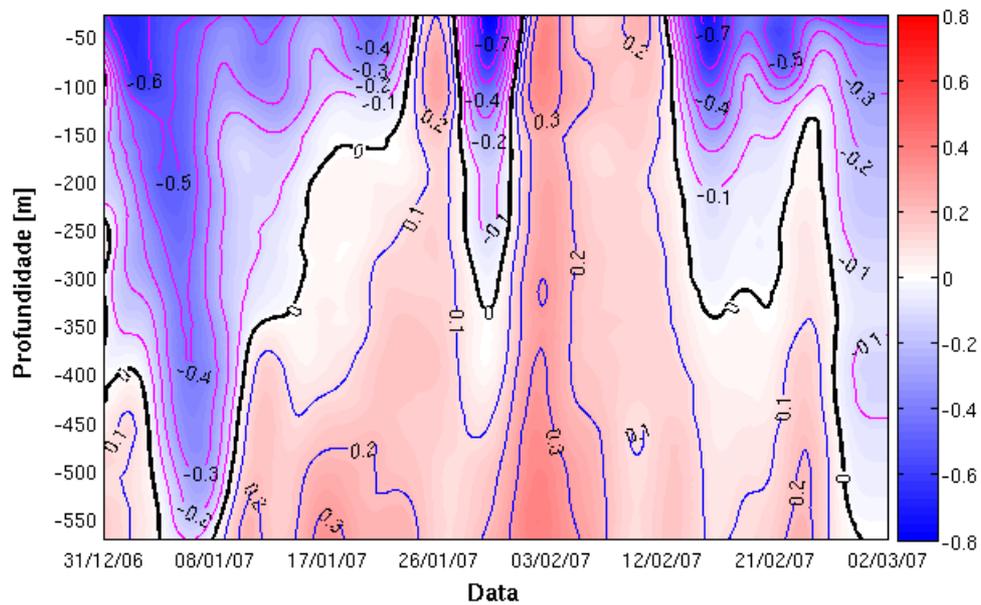


Figura 4.16: Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa no fundeio F durante período de formação do vórtice 6.

Funções Ortogonais Empíricas

Com o objetivo de investigar o comportamento da perturbação da corrente durante eventos de formação de vórtices (tabela 4.3), foram feitas para todos os fundeios, análises de EOF convencional da velocidade transversal a linha de costa. As análises foram discutidas a partir dos fundeios D, E e F. Foram calculados os modos estatísticos da EOF. Os dois primeiros modos (**M1** e **M2**) explicaram mais de 90% da variância total nos três fundeios (figura 4.4).

Tabela 4.4: Porcentagem dos dois primeiros modos estatísticos da EOF nos fundeios D, E e F.

Fundείο	Primeiro modo [%]	Segundo modo [%]
D	85,24	9,58
E	78,57	16,12
F	86,43	10,92

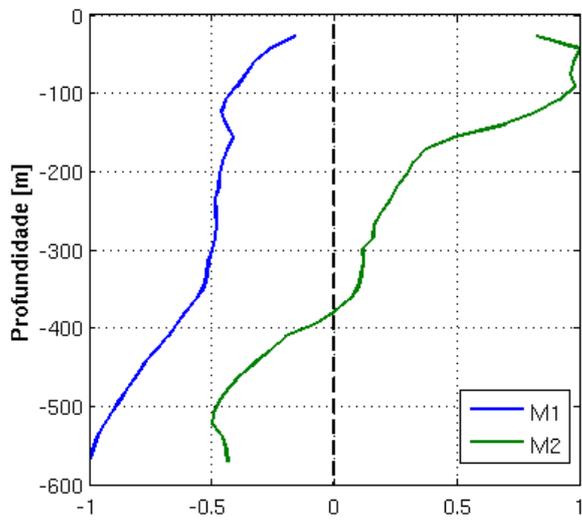
No fundείο F **M1** explicou 86,43% da variância total dos dados. Observou-se que o sinal deste modo estatístico não mudou ao longo da coluna d'água (figura 4.17a), o que indicou uma associação de **M1** a uma componente barotrópica importante da perturbação. Sua amplitude, em módulo, aumentou com o aumento da profundidade. **M2** explicou uma pequena porção da variância total (10,92%). Na (figura 4.17a) observou-se a inversão de sinal de **M2** ao longo da coluna d'água, representando possivelmente este modo da EOF o primeiro modo baroclínico. No fundείο E, **M1** e **M2** explicaram respectivamente 78,57% e 16,12% da variância total dos dados. M1 apresentou uma contribuição menor, quando comparado aos resultados encontrados no fundείο F, porém permaneceu predominante. M1 e M2 no fundείο D (figura 4.17c) foram similares ao observado no fundείο F, explicando

respectivamente 85,24% e 9,58% da variância. Nos fundeios E e D observou-se que a amplitude de M1 sofreu um decaimento com o aumento da profundidade.

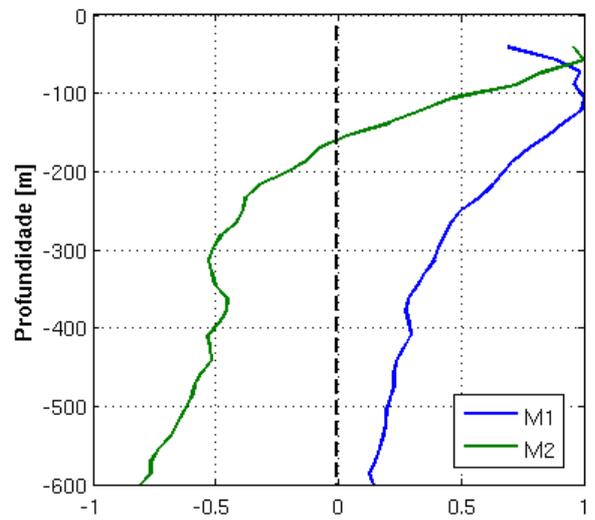
SILVEIRA *et al.* (2008) aplicaram a análise de EOF a uma série temporal de velocidade da corrente coletados ao longo de 152 dias, por um fundeio localizado próximo ao Cabo de São Tomé, que amostrou a coluna d'água até 1000 m de profundidade. Os resultados mostraram que o primeiro modo estatístico da EOF explicou uma variância de 82%. Após aplicar uma análise de modos dinâmicos nos modos da EOF, o autores afirmaram que a componente barotrópica é mais importante na estrutura do meandro do que no fluxo médio da corrente. Mesmo que se tenha analisado a coluna d'água até 600m de profundidade, os resultados encontrados no presente trabalho corroboraram os resultados encontrados por SILVEIRA *et al.* (2008). Nesse, a presença da componente barotrópica da perturbação foi observada em 3 diferentes pontos de amostragem da corrente, durante dois diferentes e longos períodos de intensa atividade de mesoescala, nos quais além da observação do sinal da perturbação associada a um meandro foram observados também o sinal da perturbação de outros três vórtices (vórtices 6, 7 e 8).

A série temporal de amplitudes dos modos **M1** e **M2** para os dados coletados nos fundeios D, E e F foram mostradas na figura 4.18. Como seria naturalmente esperado, não foi observada periodicidade associada as séries temporais analisadas, pelo período de dados analisados corresponder apenas a períodos de intensa atividade de mesoescala. Observou-se que numa escala de tempo de dias tanto M1 quanto M2 mudaram de sinal ao longo do tempo, representando este comportamento a mudança de direção da velocidade da corrente em toda a colona d'água em

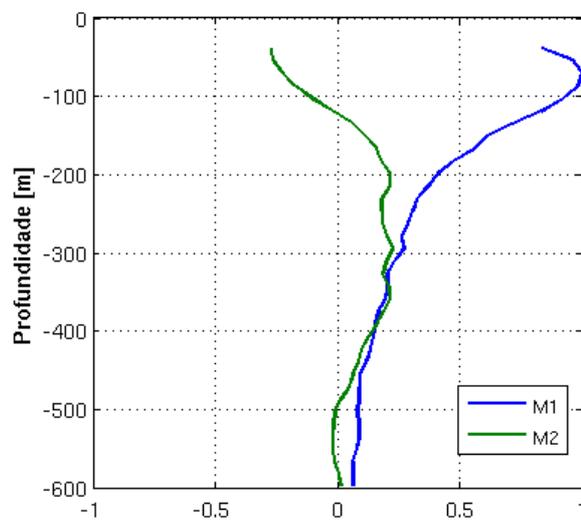
consequência do desenvolvimento do meandro e da formação dos três vórtices.



(a) Fundeio **F**

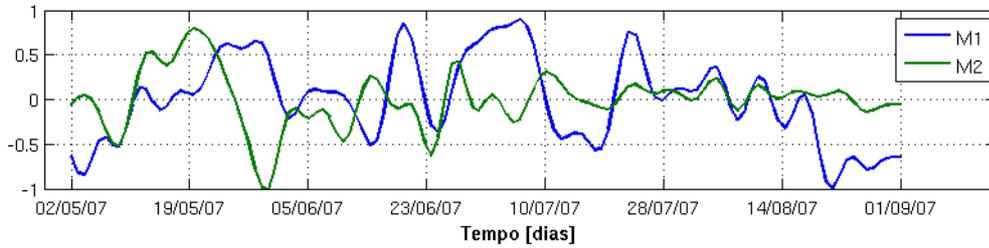


(b) Fundeio **E**

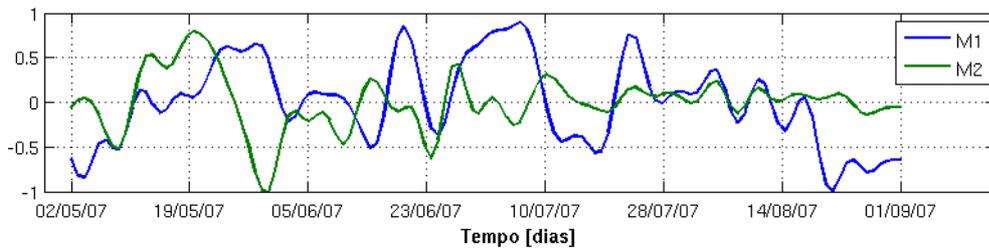


(c) Fundeio **D**

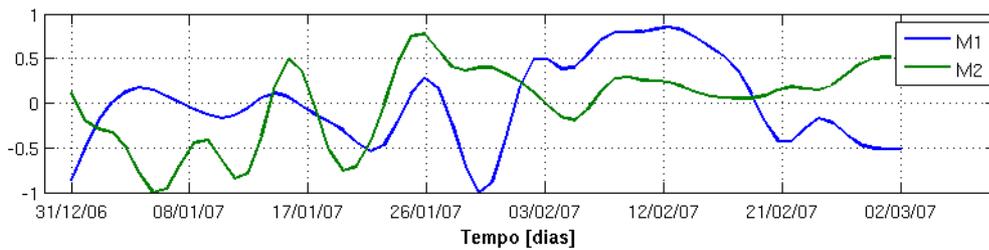
Figura 4.17: Estrutura dos dois primeiros modos estatísticos (M1 e M2) da EOF convencional da velocidade transversal a linha de costa nos fundeios F (figura 4.17a), E (figura 4.17b) e D (figura 4.17c).



(a) Fundeio **D**



(b) Fundeio **E**



(c) Fundeio **F**

Figura 4.18: Série temporal de amplitude dos dois primeiros modos estatísticos (M1 e M2) da EOF convencional da velocidade transversal a linha de costa nos fundeio **E** (figura 4.18b) e **F** (figura 4.18c) normalizada pela amplitude máxima dos modos.

Pela análise de EOF complexa foi possível observar a direção de maior variância dos dados (figura 4.2.2). A análise aplicada aos dados de velocidade coletados no fundeio F. Este fundeio foi escolhido porque representou a série temporal mais longa com medições até 600 m de profundidade, com período de amostragem de 31/12/06 a 05/01/08. Os 3 primeiros modos explicaram mais de 90% da variância total dos dados, **M1** explicou 56,84%, **M2** 28,77% e **M3** (terceiro modo estatístico) 7,32%. Observou-se que apesar de ainda dominante, M1 foi menor, aumentando a importância da variância explicada por M2, associada a componente baroclínica de primeiro modo.

Os modos indicaram uma maior variância na direção transversal à linha de costa tanto em **M1** (leste) quanto em **M2** (oeste em superfície e leste em profundidade intermediária). A amplitude de **M1** decaiu com o aumento da profundidade, o que não foi observado em **M2**. Analisando a série temporal de amplitude dos dois primeiros modos, observou-se em M1 (figura 4.20a) e M2 (figura 4.20b) um aumento nas amplitudes associado a formação do vórtice 7. Não foi encontrada periodicidade associada a série temporal analisada.

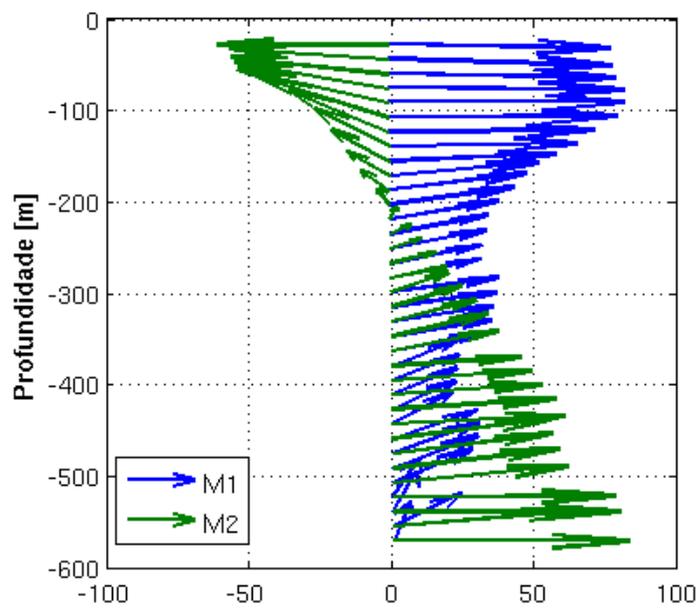
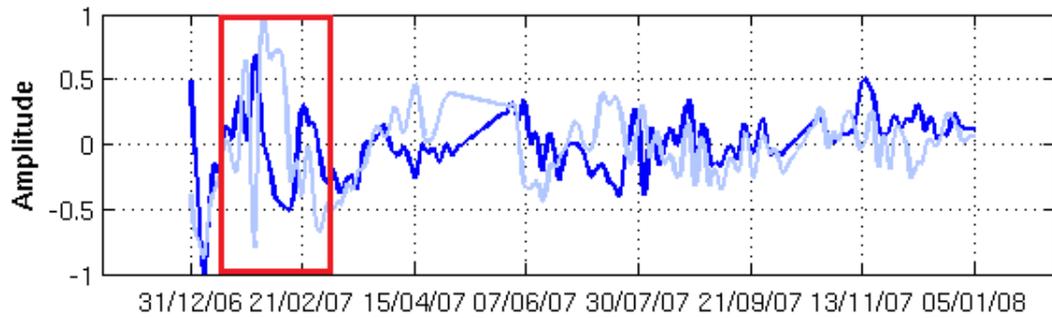
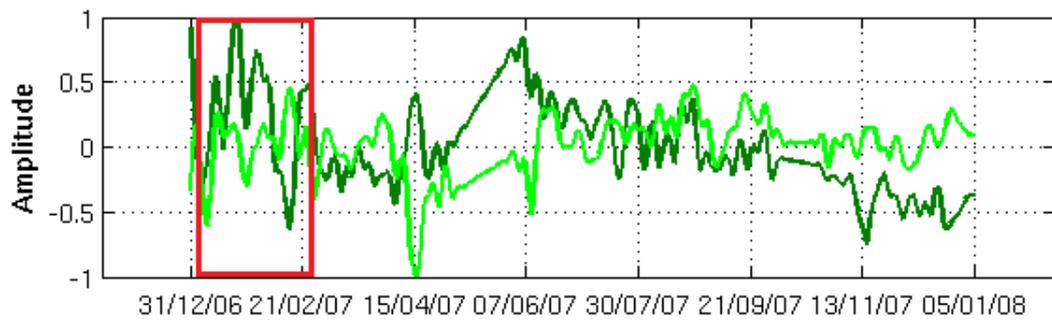


Figura 4.19: Estrutura dos dois primeiros modos estatísticos (M1 e M2) da EOF

complexa da velocidade no fundeio F.



(a) M1



(b) M2

Figura 4.20: Série temporal de amplitude dos dois primeiros modos estatísticos da EOF complexa da velocidade no fundo F normalizada pela amplitude máxima dos modos. A figura 4.20a mostra as componentes meridional (azul escuro) e zonal (azul claro) de M1. A figura 4.20b mostra as componentes meridional (verde escuro) e zonal (verde claro) de M2. o retângulo representa o período de ocorrência do vórtice 6.

4.2.3 Modelagem Numérica

Os resultados da simulação numérica aninhada de alta resolução foram analisados a fim de se investigar espacialmente e temporalmente a formação e evolução dos vórtices ao largo do Cabo de São Tomé assim como sua interação com a CCI. Desta forma, pretendeu-se complementar as análises descritas nos itens anteriores, respondendo à questões como: qual a razão da presença de uma componente barotrópica significativa da perturbação associada ao meandramento da corrente e formação de vórtices; se os vórtices seriam mais profundos se estendendo além da porção superior da CCI? Onde se iniciaria a formação do vórtice, CB ou CCI? E, como ele se desenvolveria no sistema CB-CCI?

A evolução temporal do perfil de velocidade da corrente simulada até 600 metros de profundidade foi bem representada quando comparada com os dados de velocidade coletados pelos ADCPs. Foram extraídas séries temporais de velocidade e suas componentes foram rotacionadas em velocidade paralela e transversal a linha de costa em pontos próximos aos fundeios utilizados D e E (figura 4.21). A análise das séries temporais simuladas mostraram a presença de um cisalhamento vertical de velocidade durante períodos de estabilidade do sistema (figuras 4.22a e 4.22b), indicando portanto a existência de uma componente baroclínica importante, como nos dados de velocidade (figuras 4.10 e 4.11).

O sinal da formação de vórtices também foi bem representado. Comparando as evoluções temporais do perfil vertical da velocidade simulada (figuras 4.23a e 4.23b) com aquelas registradas pelos ADCPs (figuras 4.13 e 4.14), ambos durante períodos de atividade de mesoescala intensa, observou-se momentos em que toda a coluna d'água apresentou o mesmo comportamento indicando a existência de uma

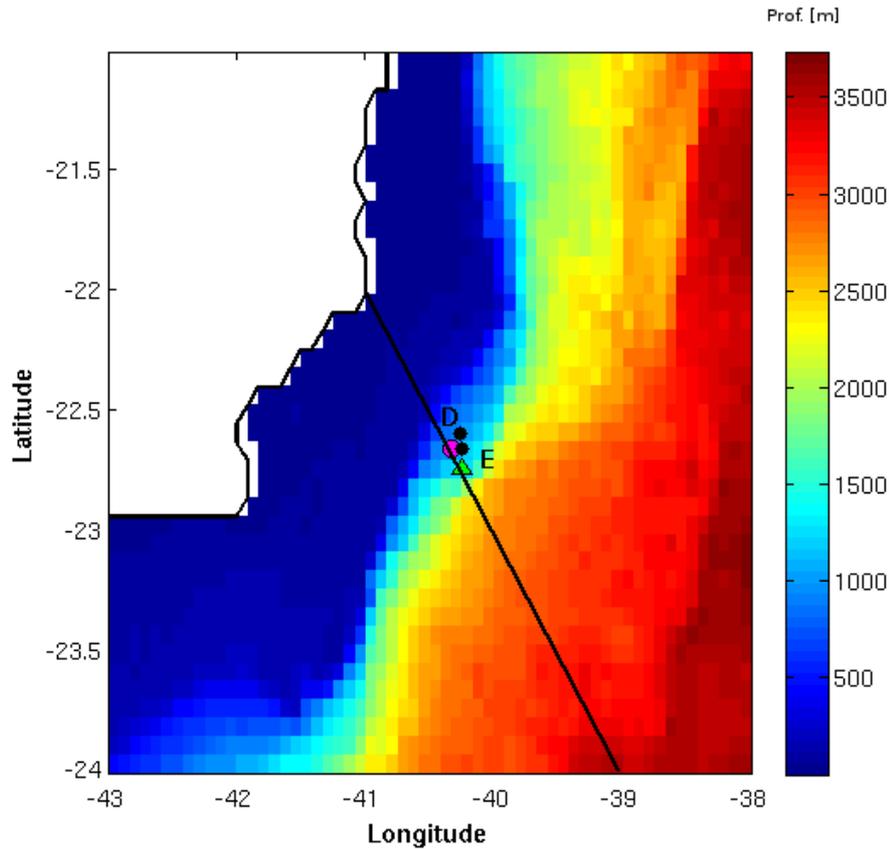
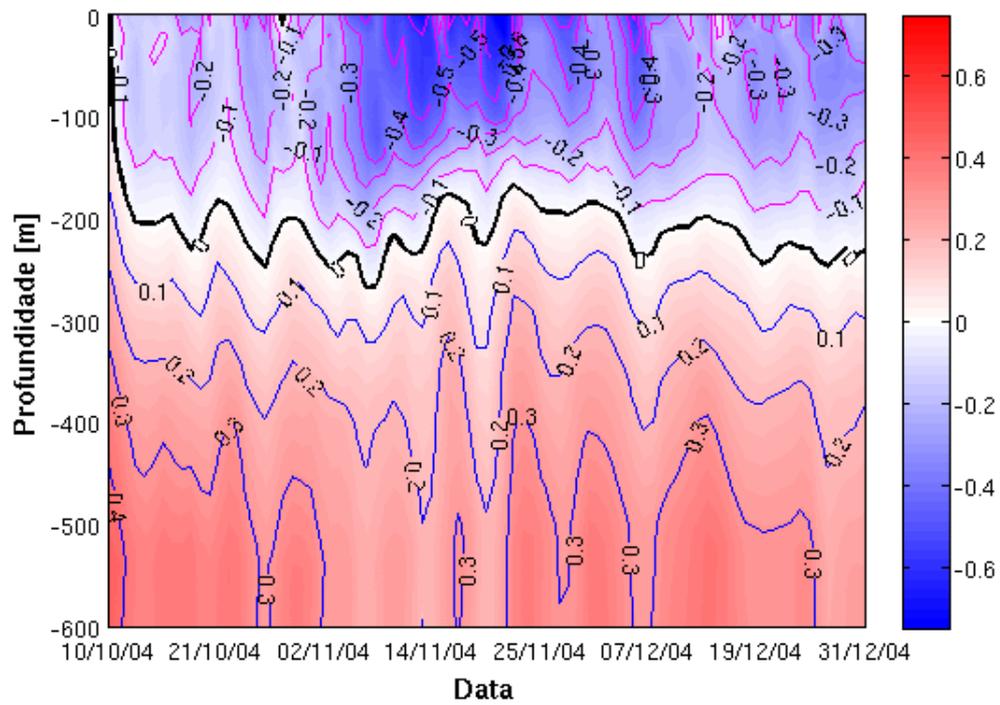


Figura 4.21: Batimetria e localização da seção inclinada extraída do modelo HYCOM.

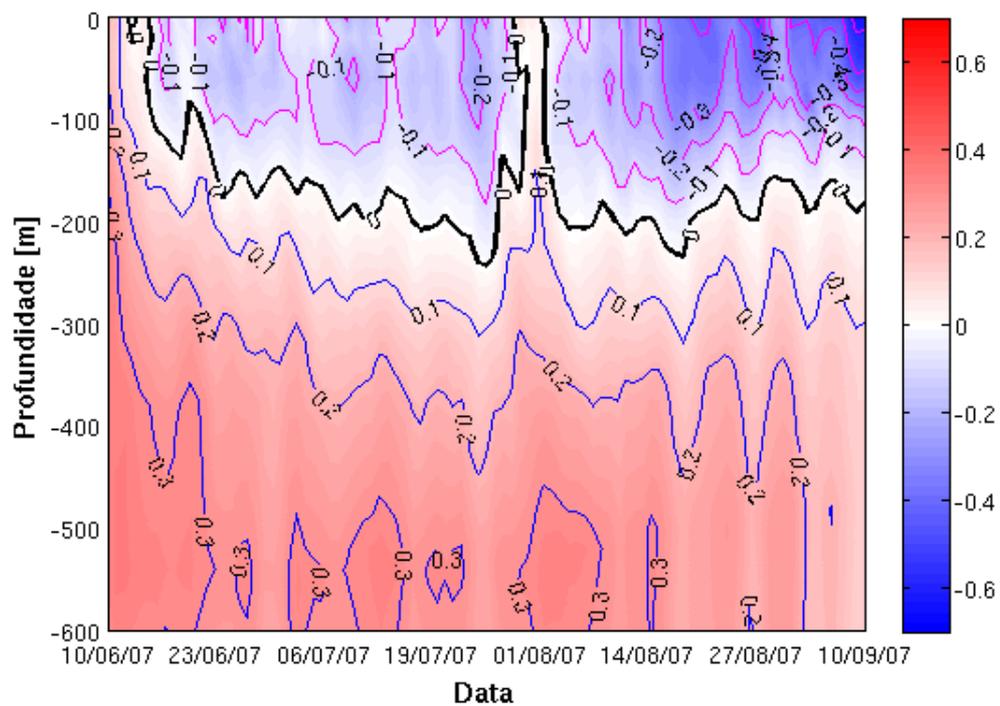
O círculo mangenta ($40^{\circ}15'W$ de longitude e $22^{\circ}45'$ de latitude) e a triângulo verde ($40^{\circ}33'W$ de longitude e $22^{\circ}40'$ de latitude) representam os pontos de onde foram extraídas as séries temporais. A figura também mostrou a proximidade dos fundeios de ADCP D e E em relação aos pontos escolhidos no modelo.

componente barotrópica da perturbação associada ao vórtice.

Foi feita uma seção inclinada de velocidade paralela a linha de costa (figura 4.21) ao longo dos 5 anos de simulação e campos de velocidade da corrente representativos do núcleo da CB e CCI, correspondendo respectivamente a uma profundidade média de 50 m e 550 m. A estrutura vertical de velocidade média (figura 4.24) mostrou a presença do sistema CB-CCI, com profundidade de separação entre as duas correntes localizando-se em 200 m de profundidade. A intensidade média em ambas correntes,

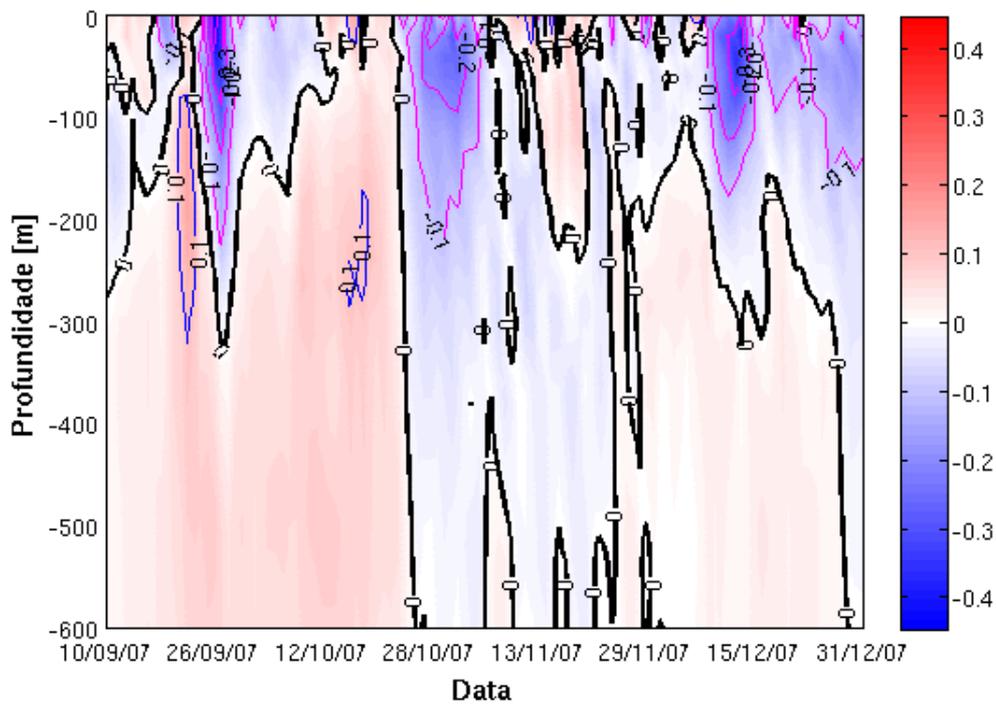


(a) ponto: $40^{\circ}15'W$ de longitude e $22^{\circ}45'$ de latitude no período de 10/10/04 a 31/12/04.

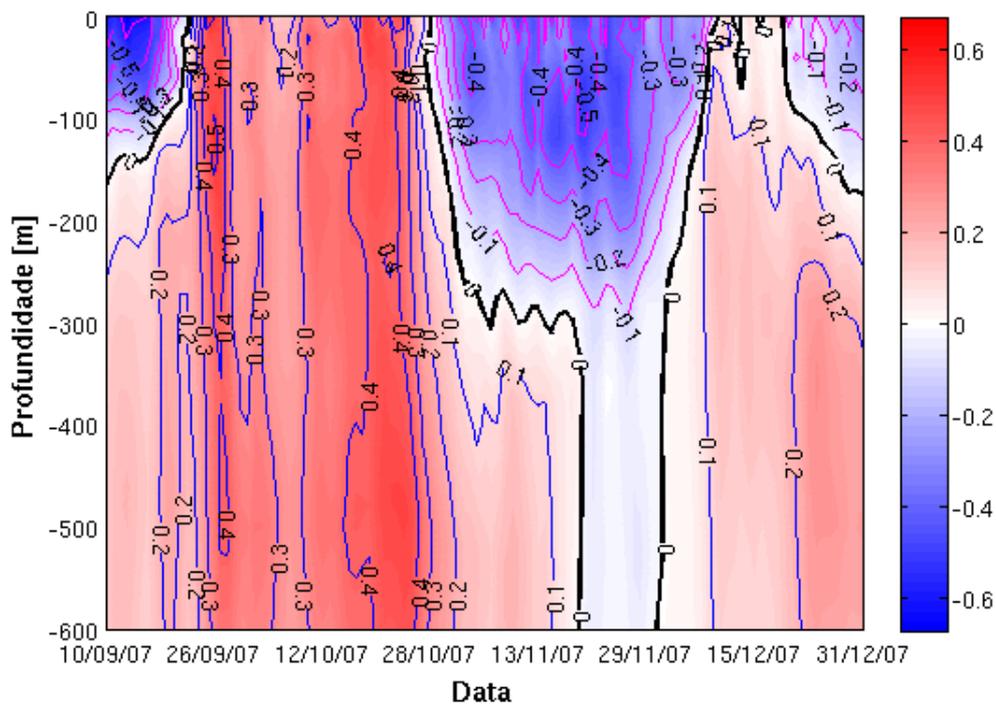


(b) Ponto: $40^{\circ}33'W$ de longitude e $22^{\circ}40'$ de latitude no período de 10/06/07 a 10/09/07.

Figura 4.22: Evolução temporal do perfil de velocidade paralela a linha de costa extraídos nos pontos 4.22a e 4.22b durante dois períodos de estabilidade do sistema.



(a) Velocidade paralela a linha de costa.



(b) Velocidade transversal a linha de costa.

Figura 4.23: Evolução temporal do perfil de velocidade transversal (4.23a) e paralela (4.23b) a linha de costa extraídos no ponto de $40^{\circ}15'W$ de longitude e $22^{\circ}45'$ de latitude (figura 4.21) do domínio do modelo durante dois períodos de formação de vórtice.

com médias máximas na CB de 0,3m/s e 0.35m/s na CCI, são próximas as observada nos dados (velocidade média máxima de 0,46 m/s na CB e 0,3m/s na CCI). O núcleo da CB foi observado centrado em 50 m. O núcleo da CCI se estende até aproximadamente 1600m e as maiores velocidades médias apresentam-se entre 600 e 800m de profundidade. Contudo, devido a formação e desenvolvimento de vórtices na região, observou-se períodos onde todo o sistema fluiu na mesma direção.

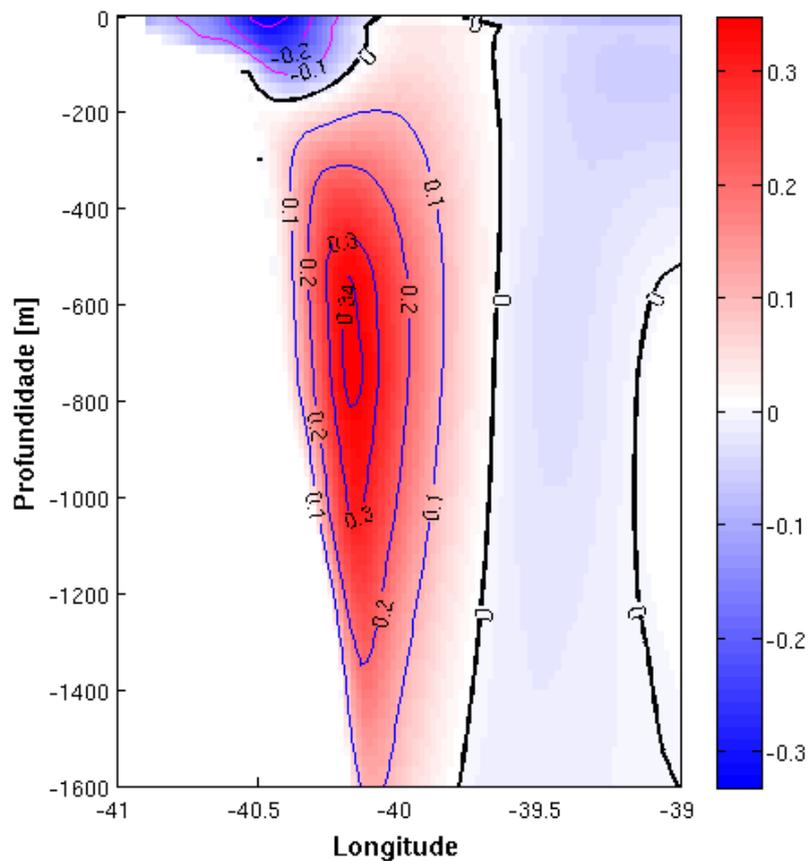


Figura 4.24: Seção inclinada de velocidade paralela a linha de costa média calculada para 5 anos de simulação (2004 a 2005) gerados a partir do modelo HYCOM.

Nos 5 anos de simulação numérica aninhada de alta resolução.(2004 a 2008) foram observados que ao largo do Cabo de São Tomé formaram-se nove vórtices ciclônicos,

no qual sete se desenvolveram ao longo de todo sistema CB-CCI enquanto que dois se restringiram a CB. O tempo de formação e desenvolvimento dos vórtices variou entre 27 e 67 dias. Campos de velocidade mostraram vórtices que depois de desenvolvidos foram reabsorvidos pela CB ou emitidos para o interior do Giro Subtropical, como observado nas imagens de TSM. Entretanto, observou-se também vórtices emitidos migrando para norte. Os nove vórtices identificados nos resultados foram analisados, entretanto dois foram escolhidos para se discutir a evolução espacial tridimensional durante a formação e desenvolvimento no sistema CB-CCI. Estes apresentaram pontualmente a estrutura vertical ao longo do tempo mais similar à observada nos dados de ADCP durante a formação de vórtice. Um dos vórtices escolhidos ocorreu de 03/08/04 a 11/11/04 (quando saiu do domínio)(vórtice I). O outro (vórtice II) ocorreu de 23/09/07 a 02/11/07. Os vórtices simulados também tiveram similaridade em relação aos dados de TSM obtidos pelo satélite GOES 12 como pode-se observar nas figuras 4.25 e 4.26.

As análises mostraram que a formação das estruturas vorticais iniciaram-se na CB e, entre 3 a 5 (figura 4.27 dia 3 - ago - 2004) dias de desenvolvimento observou-se uma interação com a CCI marcada por uma recirculação em profundidades intermediárias. Os vórtices cresceram e se desenvolveram também na CCI em torno de 25 dias (figura 4.27 dia 27 - ago - 2004 e figura 4.28 dia 17 - out - 2007) após sua formação. Para estudo da estrutura vertical usou-se a isotaca de 0,1m/s como critério para definir os limites espaciais dos vórtices. Em relação a estrutura vertical dos vórtices observou-se nas seções inclinadas de velocidade paralela a linha de costa das figuras 4.27 e 4.28 que eram assimétricos e se estenderam até a profundidade de 1600 m, ou seja, interagindo com toda a CCI. CB e CCI, durante o desenvolvimento

das estruturas vorticais, mostraram-se fora de fase. Anteriormente a formação dos vórtices, a CB forma um meandro que cresce em direção ao giro Subtropical. Quando a CCI meandra, o meandro cresce em direção a plataforma continental. O vórtice desenvolvido no sistema, apresenta desta forma circulação ciclônica em ambas as correntes, dando origem a uma região na qual toda a coluna d'água apresenta o mesmo comportamento, ou seja, fluindo numa mesma direção, explicando a presença da componente barotrópica, discutida nos resultados, da perturbação associada a variabilidade gerada pelo vórtice.

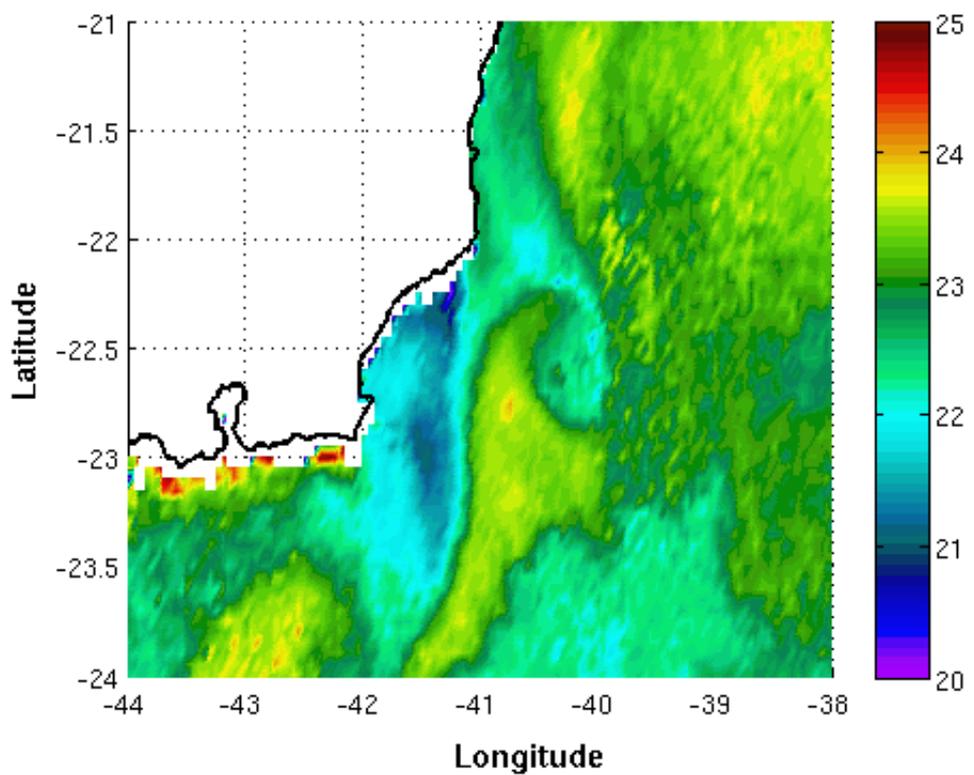
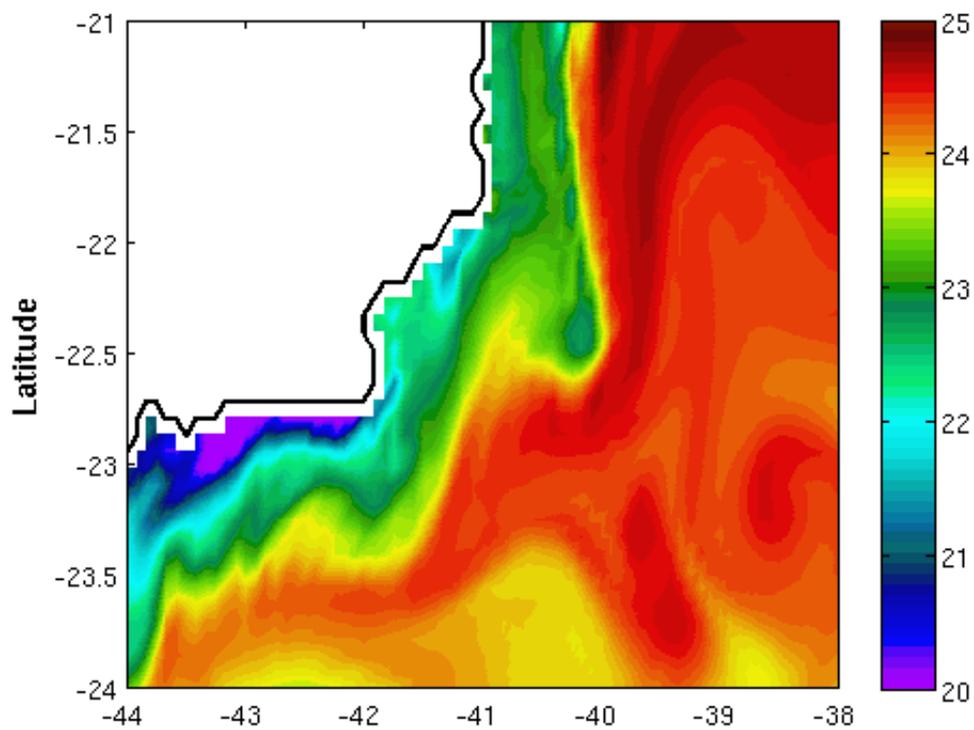


Figura 4.25: Comparação entre resultados de TSM do modelo e dados de TSM do GOES 12. Em cima: TSM simulada no dia 5 de agosto de 2004 mostrando o vórtice I. Em baixo: TSM GOES 12 no dia 29 de julho de 2006 mostrando o vórtice 4.

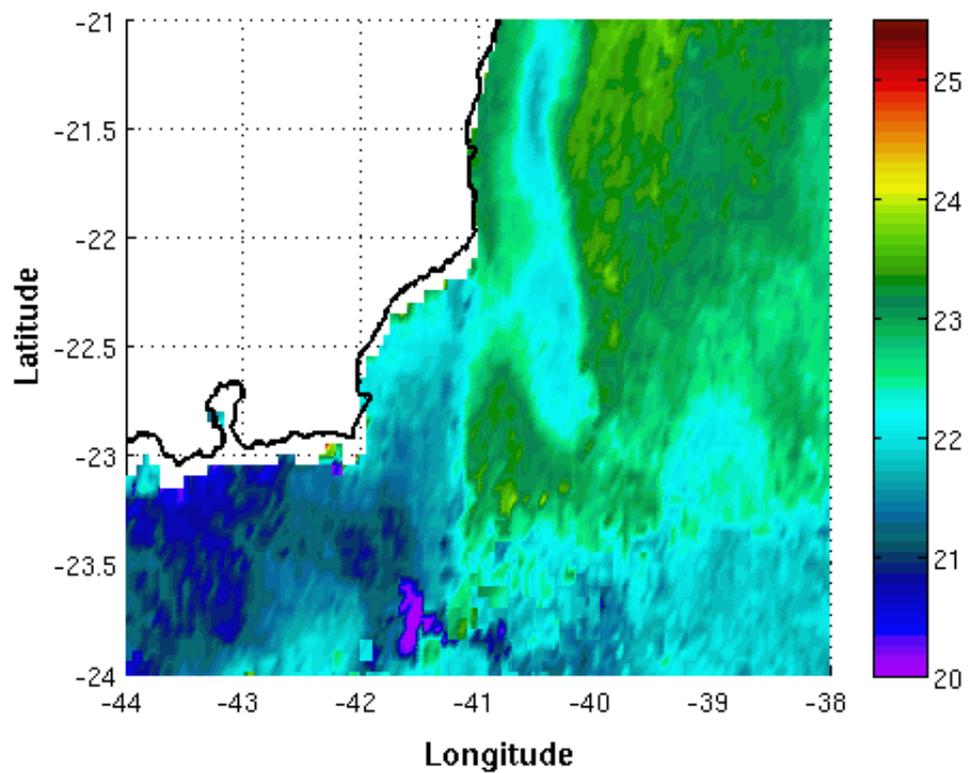
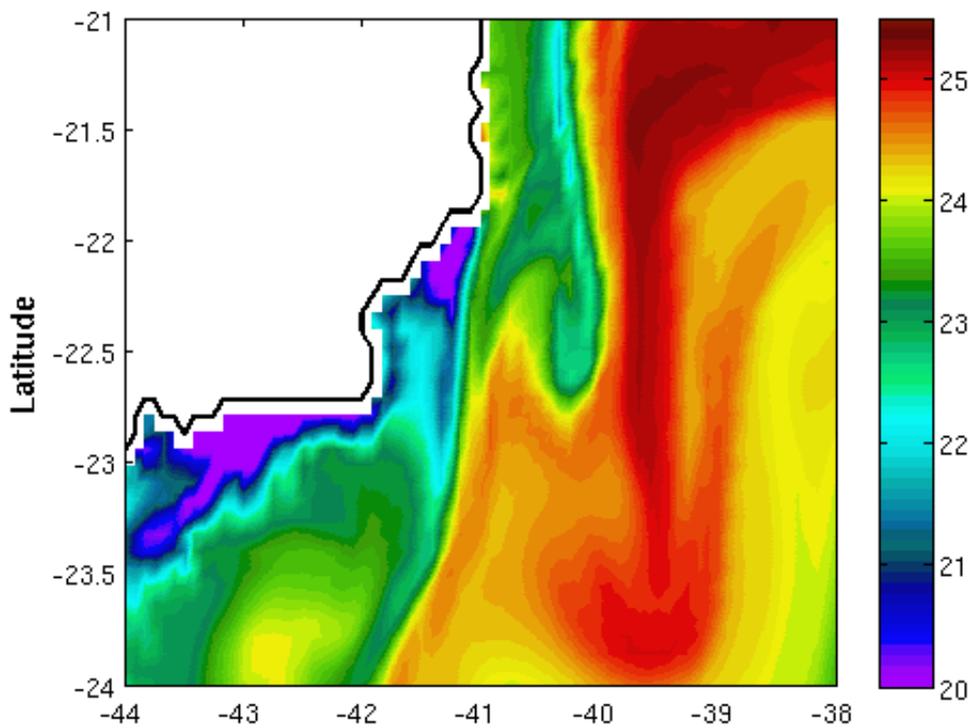


Figura 4.26: Comparação entre resultados de TSM do modelo e dados de TSM do GOES 12. Em cima: TSM simulada no dia 23 de setembro de 2007 mostrando o vórtice I. Em baixo: TSM GOES 12 no dia 3 de setembro de 2007 mostrando o vórtice 8.

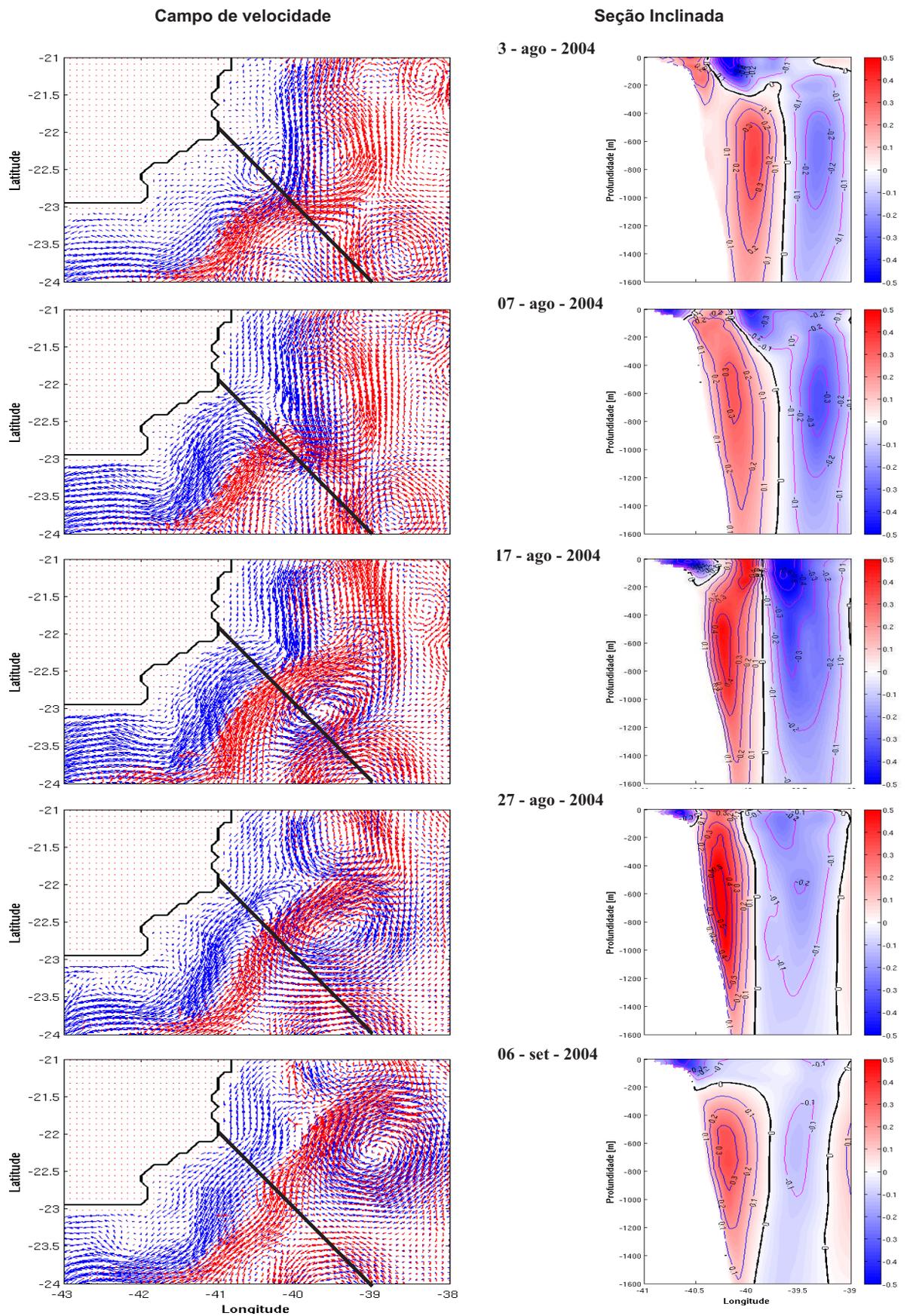


Figura 4.27: Evolução temporal e espacial do vórtice formado no sistema CB-CCI em agosto de 2004. À esquerda: campos de velocidade da corrente - CB (azul) e CCI (vermelho). À direita: seção inclinada de velocidade zonal da corrente.

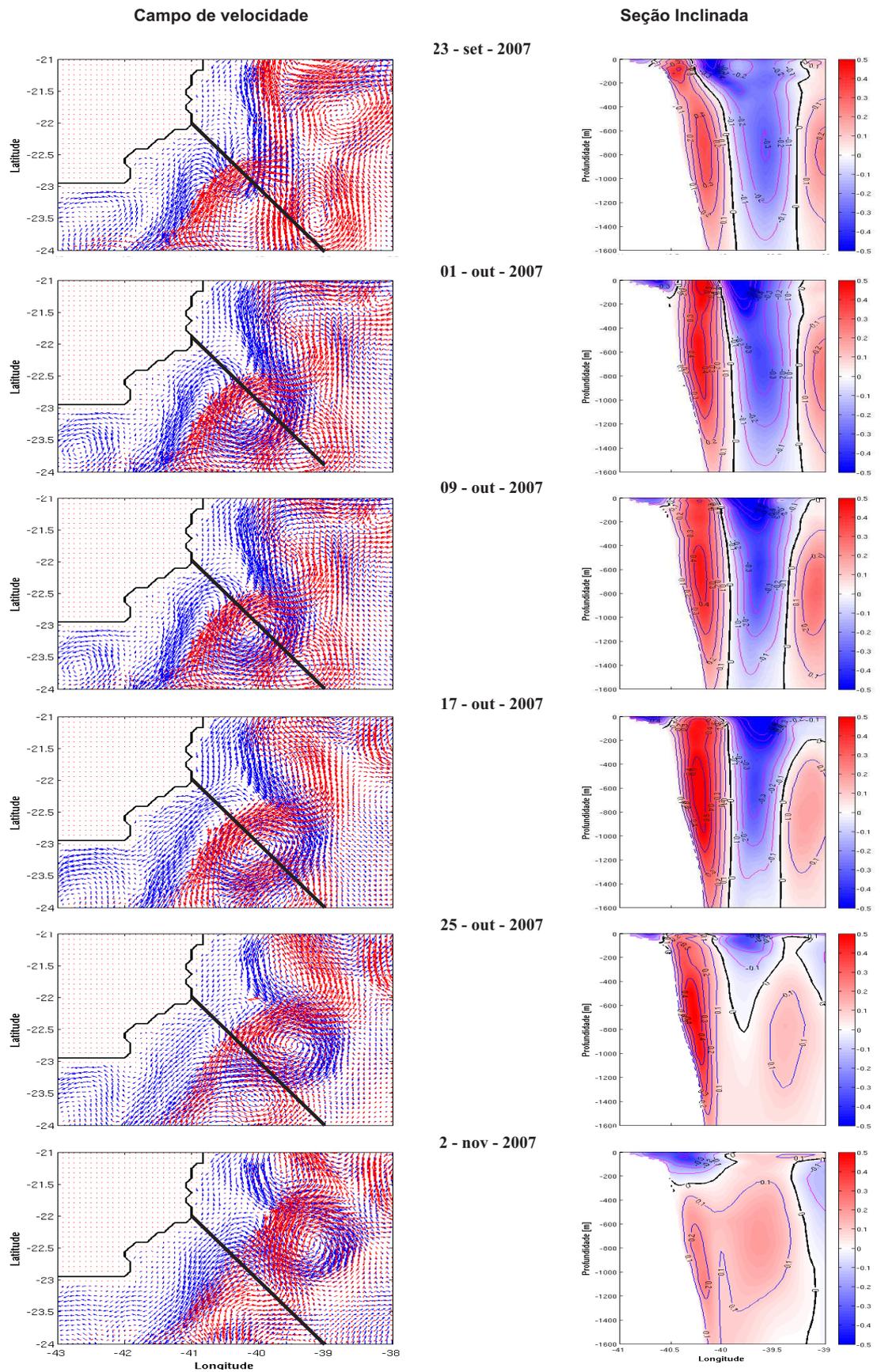


Figura 4.28: Evolução temporal e espacial do vórtice formado no sistema CB-CCI em outubro de 2007. À esquerda: campos de velocidade da corrente - CB (azul) e CCI (vermelho). À direita: seção inclinada de velocidade zonal da corrente.

Uma visão esquemática da interpretação dos resultados da simulação analisada nas figuras 4.27 e 4.28 foi apresentada na figura 4.29. No esquema foi representado em azul o eixo principal de fluxo da CB na profundidade de 50 m. A linha vermelha rachurada representou o eixo principal da CCI na profundidade de 550 m. Inicialmente o sistema CB-CCI estável (figura 4.29.a) se instabiliza e forma o meandro na CB (figura 4.29.b). CB e CCI não estão em fase. Forma-se o vórtice na CB (figura 4.29.c) que ao se desenvolver interage com a CCI (figura 4.29.d). O vórtice se desenvolve no sistema (figura 4.29.e) e depois é emitido (figura 4.29.f).

A análise espacial e temporal dos vórtices simulados auxiliaram no entendimento dos sinais observados nos dados de velocidade da corrente durante os períodos de desenvolvimento de meandros e formação de vórtices. Os resultados sugeriram que os vórtices do Cabo de São Tomé são gerados na CB e interagem com a porção superior da CCI, como observado nos dados, possivelmente estando presente ao longo de todo sistema. A componente barotrópica da perturbação associada aos vórtices formados no sistema seria consequência do comportamento da CB e da CCI que estariam fora de fase durante desenvolvimento destas estruturas, dando origem a uma região na qual toda a coluna d'água apresenta o mesmo comportamento.

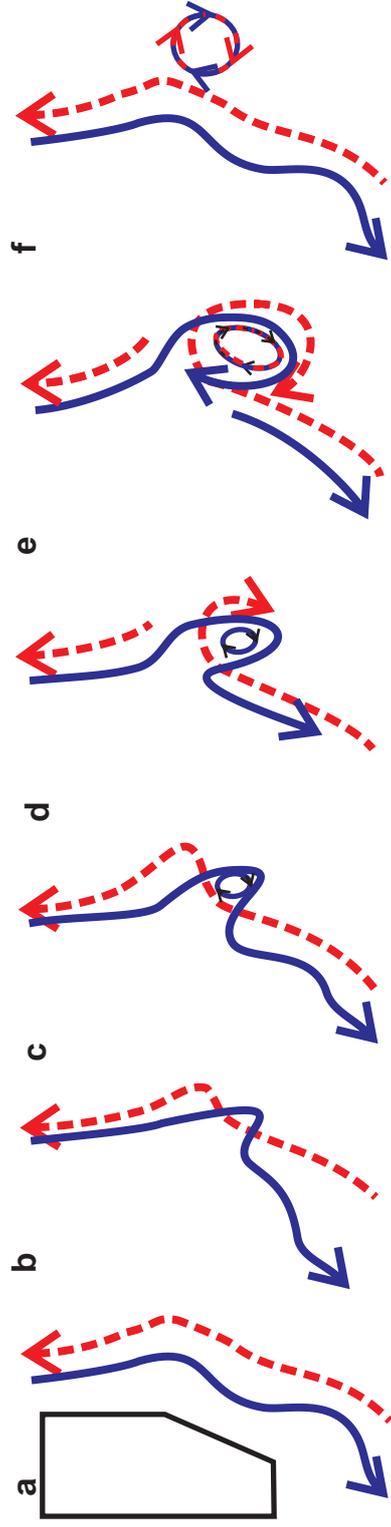


Figura 4.29: Visão esquemática da interpretação dos resultados da simulação analisada nas figuras 4.27 e 4.28 . A linha azul representa a CB fluindo em superfície e a linha vermelha rachurada representa a CCI fluindo em profundidades intermediárias. **a)** Sistema CB-CCI estável. **b)** O sistema se instabiliza e forma o meandro na CB. **c)** CB e CCI não estão em fase. **c)** Forma-se o vórtice na CB. **d)** O vórtice formado na CB interage com a CCI. **e1)** O vórtice se desenvolve no sistema e **f)** é emitido

Capítulo 5

Síntese e Conclusões

A estrutura vertical do sistema CB-CCI ao largo do Cabo de São Tomé em períodos de estabilidade do sistema e em períodos de formação e desenvolvimento de vórtices foi investigada a partir da análise conjunta de 2 anos (2006 e 2007) de dados de velocidade da corrente coletados no talude continental da Bacia de Campos, 2 anos (2006 e 2007) de imagens diárias de TSM obtidas pelo satélite GOES e 5 anos de resultados de simulação numérica geradas a partir do modelo HYCOM.

As análises foram divididas em três etapas. Primeiramente observou-se o comportamento da corrente em superfície, analisando imagens de TSM e dados de velocidade da corrente a fim de se determinar os períodos de intensa atividade de mesoescala, e identificar e quantificar os vórtices formados no período de dados analisados. Depois de determinados os períodos de ocorrência de cada vórtice, analisou-se a estrutura vertical da corrente até 600 m, a partir dos dados de velocidade da corrente, observando o fluxo médio da corrente local e investigando a variabilidade gerada nesta pela formação das estruturas vorticais. Por último, os

resultados da modelagem numérica permitiram investigar o sistema CB-CCI além de 600 m de profundidade e o comportamento dos vórtices gerados pelo modelo dentro da Bacia de Campos em diversas camadas.

Foi observado portanto intensa atividade de mesoescala da CB ao longo dos dois anos de dados analisados, nos quais nove vórtices foram identificados. O período de formação e desenvolvimento desses vórtices variou de 22 a 72 dias e, depois de desenvolvidos, cinco dos nove vórtices foram emitidos para dentro do giro subtropical e dois foram reabsorvidos pela corrente. A cobertura de nuvens atuou como uma barreira para medição de TSM, impossibilitando o acompanhamento da evolução temporal de dois vórtices durante o período de análise. Outra limitação foi a perda de imagens por fluxos de calor, que diminuem o gradiente térmico do vórtice em superfície perdendo assim a assinatura térmica nas imagens de TSM. Na região de estudo, existiu períodos em que observou-se nas imagens de TSM uma CB estável, porém, foram mais curtos e menos recorrentes que os períodos de ocorrência de intensa atividade de mesoescala.

A partir da análise dos dados de velocidade da corrente até profundidades intermediárias, foi possível observar que tanto a CB quanto a CCI estiveram presentes acima de 600 m da coluna d'água. A profundidade de separação, observada, entre a CB e a CCI foi de 255 a 385 m, variando a profundidade de acordo com o posicionamento de cada fundeio em relação ao núcleo da CB. Foram calculados o perfil médio de velocidade da corrente e desvio padrão. O desvio padrão teve a mesma magnitude da velocidade da corrente média, significando que vórtices geraram uma variabilidade significativa na velocidade da corrente. O sistema CB-CCI apresentou uma forte estrutura baroclínica, entretanto a variabilidade do

sistema, associada ao meandramento da corrente e a formação de vórtices, tem uma componente barotrópica. Identificou-se que os vórtices mudaram a profundidade e a intensidade da CB e também da porção superior da CCI.

Os resultados do HYCOM sugeriram que os vórtices identificados nos dados de ADCP, teriam extensão além da porção superior da CCI, podendo alcançar profundidade de até 1600 m, estando presente portanto, em todo o sistema CB-CCI. As feições seriam geradas inicialmente na CB e ao longo de seu desenvolvimento interagiriam com a CCI, e se estenderiam ao longo de todo o sistema CB-CCI de forma assimétrica. Durante o período de formação de vórtices, CB e CCI estariam fora de fase dando origem a uma região na qual toda a coluna d'água apresentaria o mesmo comportamento. Este comportamento explicaria a presença da componente barotrópica discutida nos resultados da perturbação associada a variabilidade gerada pelo vórtice.

Referências Bibliográficas

- BLECK, R., 2002, “An Oceanic General Circulation Model Framed in Hybrid Isopycnic - Cartesian Coordinates”, *Ocean Modelling*, v. 27, pp. 55–58.
- BOEBEL, O., D. R. E. O. M., 1999a, “The Intermediate Depth Circulation of the Western South Atlantic”, *Geophysical Research Letters*, v. 26, n. 21, pp. 3329–3332.
- CALADO, L., 2001, *Dinâmica da formação dos meandros e vórtices da Corrente do Brasil ao largo do Sudeste Brasileiro*. Tese de Mestrado, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.
- CALADO, L., SILVEIRA, I., GANGOPADHYAY, A., et al., 2010, “Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22 S, Brazil).” *Continental Shelf Research*, pp. 1181–1188.
- CAMPOS, E. J. D., 1995, *Estudos da circulação oceânica no Atlântico Tropical e região oeste do Atlântico Subtropical Sul*. Tese de Doutorado.
- EDWARDS, C. R., SEIM, H. E., 2008, “Complex EOF Analysis as a Method to Separate Barotropic and Baroclinic Velocity Structure in Shallow Water”, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 25, pp. 808–821.
- EMERY, W. J., THOMSON, R. E., 1998, *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon.
- EMÍLSON, I., 1961, “The shelf and coastal waters off Southern Brazil”, *Bolm, Insts. Oceanogr., São Paulo*.
- FERNANDES, A. M., SILVEIRA, I. C. A., CALADO, L., et al., 2009, “A two-layer approximation to the Brazil Current–Intermediate Western Boundary

- Current System between 20°S and 28°S”, *Ocean Modelling*, v. 29, pp. 154–158.
- GARFIELD III, N., 1990, *The Brazil Current at Subtropical Latitudes*. Tese de Doutorado, University of Rhode Island.
- KAIHATU, J. M., HANDLER, R. A., MARMORINO, G. O., et al., 1997, “Empirical orthogonal Function Analysis of Ocean Surface Currents Using Complex and Real-Vector Methods”, *American Meteorological Society*, (august), pp. 927–941.
- KUNDU, P. K., ALLEN, J. S., 1976, “Some three-dimensional characteristics of low-frequency current fluctuations near the Oregon coast”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 6, pp. 181–199.
- KUNDU, P. K., ALLEN, J. S., SMITH, R. L., 1975, “Modal Decomposition of the Velocity Field near the Oregon Coast”, *Journal of Physical Oceanography*, (outubro), pp. 683 – 704.
- LIMA, N. D., 2008, “Estudo da variabilidade dos sinais da Corrente do Brasil na região da Bacia de Campos”, *Monografia, Universidade do estado do Rio de Janeiro*.
- LORENZ, E., 1956, *Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction*. Statistical Forecasting Project 1, Department of Meteorology, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- MANO, M., PAIVA, A., TORRES JR, A., et al., 2009, “Energy Flux to a Cyclonic Eddy off Cabo Frio, Brazil”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 39, pp. 2999–3010.
- MASCARENHAS, A. D. S., MIRANDA, B. L., ROCK, Y., 1971, “A study of the oceanographic conditions in the region of Cabo Frio”, *Fertility in the Sea*, v. 1, pp. 285–308.
- PETERSON, R. G., STRAMMA, L., 1991, “Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean”, *Progress in Oceanography*, v. 26, pp. 1–73.

- ROBINSON, I. S., 1994, *Satellite oceanography: An introduction for oceanographers and remote-sensing scientists*. New York, NY, US, Wiley.
- SCHMID, C., H., S., PODESTÁ, G., et al., 1995, “The Vitória Eddy and its Relation to the Brazil Current”, *Journal of Physical Oceanography*, v. 25, pp. 2532–2546.
- SILVEIRA, I. C. A., SCHMIDIT, A. C. K., CAMPOS, J. E. D., et al., 2000, “A Corrente do Brasil ao Largo da Costa leste Brasileira”, *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 48, pp. 171–183.
- SILVEIRA, I. C. A., CALADO, L., CASTRO, B. M., et al., 2004, “On the baroclinic structure of the Brazil Current– Intermediate Western Boundary Current system at 22° – 23°S”, *Geophysical Research Letters*, v. 31.
- SILVEIRA, I. C. A., LIMA, J. A. M., SCHMIDIT, A. C. K., et al., 2008, “Is the meander growth in the Brazil Current system off Southeast Brazil due to baroclinic instability?” *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, v. 45, pp. 187–207.
- SOUTELINO, R. G., 2008, *A Origem da Corrente do Brasil*. Tese de Mestrado, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.
- STOMMEL, H., 1965, “The Gulf Stream: a physical and dynamical description”, *Berkeley University of California Press*, p. 248.
- STRAMMA, L., 1988, “The Brazil Current transport south of 23S”, *Deep Sea Research*, v. 36, n. 4, pp. 639–646.
- STRAMMA, L., ENGLAND, M., 1999, “On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean”, *Journal of Geophysical Research*, v. 104, pp. 20,863–20,883.
- STRAMMA, L. AND IKEDA, Y., PETERSON, R. G., 1990, “Geostrophic Transport in the Brazil Current Region North of 20°S,” *Deep-Sea Research*, v. 37, pp. 1875–1886.

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