

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG

INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA FÍSICA, QUÍMICA E  
GEOLOGICA

André Lopes Brum

**Diagrama de Lorenz: Ferramenta para Análise Energética de CCOs**

**Dois Estudos de Caso na Corrente do Brasil**

Rio Grande

2015

André Lopes Brum

## **Diagrama de Lorenz: Ferramenta para Análise Energética de CCOs**

### **Dois Estudos de Caso na Corrente do Brasil**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Instituto de Oceanografia

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica

Orientador: José Luiz Lima de Azevedo

Rio Grande

2015



## ATA ESPECIAL DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO – 10/2015

Às quatorze horas e trinta minutos do dia 17 de Agosto do ano dois mil e quinze, no Auditório João Rocha do IO - FURG/Carreiros, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de **MESTRADO** intitulada "**Diagrama de Lorenz: Ferramenta Para Análise Energética de Correntes de Contorno Oeste (CCO)**", do Acad. ANDRÉ LOPES BRUM. A Comissão Examinadora foi composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo - Orientador/Presidente (IO – FURG), Prof. Dr. Paulo Henrique Rezende Calil (IO – FURG), Prof. Dr. Leopoldo Rota de Oliveira (UNIPAMPA). Dando início à reunião, a Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Profa. Dra. Elisa Helena Fernandes, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que o Candidato teria um tempo de 45 a 60 min para explanação do tema, e cada membro da Comissão Examinadora, um tempo máximo de 30 min para perguntas. A seguir, passou à palavra ao Candidato que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após ampla explanação, a Comissão Examinadora reuniu-se em reservado para discussão do conceito a ser atribuído ao Candidato. Foi estabelecido que as sugestões de todos os membros da Comissão Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pelo Orientador/Candidato para incorporação na versão final da Dissertação. Finalmente, a Comissão Examinadora considerou o candidato **APROVADO**, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ATA que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pelo Candidato e pelo Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.

Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo  
Presidente

Prof. Dr. Paulo Henrique Rezende Calil

Prof. Dr. Leopoldo Rota de Oliveira

Acad. André Lopes Brum

Profª. Drª. Elisa Helena Fernandes  
Coordenadora do PPGOFQG

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, principalmente aos meus pais e a minha irmã, por todo o apoio que sempre me deram, jamais medindo esforços para me ajudar a concluir mais essa etapa na minha formação.

Ao meu orientador Zé Luiz, por ter aceitado mais uma vez me orientar em mais uma etapa da minha formação acadêmica. Sempre disponível para tirar dúvidas, agregando conhecimento ao trabalho.

Aos meus amigos pela ajuda psicológica durante essa caminhada, ajudando a combater o stress e alegrando meus dias.

A FURG e ao LEOC pela disponibilização de ambiente para a realização do trabalho.

Aos meus colegas de LEOC, pelas ajudas com possíveis dúvidas, conversas e risadas que sempre são bem vindas para diminuir a pressão do trabalho. Em especial ao amigo e colega Fábio Dias, por ter disponibilizado sua saída de modelo para que este trabalho pudesse ser realizado. E também ao colega Fernando Magalhães, sempre solícito quando precisei de sua ajuda, inclusive também disponibilizando sua saída de modelo no primeiro momento da produção deste estudo.

A CAPES pelo apoio financeiro durante a realização deste trabalho.

## RESUMO

A análise energética, quando aplicada às feições oceânicas, permite uma melhor compreensão da sua dinâmica e, com isso, uma maior capacidade de construir cenários e justificar eventos, tanto recorrentes como anômalos. Para isso existem algumas ferramentas capazes de analisar a energética local (ou regional ou ainda global), como as equações de conservação da energia e o Diagrama de Lorenz (DL).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de utilização do Diagrama de Lorenz como ferramenta de análise energética aplicada ao estudo de correntes de contorno oeste (CCOs). O cenário escolhido foi a Corrente do Brasil (CB), CCO presente na borda oeste do giro subtropical do oceano Atlântico Sul, e a análise foi feita com base na dinâmica apresentada pela literatura pretérita e também com aquela obtida neste trabalho. Os dados são oriundos da saída do modelo hidrodinâmico ROMS.

A avaliação da dinâmica local de duas regiões escolhidas ao longo do caminho da CB (Cabo Frio e na costa gaúcha), através do cálculo das duas formas de energia (potencial e cinética), em suas formas média e turbulenta, e dos termos de conversão barotrópica e baroclínica, serviu como referência e base para a escolha de seis transectos nestas regiões. A partir da análise dos DL aplicados nestes transectos e da comparação dos seus resultados com aqueles da dinâmica local, constatamos que o DL é uma boa ferramenta para o estudo da energética de uma determinada região.

A escolha da posição dos transectos analisados é de fundamental importância, pois uma escolha equivocada pode sub ou sobre-estimar a energética local, assim como a escolha do campo básico também influencia diretamente no cálculo dos termos relacionados à energia potencial. Destaca-se ainda que a análise vertical e horizontal dos termos do DL permite uma melhor caracterização da estrutura energética local.

A Corrente do Brasil aumenta em espessura à medida que flui para sul. Os valores dos estoques de energia perdem magnitude com o aumento da profundidade. O estoque de ECM, no jato da CB, é maior do que o estoque de ECT.

O termo de conversão baroclínica possui maior magnitude do que o de conversão barotrópica na CB, e os processos de instabilidade baroclínica tendem a ocorrer em direção *offshore*.

**Palavras-chaves:** Diagrama de Lorenz, Corrente do Brasil, Bacias de Campos e de Santos, Cone do Rio Grande, correntes de contorno oeste, energia cinética, energia potencial, instabilidades, conversões de energia.

# ABSTRACT

Energetic analysis, when applied to ocean features, allows a better understanding of its dynamics, and so an increased ability to build scenarios and explain events, both recurring as anomalous. There are some tools that are able to analyze the local energetics (or regional or even global) as the energy conservation equations and the Lorenz Diagram (LD).

This work aimed to evaluate the potential of the Lorenz Diagram application as an energetic analysis tool applied to western boundary currents (WBCs) study. The scenario chosen here was the Brazil Current (BC), WBC present in the west boundary of the South Atlantic subtropical gyre, and its analysis were made based on the dynamics from the literature and from this work.

The local dynamics evaluation of two chosen areas along the BC's path (Cabo Frio and Rio Grande's Cone), through the calculation of the energy sources (potential and kinetic), such time-mean as time-varying, and barotropic and baroclinic conversion terms, served as reference to select six transects in these regions. Based on the analysis of the LD applied in these transects, and comparing its results with the local dynamics, we have verified that the LD is a good tool for the energetic study at a given area.

The correct choice of the analyzed transects position is crucial, where an erroneous choice may underestimate or overestimate the local energetics, as so the selection of the reference temperature field also affects the calculation of the LD terms related to potential energy. We also highlight the vertical and horizontal analysis of the LD terms allows a better characterization of local energy structure.

The Brazil Current (BC) vertical extension grows as it flows downstream. The values of the energy budgets are diminished in magnitude with the increasing of depth. The MKE budget, in the BC's jet, is bigger than the EKE budget. The baroclinic conversion term has greater magnitude than the barotropic one in the BC's jet, and the baroclinic instability processes tend to occur offshore of the BC domain.

**Key-words:** Lorenz Diagram, Brazil Current, Campos's Basin, Santos's Basin, Rio Grande's Cone, Western Boundary Currents, kinetic energy, potential energy, instabilities, energy conversions.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Representação das Correntes de Contorno Oeste (em amarelo). Fonte: <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/>..... 26
- Figura 2** - LEC para o STORM/NCEP do oceano (a) e da atmosfera (b) retirado de Li et al. 2007 (b). Adaptado de Von Storch et al. (2012)..... 30
- Figura 3** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT e EPT (da esquerda para a direita, respectivamente) em três profundidades (50 m, 100 m e 500 m de cima para baixo, nesta ordem). As unidades estão em  $J.m - 3$ . Fonte: Kang & Curchitser (2015). ..... 32
- Figura 4** - Decomposição em Modos Dinâmicos. Fonte: Rocha et al. (2014). ..... 33
- Figura 5** - Representação simplificada do Diagrama de Lorenz. Adaptado de Azevedo et al. (2008). ..... 36
- Figura 6** - Diagrama de Lorenz, adaptado de Azevedo et al. (2008). ..... 51
- Figura 7** - Mapa batimétrico de toda a região da CB (valores em metros) com a representação das duas regiões de ênfase neste trabalho (retângulos em preto). O retângulo mais ao norte representa a região de Cabo Frio e o retângulo mais ao sul representa a região do Cone do Rio Grande. .... 53
- Figura 8** - Representação do meandramento da CB, com a representação da zona de formação dos principais vórtices: VV (vórtice de Vitória), VCST (vórtice do Cabo de São Tomé) e VCF (vórtice de Cabo Frio). A sigla “A” significa centro de alta pressão, “B” centro de baixa pressão. Fonte: Calado (2006). ..... 54
- Figura 9** - Representação das principais correntes do OAS. Fonte: Peterson & Stramma (1991). ..... 56
- Figura 10** - Mapa batimétrico da região da costa brasileira. As linhas finas representam as profundidades de 200 e 1000 metros. As linhas grossas



representam os dois locais onde foram simulados os transectos para o cálculo do transporte local da CB a partir dos dados de saída do modelo ROMS..... 60

**Figura 11** - Campo de ECT média, para a região de estudo, a partir de dados das AASM. Na esquerda a ECT foi calculada a partir de dados do site da AVISO, enquanto à direita foram utilizados os dados de saída do modelo ROMS. As linhas tracejadas em branco representam as linhas batimétricas de 200, 1000 e 2000 m. 62

**Figura 12** - Representação da localização dos fundeios na região de Cabo Frio. Fonte: Rocha et al. (2014). ..... 63

**Figura 13** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo ROMS no mesmo local do fundeio MARLIM de Rocha et al. (2014). ..... 64

**Figura 14** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo no mesmo local do fundeio DFBS de Rocha et al. (2014). ..... 65

**Figura 15** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo no mesmo local do fundeio C3 de Rocha et al. (2014). ..... 65

**Figura 16** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo no mesmo local do fundeio W333 de Rocha et al. (2014)..... 66

**Figura 17** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da esquerda para a direita, respectivamente) para todo o domínio da saída do modelo de Dias (2013). As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . ..... 68

**Figura 18** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da esquerda para a direita, respectivamente) para a região da CB. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . ..... 70

**Figura 19** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da

esquerda para a direita, respectivamente) para a região de Cabo Frio. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . ..... 72

**Figura 20** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da esquerda para a direita, respectivamente) para a região do Cone do Rio Grande. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . ..... 74

**Figura 21** - Distribuição horizontal dos termos CBC (figuras superiores) e CBT (figuras inferiores) nas profundidades de referência (50, 200 e 600 m) para a região da CB. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 76

**Figura 22** - Distribuição horizontal dos termos CBC (figuras superiores) e CBT (figuras inferiores) nas profundidades de referência (50, 200 e 600 m) para a região de Cabo Frio. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 77

**Figura 23** - Distribuição horizontal dos termos CBC (figuras superiores) e CBT (figuras inferiores) nas profundidades de referência (50, 200 e 600 m) para a região do Cone do Rio Grande. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 78

**Figura 24** - Distribuição horizontal dos termos ECM (a), ECT (b) e CBT (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região da CB. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 79

**Figura 25** - Distribuição horizontal dos termos ECM (a), ECT (b) e CBT (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região de Cabo Frio. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . 80

**Figura 26** - Distribuição horizontal dos termos ECM (a), ECT (b) e CBT (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região do

Cone do Rio Grande. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 81

**Figura 27** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), EPT (b) e CBC (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região da CB. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 83

**Figura 28** - Distribuição horizontal do estoque de EPM para as profundidades de 200 metros (a) e 600 metros (b) para a região da Corrente do Brasil. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida são  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . ..... 84

**Figura 29** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), EPT (b) e CBC (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região de Cabo Frio. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . 85

**Figura 30** - Distribuição horizontal do termo CBC integrado na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros na região de Cabo Frio, com sobreposição do principal caminho de formação de vórtices da região. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. A unidade de medida está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ... 86

**Figura 31** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), EPT (b) e CBC (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região do Cone do Rio Grande. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 87

**Figura 32** - Distribuição horizontal do *path* da CB em diferentes profundidades (através dos valores de velocidade média resultante), conforme indicado no título de cada imagem, para a região de Cabo Frio. As linhas contínuas pretas indicam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades estão em  $\text{cm}/\text{s}$ . ..... 88

**Figura 33** - Distribuição horizontal do *path* da CB em diferentes profundidades (através dos valores de velocidade média resultante), conforme indicado no título de

cada imagem, para a região do Cone do Rio Grande. As linhas contínuas pretas indicam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades estão em cm/s. 89

**Figura 34** - Distribuição vertical média das velocidades da CB ao longo do seu *path* de norte para sul, em uma vista lateral. A imagem (a) representa a região de CF, e (b) a região do CRG. As linhas pretas indicam a profundidade de velocidade máxima (onde elas não aparecem significa que o valor máximo encontra-se em superfície). As áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em cm/s. .... 91

**Figura 35** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de ECM no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de ECM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECM (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . .... 92

**Figura 36** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de ECM no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de ECM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECM (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . .... 93

**Figura 37** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de ECT no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de ECT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha

contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ..... 94

**Figura 38** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de ECT no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de ECT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ..... 95

**Figura 39** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de EPM no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de EPM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ..... 96

**Figura 40** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de EPM no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de EPM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ..... 97

**Figura 41** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de EPT no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de EPT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ..... 98

**Figura 42** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de EPT no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de EPT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ..... 99

**Figura 43** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do termo CBC no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do termo CBC na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 100

**Figura 44** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do termo CBC no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do termo CBC na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ ..... 101

**Figura 45** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do termo CBT no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do termo CBT na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 102

**Figura 46** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do termo CBT no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do termo CBT na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco em representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 103

**Figura 47** - Perfil vertical de ECM e ECT para as regiões de Cabo Frio e Cone do Rio Grade. As unidades no eixo “x” estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . ..... 104

**Figura 48** - Perfil vertical de EPM (a) e EPT (b) para as regiões de Cabo Frio e Cone do Rio Grade. As unidades no eixo “x” estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ . ..... 105

**Figura 49** - Perfil vertical de CBC e CBT para as regiões de Cabo Frio e Cone do Rio Grade. As unidades no eixo “x” estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . ..... 106

**Figura 50** - Campo de velocidade resultante média superficial nas regiões de Cabo Frio (a) e do Cone do Rio Grande (b). As unidades estão em  $\text{cm}/\text{s}$ . A linhas pretas grossas representam os transectos calculados. ..... 107

**Figura 51** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CF I. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB.. 109

**Figura 52** - Diagrama de Lorenz para o transecto CF I. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados. Cada termo possui um valor, correspondente à profundidade de 50 metros. ..... 110

**Figura 53** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CF II. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB..... 111

**Figura 54** - Diagrama de Lorenz para o transecto CF II. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui um valor correspondente à profundidade de 50 metros. .... 112

**Figura 55** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CF III. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB..... 114

**Figura 56** - Diagrama de Lorenz para o transecto CF III. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui dois valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto) e 200 (azul) metros. .... 115

**Figura 57** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CONE I. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB..... 116

**Figura 58** - Diagrama de Lorenz para o transecto CONE I. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui



três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros..... 117

**Figura 59** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CONE II. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB..... 119

**Figura 60** - Diagrama de Lorenz para o transecto CONE II. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros..... 120

**Figura 61** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CONE III. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB..... 122

**Figura 62** - Diagrama de Lorenz para o transecto CONE III. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros..... 123

**Figura 63** - Diagrama de Lorenz do jato da CB para toda a região de Cabo Frio. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui dois valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto) e 200 (azul) metros..... 124

**Figura 64** - Diagrama de Lorenz do jato da CB para toda a região do Cone do Rio Grande. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros..... 126

**Figura 65** – Distribuição horizontal da razão entre os termos CBC e CBT na região de Cabo Frio. As linhas contínuas em preto representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. Em amarelo o termo CBC é maior, em verde o termo CBT é maior..... 129

**Figura 66** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), CBC (b), EPT (c), FCV\_ET (d) e ECT (e) nas profundidades de referência para a região de Cabo Frio. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$  para (a), (c) e (e), e em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$  para (b) e (d)..... 131

**Figura 67** – Distribuição horizontal da razão entre os termos CBC e CBT na região do Cone do Rio Grande. As linhas contínuas em preto representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. Em amarelo o termo CBC é maior, em verde o termo CBT é maior..... 137

**Figura 68** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), CBC (b), EPT (c), FCV\_ET (d) e ECT (e) nas profundidades de referência para a região do Cone do Rio Grande. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$  para (a), (c) e (e), e em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$  para (b) e (d).  
..... 139

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**AASM** – Anomalias de Altura da Superfície do Mar

**ACAS** – Água Central do Atlântico Sul

**AECM\_EM** – Advecção da ECM pelo Escoamento Médio

**AECT\_EM** – Advecção da ECT pelo Escoamento Médio

**AECT\_ET** – Advecção da ECT pelo Escoamento Turbulento

**AEPM\_EM** – Advecção da EPM pelo Escoamento Médio

**AEPT\_EM** – Advecção da EPT pelo Escoamento Médio

**AEPT\_ET** – Advecção da EPT pelo Escoamento Turbulento

**AIA** – Água Intermediária Antártica

**CA** – Corrente das Agulhas

**CB** – Corrente do Brasil

**CBC** – Conversão Baroclínica

**CBM** – Confluência Brasil-Malvinas

**CBT** – Conversão Barotrópica

**CCO** – Corrente de Contorno Oeste

**CCIB** – Contracorrente de Contorno Intermediária do Brasil

**CF** – Cabo Frio

**CG** – Corrente do Golfo

**CK** – Corrente de Kuroshio

**CLA** – Corrente Leste Australiana

**CM** – Corrente das Malvinas

**CNB** – Corrente Norte do Brasil

**CRG** – Cone do Rio Grande

**CSE** – Corrente Sul Equatorial

**DL** – Diagrama de Lorenz

**EC** – Energia Cinética

**ECM** – Energia Cinética Média

**ECT** – Energia Cinética Turbulenta

**EOF** – Empirical Orthogonal Functions

**EP** – Energia Potencial

**EPD** – Energia Potencial Disponível

**EPM** – Energia Potencial Média

**EPT** – Energia Potencial Turbulenta

**FCV\_EM** – Fluxo de Calor Vertical pelo Escoamento Médio

**FCV\_ET** – Fluxo de Calor Vertical pelo Escoamento Turbulento

**IBC** – Instabilidade Baroclínica

**IBT** – Instabilidade Barotrópica

**OAS** – oceano Atlântico Sul

**TECM\_TR** – Transporte de ECM pelas Tensões de Reynolds

**TEPM\_EM** – Transporte de EPM pelo Escoamento Médio

**THP\_EM** – Trabalho Horizontal da Pressão Turbulenta Média pelo Escoamento  
Médio

**THP\_ET** – Trabalho Horizontal da Pressão Turbulenta Média pelo Escoamento  
Turbulento

**TVP\_EM** – Trabalho Vertical da Pressão Turbulenta Média pelo Escoamento Médio

**TVP\_ET** – Trabalho Vertical da Pressão Turbulenta Média pelo Escoamento Turbulento

**VCF** – Vórtice de Cabo Frio

**VCST** – Vórtice do Cabo de São Tomé

**VV** – Vórtice de Vitória

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1

### **INTRODUÇÃO** **23**

1.1. Energia nos Oceanos 23

1.2. Análise Energética de Correntes de Contorno Oeste 26

1.3. Ferramentas para a Análise Energética 28

1.4. Objetivos 34

## CAPÍTULO 2

### **DIAGRAMA DE LORENZ** **36**

2.1. Características do Diagrama 36

2.2. Fundamentação Teórica 37

2.2.1. Teoria Quase-Geostrófica (QG) 37

2.2.2. Instabilidades 41

2.3. Equação do Balanço da Energia Cinética Turbulenta 43

2.4. Equação do Balanço da Energia Cinética Média 46

2.5. Equação do Balanço da Energia Potencial Turbulenta 48

2.6. Equação do Balanço da Energia Potencial Média 49

2.7. Representação do Diagrama de Lorenz 50

## CAPÍTULO 3

### **MATERIAL E MÉTODOS** **52**

3.1. A Metodologia e Cenários Escolhidos 52

3.2. O Banco de Dados 55

3.3. A Corrente do Brasil 56

3.4. O Cálculo dos Termos do Diagrama 57

<b>CAPÍTULO 4</b>	
<b>RESULTADOS</b>	59
4.1. A Validação do Modelo	59
4.2. A Distribuição Horizontal dos Estoques de Energia	66
4.3. Distribuição dos Estoques de Energia ao Longo da Corrente do Brasil	87
4.4. Representação do Diagrama de Lorenz ao Longo de uma CCO	106
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>DISCUSSÃO</b>	127
5.1. A Região de Cabo Frio	127
5.2. A Região do Cone do Rio Grande	134
<b>CAPÍTULO 6</b>	
<b>CONCLUSÃO</b>	140
6.1. Quanto à Aplicabilidade do Diagrama de Lorenz	140
6.2. Quanto aos Aspectos Energéticos	141
<b>CAPÍTULO 7</b>	
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	143

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Esta introdução tem como objetivo apresentar um breve prefácio sobre o estudo da energética nos oceanos, introduzindo estudos pretéritos sobre regiões similares à utilizada neste trabalho, citando brevemente sobre algumas ferramentas utilizadas para a análise energéticas e comentando alguns conceitos que serão detalhados na sequência deste trabalho.

### 1.1. Energia nos Oceanos

As mudanças climáticas globais estão em grande evidência atualmente dentro da comunidade científica. Este tema vem sendo amplamente abordado, onde questões como a emissão de dióxido de carbono e o aquecimento global, por exemplo, são cada vez mais debatidas. Para termos um maior conhecimento destas mudanças é necessário um melhor entendimento das complexas interações entre o oceano e a atmosfera. Esta interação ocorre, principalmente, através de fluxos de energia, fazendo-se necessário um melhor entendimento dos estoques de energia no oceano e das interações entre as diversas formas em que esta energia se apresenta. Esta descrição quantitativa do ciclo energético do oceano é importante para um maior conhecimento científico sobre o funcionamento global da circulação oceânica.

A análise energética, quando aplicada às feições oceânicas, permite uma melhor compreensão da sua dinâmica e, com isso, uma maior capacidade de construir cenários e justificar eventos, tanto recorrentes como anômalos.

As energias cinética e potencial, associadas aos movimentos de larga escala, são as duas formas de energia mais importantes, nos oceanos. A energia cinética (EC) está relacionada com a velocidade das partículas de um determinado volume de fluido, enquanto a potencial (EP), está relacionada com a posição do centro de massa do volume deste fluido (e.g. [Azevedo et al., 2008](#)). Estas formas de energia ainda podem ser divididas em uma porção média e uma porção turbulenta



(desvios da média), possibilitando assim um melhor entendimento dos processos dinâmicos no oceano.

As regiões de grande atividade de mesoescala, com alta energia cinética turbulenta, são as regiões oceânicas onde as trocas de energia com a atmosfera são mais intensas. A tensão causada por ventos atmosféricos na superfície do oceano, por exemplo, gera energia para manter o espectro de energia cinética em equilíbrio nas camadas superiores (Ferrari & Wunsch, 2009).

Uma feição oceânica importante no estudo da energética dos oceanos são as correntes de contorno oeste (CCOs), que possuem grande atividade de mesoescala, devida a sua alta intensidade e capacidade de formar meandros, onde ocorre a transformação de grande quantidade de energia cinética média em turbulenta. Estas correntes transportam grandes quantidades de calor e sal para os polos, sendo assim, de suma importância no reestabelecimento do balanço de calor global.

Os escoamentos turbulentos possuem como uma de suas características a presença de vórtices em diferentes escalas temporais e espaciais, onde os maiores drenam energia do escoamento médio, a qual vai sendo transferida por vórtices cada vez menores para as menores escalas, onde é finalmente dissipada na forma de atrito. Esse processo de transferência contínua de energia das maiores escalas para as menores é chamado de “cascata de energia”, tendo sido descrito primeiramente por Kolmogorov em 1941 (e.g. Von Schwind, 1980 *apud* Souza et al., 2011).

As grandes quantidades de energia cinética e potencial do escoamento médio são convertidas para o campo de mesoescala (ou turbulento) através da combinação de instabilidades barotrópicas e baroclínicas (e.g. Rhines, 1977; Holland, 1978). Instabilidades baroclínicas e barotrópicas estão presentes em todos os escoamentos geofísicos, as quais podem crescer à medida que o escoamento flui, estando ligadas ao cisalhamento do campo de velocidade vertical e horizontal, respectivamente. Os dois tipos de instabilidade podem ocorrer simultaneamente ou individualmente em um mesmo escoamento. O estudo destas instabilidades e dos fatores que promovem o desenvolvimento (crescimento) delas não é trivial (e.g. Pedlosky, 1987).

De acordo com [Munk \(2003\)](#), mais de 90% da energia cinética dos oceanos se deve à circulação de mesoescala. A energia cinética média (ECM) é obtida através da equação  $ECM \cong \frac{\bar{u}\cdot\bar{u}}{2} = \frac{\overline{u^2+v^2}}{2}$ , onde  $u$  e  $v$  representam as componentes horizontais da velocidade geostrófica. O cálculo completo do balanço da ECM será apresentado no Capítulo 2.

Por sua vez, a energia potencial média (EPM) pode ser calculada pela expressão  $EPM = \frac{g\alpha}{2\theta_z} (\overline{\Delta T})^2$  (e.g. [Azevedo et al., 2008](#); [Oliveira, 2008](#)). A fração da energia potencial capaz de ser utilizada pelo meio para conversões de energia é chamada de Energia Potencial Disponível (EPD), termo introduzido em [Lorenz \(1955\)](#). Supondo-se um determinado volume de controle, a EPD é caracterizada como a diferença de energia potencial entre um estado de referência estável deste volume, onde as isopícnais estariam relaxadas, e um estado alterado, onde as isopícnais não se encontrariam mais relaxadas (i.e., estariam inclinadas) devido, por exemplo, a fluxos de calor verticais (e.g. [Cushman-Roisin, 1994](#)). As equações das energias cinética e potencial nas suas formas turbulentas podem ser calculadas a partir da Equação da Conservação do *Momentum*, conforme será mostrado posteriormente neste trabalho.

A transferência contínua de sua energia média para a forma turbulenta leva o escoamento, visando manter suas características originais, a liberar o excesso de energia para o meio, como por exemplo, através da liberação de vórtices de mesoescala. A conversão de ECM para energia cinética turbulenta (ECT) é chamada de conversão barotrópica (CBT), caracterizando-se então um processo de instabilidade barotrópica (IBT). Já a conversão de EPM em energia potencial turbulenta (EPT) caracteriza um processo de conversão baroclínica (CBC). Caso esta EPT seja ainda convertida em ECT, o processo de conversão  $EPM \rightarrow EPT \rightarrow ECT$  caracterizará uma instabilidade baroclínica (IBC). Os processos de instabilidade baroclínica dependem de fluxos de calor horizontais e, principalmente, de fluxos verticais. Ou seja, os processos de instabilidade ocorrem devido ao crescimento da energia turbulenta, o que pode ocorrer por um longo ou curto período de tempo. Este processo de troca de energia também pode ocorrer em sentido inverso, ou seja, poderá ocorrer uma posterior diminuição na quantidade de energia turbulenta do escoamento seguida de sua transferência (retorno) para o campo médio. Nestes

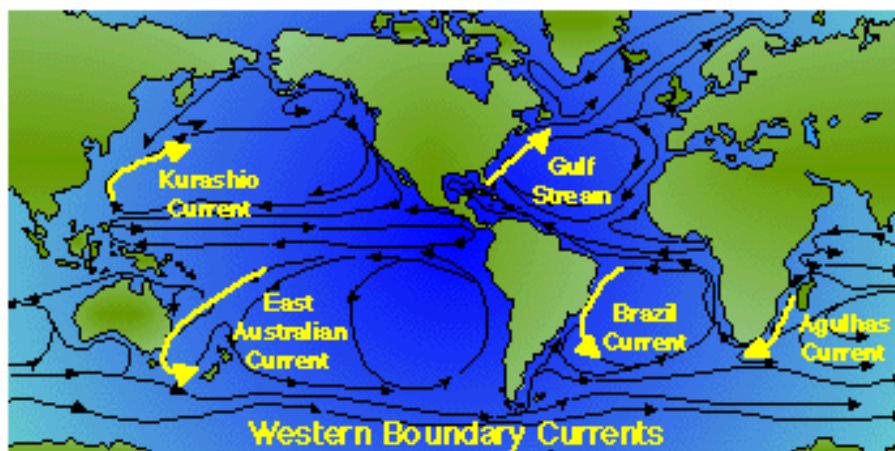
casos, o processo envolvido é chamado de “sobre-estabilidade”, a qual também pode ser barotrópica ou baroclínica (Dewar & Bane, 1989).

Para um cálculo mais correto da conversão baroclínica, se faz necessário a decomposição do campo de velocidade em suas porções divergente e não-divergente, já que o estudo desta conversão deve ser feito apenas com a parcela divergente do campo de velocidade, visto ser esta parcela que propicia o surgimento de fluxos verticais de calor (e.g. Marshall & Shutts, 1981; Illari & Marshall, 1983; Cronin & Watts, 1996; Zhai & Greatbatch, 2006).

Tendo em vista a complexidade do assunto, faz-se necessário um estudo aprofundado da energética dos oceanos globais e, para tal, torna-se necessário a seleção de uma boa ferramenta de estudo. Com isso, neste trabalho, será investigado o Diagrama de Lorenz (DL) e seu potencial de utilização para o estudo energético de correntes de contorno oeste, tendo como referência o trabalho de Cronin & Watts (1996), Azevedo et al. (2008) e Oliveira (2008). Alguns estudos energéticos envolvendo CCOs são apresentados na subseção seguinte.

## 1.2. Análise Energética de Correntes de Contorno Oeste

As correntes de contorno oeste são conhecidas por apresentarem grande atividade energética em seu caminho, sendo mais intensas e estreitas do que as correntes de contorno leste (Figura 1). Possuem papel muito importante na dinâmica global também pelo fato de sua grande capacidade de transporte de propriedades físico-químicas (e.g. Fonteles, 2012).



**Figura 1** - Representação das Correntes de Contorno Oeste (em amarelo).

Fonte: <http://www2.warwick.ac.uk/fac/sci/eng/>.

Investigações nas interações dos fluxos médio e turbulentos em CCOs começaram a surgir a partir do reconhecimento da importância da turbulência de mesoescala para a circulação oceânica. Além disso, a topografia da região também atua como uma variável importante no estudo do caminho percorrido pelas correntes, influenciando na dinâmica local, e conseqüentemente nas conversões de energia entre os campos médio e turbulento (e.g. [Ducet & Traon, 2001](#); [Xie et al., 2007](#); [Hulbert et al., 2008](#); [Greatbatch et al., 2010a, b](#); [Chen et al., 2011](#); [Thoppil et al., 2011](#); [Waterman & Jayme, 2011](#)). [Ducet & Traon \(2001\)](#) compararam a ECT superficial de cinco anos de dados (Outubro de 1992 até Maio de 1998) altimétricos nas CCOs do Golfo e de Kuroshio, mostrando a contribuição da utilização de dois altímetros (T/P e ERS-1/2) para estudos de mesoescala oceânica na Corrente do Golfo (CG) e na Corrente de Kuroshio (CK).

O estudo de [Xie et al. \(2007\)](#) sobre a CG, na região do Charleston Bump (feição topográfica análoga ao Cone do Rio Grande (CRG), na costa brasileira, que será abordada neste trabalho), mostrou que a topografia local, caracterizada por uma curvatura das isóbatas locais, é responsável pela formação de meandros na região.

[Greatbatch et al. \(2010a\)](#) analisaram o transporte dirigido por fluxos de *momentum* turbulentos na Corrente do Golfo e sua extensão. Os resultados mostraram que os fluxos de *momentum* turbulentos podem dirigir o transporte significativamente, explicando inclusive algumas características particulares da região. [Waterman & Jayme \(2011\)](#) estudaram um modelo idealizado do jato de uma CCO com parâmetros e configurações semelhantes aos da CG. Este trabalho demonstra como feições turbulentas agem na estabilização do jato principal das CCOs e dirigem as recirculações nas laterais destas.

[Chen et al. \(2011\)](#) investigaram a premissa de que as instabilidades baroclínicas dominam as interações entre os fluxos médio e turbulento, em escala global, dividindo as interações em: local e não local. Concluíram que as diferentes regiões possuem características diferentes, e que a variabilidade geográfica da dominância do fluxo médio ou turbulento é um fator importante para o entendimento da energética dos oceanos.

A Corrente do Golfo é uma CCO cuja análise energética já foi bastante estudada pela comunidade científica (e.g. [Cronin & Watts, 1996](#); [Von Stoch et al., 2012](#); [Kang & Curchitser, 2015](#)). Outras CCOs, como a Corrente Leste Australiana (CLA) (e.g. [Feron, 1995](#); [Mata et al. 2000, 2006](#); [Ridgway & Dunn, 2003](#); [Bowen et al., 2005](#); [Morrow et al., 2010](#)) e a Corrente das Agulhas (CA) (e.g. [Gordon et al., 1987](#); [Quartly & Srokosz, 1993](#); [Wilkin & Morrow, 1994](#); [Schmitz, 1996](#); [Biastoch & Krauss, 1999](#); [Ducet et al., 2000](#); [Stammer et al., 2006](#); [Beal et al., 2011](#)), também foram investigadas energeticamente. Dentre os trabalhos sobre a CLA, podemos destacar o trabalho de [Ridgway & Dunn \(2003\)](#) que analisa a estrutura de mesoescala da CLA e sua relação com a topografia; e o trabalho de [Mata et al. \(2006\)](#) que estudou a variabilidade espacial da CLA, analisando conversões de energia e liberação de vórtices de mesoescala, e mostraram que o período de variabilidade do limite sul da CLA está relacionado com a variação da posição de separação da corrente e a liberação de vórtices pela mesma.

Já entre os trabalhos citados sobre a CA, podemos destacar o de [Schmitz \(1996\)](#), que utilizou dados de fundeio para comparar o campo turbulento da Retroflexão da CA e do próprio sistema da Corrente das Agulhas com CCOs análogas em outros oceanos. Similaridades entre o campo turbulento da CA e da CG foram encontradas, como a estrutura vertical de energia cinética turbulenta.

Todas estas CCOs possuem muito mais estudos energéticos quando comparadas à Corrente do Brasil (CB), que ainda carece de maiores estudos com este enfoque. Em virtude disso, utilizaremos a região da Corrente do Brasil para a análise da capacidade do Diagrama de Lorenz de representar a energética local, que é o objetivo principal deste trabalho, além dele também poder fornecer novos dados e análises sobre esta importante CCO ainda muito pouco estudada. A subseção seguinte apresenta algumas ferramentas utilizadas em estudos energéticos de CCOs.

### **1.3. Ferramentas para a Análise Energética**

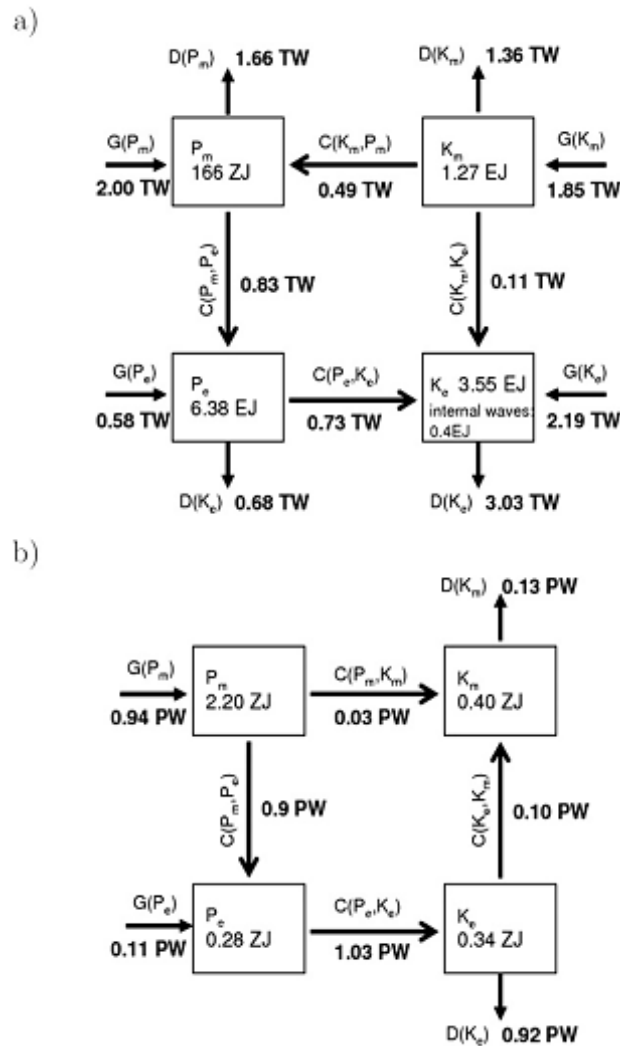
Nesta subseção serão apresentadas algumas das principais ferramentas para análise energética, como os Modos Dinâmicos, as Funções Ortogonais Empíricas,

as Equações de Conservação de Energia, e o Diagrama de Lorenz, a partir de trabalhos pretéritos citados a seguir.

Simulações globais (ou regionais) vêm sendo feitas na última década (e.g. [Masumoto et al., 2004](#); [Sasaki et al., 2004](#); [Maltrud & McClean, 2005](#); [Lee et al., 2007](#); [Ferrari & Wunsch, 2009](#); [Maltrud et al., 2010](#); [Thoppil et al., 2011](#); [Von Storch et al., 2012](#)) na busca por mais conhecimento da energética dos oceanos. Os estudos baseiam-se em cálculos a partir das equações básicas dos fluidos geofísicos aplicadas sobre os campos de velocidade e densidade (ou temperatura) locais (ou globais).

[Maltrud & McClean \(2005\)](#) utilizando um modelo de circulação global (POP – Parallel Ocean Program) com uma escala horizontal de  $1/10^\circ$  calcularam o campo de energia turbulenta para todo o oceano. Encontraram valores compatíveis com os valores calculados com altimetria nas regiões de maior atividade turbulenta, entretanto, encontraram problemas significativos em regiões como a Corrente do Golfo e na Corrente do Atlântico Norte. A partir desse estudo, [Thoppil et al. \(2011\)](#) desenvolveram um modelo com uma maior resolução ( $1/25^\circ$ ), e compararam a energia cinética calculada pela saída de um modelo global (HYCOM) com a calculada através de observações *in situ* (boias de deriva, altimetria por satélite, boias de sub-superfície e fundeios), e encontraram uma diferença entre 15% e 25% entre os dados superficiais, e entre 45% e 50% entre os dados de oceano profundo.

O estudo de [Von Storch et al. \(2012\)](#), apresenta uma estimativa do ciclo de energia (Lorenz Energy Cycle – LEC) (Figura 2) em toda a bacia oceânica global baseada em uma simulação numérica (STORM/NCEP), mostrando a distribuição horizontal dos estoques de energia cinética e potencial (média e turbulenta), e além de taxas de conversão entre essas energias. Esse trabalho é de grande importância na evolução destes estudos, já que a maioria das simulações anteriores, apesar de produzirem realisticamente muitas feições características da circulação oceânica global, não apresentam um estudo do ciclo de energia completo do oceano.



**Figura 2** - LEC para o STORM/NCEP do oceano (a) e da atmosfera (b) retirado de [Li et al. 2007](#) (b). Adaptado de [Von Storch et al. \(2012\)](#).

O Diagrama de Lorenz (e.g. [Gill, 1982](#); [Kundo & Cohen, 1990](#); [Holton, 1992](#); [Peixoto & Oort, 1992](#); [Cushman-Roisin, 1994](#); [Cronin & Watts, 1996](#)) é uma das ferramentas existentes para a análise energética dos oceanos e de suas principais feições. Ele descreve o estoque de energia dos quatro reservatórios energéticos no estado estacionário: as energias cinética e potencial média; e as energias cinética e potencial turbulenta. Além disso, o Diagrama de Lorenz também apresenta as interações energéticas entre estes quatro reservatórios, podendo apontar também possíveis fontes e/ou sumidouros de energia (ou seja, a interação destes reservatórios com o meio externo a eles). No DL são utilizadas setas para representar o sentido do fluxo de energia ([Holton, 1992](#)).

A maioria dos estudos sobre energética de CCOs, encontrados na literatura, abrange apenas correntes do hemisfério Norte, como o estudo feito por [Cronin & Watts \(1996\)](#) na região da Corrente do Golfo, onde foi dada ênfase nas energias turbulenta (potencial e cinética) na interação com o escoamento médio e turbulento.

[Oliveira et al. \(2009\)](#) estudou a energética superficial do oceano Atlântico Sudoeste a partir de dados lagrangeanos de boias de deriva e mostrou que a ECT ao longo do caminho principal da CCO é, geralmente, menor do que a ECM, na maior parte do *path* da corrente. Já na região da Confluência Brasil-Malvinas (CBM), a ECT possui valores próximos da ECM. Um estudo de [Cerrone \(2010\)](#), na região ao sul de Cabo Frio (CF) até o litoral norte uruguaio, através de derivadores oceânicos rastreados por satélite, demonstrou que a intensidade média da CB situa-se entre 30 e 45 cm/s, dependendo da época do ano. Nesse mesmo estudo foi analisada a energética da região, onde foram encontrados valores médios de ECM entre 500 e 1250 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, além de valores médios acima de 1500 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> de ECT, ambos variando sazonalmente.

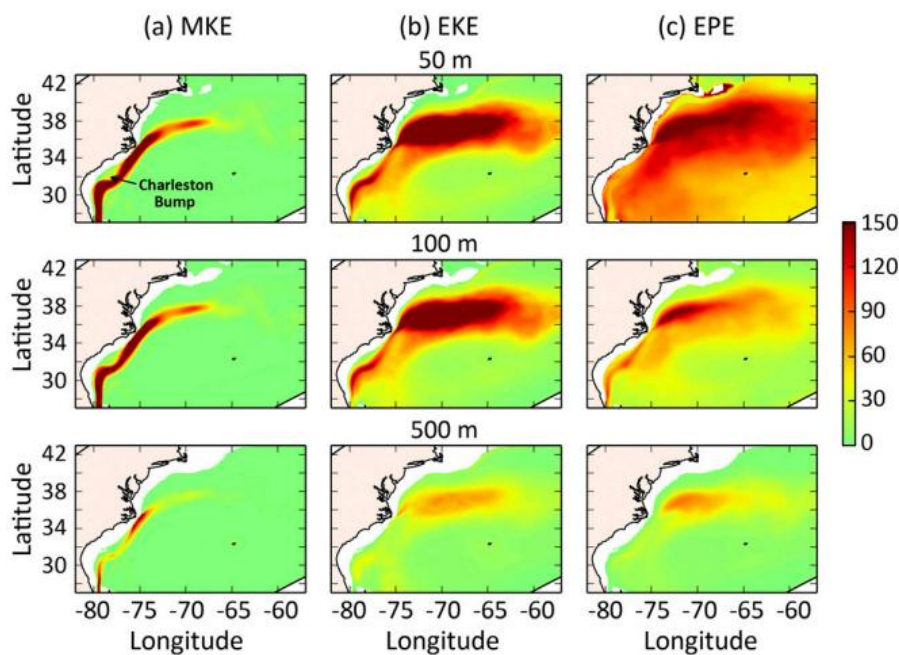
[Von Storch et al. \(2012\)](#) calculam também a influência do vento na circulação oceânica global e, conseqüentemente, nos ciclos e conversões energéticas do oceano, e fazendo também uma comparação do LEC oceânico com o atmosférico. O LEC descreve o estado estacionário dos quatro reservatórios de energia (ECM, ECT, EPM e EPT) e as equações que compõem essa ferramenta são oriundas da derivação da Equação da Conservação do *Momentum* e da Equação da Densidade (derivada da Equação da Temperatura Potencial e da Salinidade). Os autores observaram que a circulação oceânica é cerca de duas ordens de magnitude menos energética do que a circulação atmosférica.

[Nardi \(2013\)](#) estudou a energética da CB na região do Cone de Rio Grande, com a utilização de Diagramas de Lorenz que serão utilizados para algumas comparações nos resultados deste trabalho.

[Kang & Curchitser \(2015\)](#) estudaram a energética da Corrente do Golfo (Figura 3) com uma metodologia semelhante à utilização do Diagrama de Lorenz, onde a derivação de suas equações é baseada na Equação de Navier-Stokes sob aproximação hidrostática e de Boussinesq. Porém, ao analisarem um modelo de 50 anos de dados, eles incluem, em seu diagrama energético, termos de dissipação de



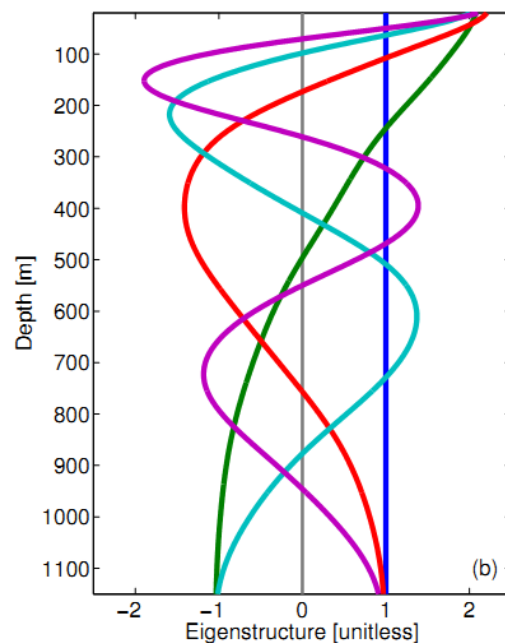
energia e forçantes externas, diferentemente do Diagrama de Lorenz utilizado por Cronin & Watts (1996), Azevedo et al. (2008) e Oliveira (2008), o qual será utilizado nesse trabalho. Estes dois últimos trabalhos seguiram a metodologia de implementação do DL proposta pelo primeiro trabalho, de 1996. Além disso, em Kang & Curchitser (2015), os cálculos dos balanços das energias são feitos a partir da densidade, enquanto a metodologia inicialmente proposta em Cronin & Watts (1996) calcula a energia potencial utilizando apenas temperatura como parâmetro (considerando a densidade apenas como função da temperatura, excluindo a salinidade) para o cálculo de energia potencial.



**Figura 3** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT e EPT (da esquerda para a direita, respectivamente) em três profundidades (50 m, 100 m e 500 m de cima para baixo, nesta ordem). As unidades estão em  $J.m^{-3}$ .  
Fonte: Kang & Curchitser (2015).

Outras ferramentas ainda são utilizadas pela comunidade científica no estudo da dinâmica oceânica, como por exemplo, os modos dinâmicos e as EOFs (e.g. Pedlosky, 1987; Emery & Thomson, 2001). Os modos dinâmicos (Figura 4) são modos de estrutura vertical da dinâmica do sistema, resultado da ortogonalização de equações da hidrodinâmica (Belo, 2011). Eles são calculados pela resolução numérica do “problema de autovalores”, onde cada modo possui um “peso” que

representa a dominância deste modo na dinâmica vertical da coluna d'água (e.g. Flier, 1978; Neto & Silveira, 2004; Silveira et al., 2004, 2008; Rocha et al., 2014). Rocha et al. (2014) realizaram um estudo da energética da CB na região de 22° S a 28° S, onde os resultados de ECM e ECT obtidos por ele serão comparados com os deste trabalho. Eles observaram que os dados dos fundeios mostraram o aumento na profundidade da CB ao dirigir-se para o sul, e a análise de estabilidade linear, utilizando os Modos Dinâmicos, indicou que o sistema da CB é baroclinicamente instável ao longo de seu caminho. Portanto, os modos dinâmicos permitem, por meio de equações matriciais, a decomposição de cada componente da velocidade, para que as energias associadas a cada componente possam ser estudadas com um melhor detalhamento. Essa decomposição é feita em função da Frequência de Brunt-Väisälä na coluna d'água, portanto, necessitando dos parâmetros de densidade local.



**Figura 4** - Decomposição em Modos Dinâmicos.

Fonte: Rocha et al. (2014).

As EOFs (*Empirical Orthogonal Functions*), também chamadas de Modos Estatísticos, são modos de estrutura vertical estatísticos, os quais permitem a análise da variabilidade vertical das correntes com base em séries temporais medidas em diferentes níveis verticais. O objetivo da expansão em EOFs é converter

a matriz de dados em uma série de padrões verticais, que não variam temporalmente. Estes modos são independentes estatisticamente, e dependem da resolução vertical das observações, da extensão temporal e da localização geográfica das medições (Belo, 2011). Assim como nos modos dinâmicos, as EOFs também possuem “pesos” diferentes para cada modo. Normalmente a maior parte da variância de uma série de distribuição espacial está nas primeiras funções ortogonais (primeiros modos), cujos padrões podem estar ligados a possíveis mecanismos dinâmicos (Emery & Thomson, 2001; e.g. Silveira et al. 2000b, 2008). No trabalho de Silveira et al. (2000b), a utilização das EOFs e dos Modos Dinâmicos permitiu o estudo energético da região da retroflexão da Corrente Norte do Brasil (CNB), concluindo, por exemplo, que o modo barotrópico e os dois primeiros modos baroclínicos representam cerca de 75% da estrutura energética vertical do fluxo da CNB.

Após este breve relato sobre algumas ferramentas utilizadas anteriormente no cálculo energético de CCOs ou dos oceanos como um todo, iremos analisar a capacidade do Diagrama de Lorenz em calcular e descrever o sistema energético que seja deseja estudar. A escolha do Diagrama de Lorenz foi feita tendo em vista que a sua utilização permite uma visualização dos fluxos de energia, assim como a comparação entre os estoques de energia. O DL permite uma análise detalhada da região onde é utilizado, já que apresenta os termos de conversão entre as energias, relacionando diretamente os estoques das mesmas.

#### **1.4. Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é a avaliação do potencial de utilização do Diagrama de Lorenz como ferramenta de análise energética aplicada ao estudo de CCOs. Para tal, e tendo em vista o baixo número de trabalhos publicados nesta área com a CB, esta corrente foi selecionada como alvo desta avaliação, tendo sido escolhidas duas regiões específicas de seu *path* ao longo da costa brasileira: a região de Cabo Frio (RJ) e a região do Cone do Rio Grande (RS). A partir deste objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram organizados:

- Mensurar as conversões barotrópicas e baroclínicas nas duas regiões de estudo da Corrente do Brasil;
- Identificar processos de instabilidades baroclínicas e barotrópicas e possíveis causas;
- Identificar processos de sobre-estabilidade;
- Analisar os termos do Diagrama de Lorenz e caracterizar suas importâncias dentro da análise energética.

Após essa introdução, o capítulo 2 aborda a fundamentação teórica necessária para obtenção dos resultados deste trabalho. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para a análise do Diagrama de Lorenz como uma ferramenta de estudo energético de CCOs, o banco de dados utilizado e o cenário escolhido. O Capítulo 4 mostra os resultados dos cálculos dos balanços de energia obtidos a partir da utilização dos termos das equações do balanço de energia desenvolvidas no Capítulo 2. No Capítulo 5 os resultados são discutidos para analisar o potencial de utilização do DL como uma ferramenta de estudo energético de CCOs. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais obtidas a partir dos resultados deste trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

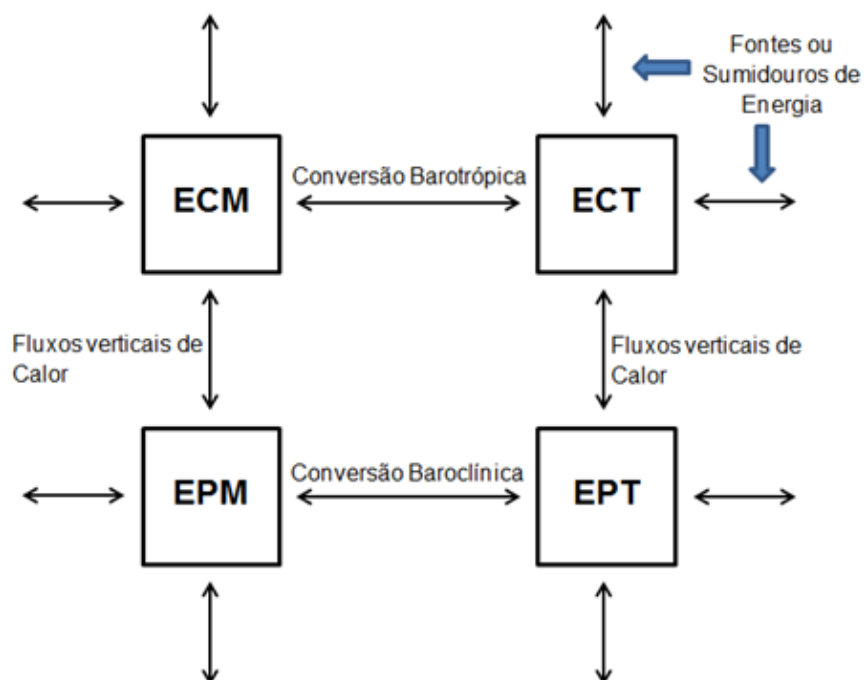
## CAPÍTULO 2

### DIAGRAMA DE LORENZ

Neste capítulo iremos descrever o Diagrama de Lorenz utilizado por [Cronin & Watts \(1996\)](#), que também será empregado neste trabalho, apresentando suas características e como ele é construído, passo a passo, até se chegar a sua forma final. Para isso, serão introduzidos alguns conceitos básicos necessários para sua construção e as equações do balanço das energias que compõem o diagrama.

#### 2.1. Características do Diagrama

O Diagrama de Lorenz apresenta os estoques de energia de quatro reservatórios energéticos (EPM, EPT, ECM, ECT) e suas inter-relações, assim como possíveis fontes e sumidouros de energia (Figura 5), podendo ser utilizado tanto para a atmosfera quanto para o oceano.



**Figura 5** - Representação simplificada do Diagrama de Lorenz.

Adaptado de [Azevedo et al. \(2008\)](#).

Através da análise destes estoques é possível realizar uma caracterização da dinâmica energética local, associando com as características da região. Os termos relacionados com cada reservatório são oriundos dos balanços de energia associados com cada reservatório. Estes balanços são feitos a partir das equações hidrodinâmicas de fluidos geostróficos, aplicadas no campo de escoamento que se deseja estudar. As equações resultantes (balanços) possuem os termos que serão analisados individualmente, pois estes representam processos (conversão, transferência, fonte ou sumidouro) associados aos respectivos estoques de energia. Para um melhor entendimento do DL empregado neste trabalho, alguns embasamentos teóricos serão brevemente apresentados a seguir.

## **2.2. Fundamentação Teórica**

A partir de agora apresentaremos uma breve descrição do conhecimento teórico necessário para a construção das equações dos balanços de energia que irão compor o Diagrama de Lorenz utilizado neste trabalho. Serão detalhados alguns aspectos relacionados com a teoria quase-geostrófica, necessária para a derivação das equações, e também uma breve introdução no conceito de instabilidades. Logo após serão apresentadas as equações dos balanços de energia que irão compor o Diagrama.

### **2.2.1. Teoria Quase-Geostrófica (QG)**

A teoria da quase-geostrofia avalia a importância dos termos das equações que serão utilizadas nos cálculos para suas escalas espaço-temporais, onde os termos de maior ordem (ordem  $R_o^2$ ) são negligenciados (apenas os termos de ordem  $R_o$  são considerados nas equações, tendo em vista que estes representam perturbações dos termos de menor ordem). O número de Rossby ( $R_o$ ) relaciona a escala de velocidade horizontal do movimento com a escala de comprimento horizontal do movimento, ou seja, ele avalia a importância da velocidade do movimento para sua escala espacial. Por isso os termos de maior ordem são negligenciados, já que os primeiros termos fornecem resultados suficientemente acurados para a variabilidade de mesoescala que será estudada neste trabalho.

A partir desta teoria, podemos decompor o campo de velocidade do escoamento em duas componentes: uma geostrófica e outra ageostrófica de maior ordem. A componente geostrófica caracteriza-se por um fluido inviscido com aceleração nula, equilíbrio hidrostático e divergente horizontal nulo com componentes evidenciadas pelo subíndice “g” na forma  $\mathbf{u}(u_g, v_g, 0)$ , onde  $\mathbf{u}$  é a forma vetorial das velocidades geostróficas,  $u_g$  e  $v_g$  são as componentes horizontais da velocidade (direção zonal e meridional, respectivamente) e a componente vertical é nula. Já na componente ageostrófica de maior ordem, têm-se um fluido não inviscido, acelerado e com divergente horizontal não nulo com componentes evidenciadas pelo subíndice “a” na forma  $\mathbf{u}_a(u_a, v_a, w_a)$ , onde  $\mathbf{u}_a$  é o vetor de velocidade ageostrófica,  $u_a$  e  $v_a$  são as componentes horizontais da velocidade nas direções zonal e meridional (respectivamente) e  $w_a$  é a componente vertical da velocidade (e.g. Gill, 1982; Pedlosky, 1987). Cabe aqui ressaltar que os termos em negrito identificam vetores. Com isso, podemos perceber que a velocidade total do escoamento  $\mathbf{U}$  pode ser descrita como  $\mathbf{U} = \mathbf{u} + \mathbf{u}_a$  (e.g. Gill, 1982; Cronin & Watts, 1996).

A Equação do Balanço Geostrófico no plano horizontal, onde a força de Coriolis é balanceada pela força do gradiente de pressão, é dada por:

$$f_o(\mathbf{k} \times \mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho_0} \nabla_h P \quad (2.1)$$

onde  $\rho_0$  é a densidade de referência ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mathbf{k}$  é um vetor unitário perpendicular ao plano horizontal do domínio,  $f_o$  é o parâmetro de Coriolis ( $s^{-1}$ ) na latitude central do domínio de estudo,  $P$  é a pressão dinâmica (Pa),  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade horizontal e  $\nabla_h$  representa o vetor gradiente horizontal.

Além disso, para um melhor entendimento do DL, são necessárias algumas considerações com relação ao campo de massa. De acordo com Oort et al. (1994), anomalias de densidade e temperatura são altamente correlacionadas, portanto, a temperatura é o termo dominante no perfil de densidade média gerado, o que resulta que a anomalia de salinidade é apenas complementar na determinação do perfil de densidade. Com isso, assumindo-se uma equação linear de estado da água do mar, podemos desprezar os efeitos da salinidade e considerar que a densidade  $\rho$  varie apenas com a temperatura  $T$ , ao assumir temos que:

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha T) \quad (2.2)$$

onde  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica do fluido ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) e  $T$  é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) (e.g. [Orlansky & Cox, 1973](#); [Oort et al., 1989](#); [Cronin & Watts, 1996](#)).

Considerando que o fluxo de calor quasi-horizontal conserva uma grande quantidade de calor, pela teoria geostrófica, o campo de temperatura pode ser decomposto em duas componentes: uma chamada de “campo básico”, e a variação deste campo básico. O campo básico  $\theta_{(z)}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) depende apenas da profundidade, onde a uma dada profundidade a temperatura é considerada a mesma em toda a extensão horizontal do domínio de estudo. Já a variação deste campo básico,  $\Delta T_{(x,y,z,t)}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), dinamicamente importante, é dependente das coordenadas espaciais  $x$ ,  $y$ ,  $z$  do sistema e também do tempo  $t$ , já que seria a variação espaço-temporal do campo básico. Ou seja, a temperatura  $T$  pode ser decomposta em ([Cronin & Watts, 1996](#)):

$$T_{(x,y,z,t)} = \theta_{(z)} + \Delta T_{(x,y,z,t)}. \quad (2.3)$$

Para desenvolvermos os balanços das energias cinética e potencial do escoamento, uma nova decomposição deve ser feita sob o campo dinâmico da temperatura, onde novamente este será dividido em uma componente média e outra turbulenta, seguindo a técnica onde  $a = \bar{a} + a'$  (e.g. [Brooks & Niiler, 1977](#)). Esta decomposição em uma componente média e outra turbulenta (ou flutuante) é de extrema importância para o entendimento do DL e de seus termos, já que este apresenta as variações de cada forma de energia no escoamento geofísico. Portanto, segue-se que ([Cronin & Watts, 1996](#))

$$\Delta T_{(x,y,z,t)} = \overline{\Delta T}_{(x,y,z)} + T'_{(x,y,z,t)}. \quad (2.4)$$

Em (2.4) a variável  $\overline{\Delta T}_{(x,y,z)}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) é a média dos desvios da temperatura instantânea, e  $T'$  é a variação deste desvio com relação à média dos desvios, ou seja,  $\overline{\Delta T} \gg T'$ .

Essa distinção entre  $\overline{\Delta T}$  e  $T'$  é de extrema importância quando formos calcular os balanços de EPM e EPT, já que estão diretamente ligados a estas variáveis, assim como o cálculo do campo básico. Alguns estudos recentes (e.g. [Von Storch et al., 2012](#); [Kang & Curchitser, 2015](#)) utilizam o que chamam de “Ciclo de



Energia de Lorenz”, o qual leva em conta a densidade, e não apenas a temperatura na estimativa dos campos de massa, ressaltam a importância da escolha do campo básico no cálculo da energia potencial, em especial no cálculo da EPM.

A partir destas decomposições, podemos obter o valor do campo de massa médio final  $\bar{T}_{(x,y,z)}$  (°C), em função apenas da temperatura, que não varia no tempo, somando ao campo básico a média temporal dos desvios do próprio campo básico, ou seja,

$$\bar{T}_{(x,y,z)} = \theta_{(z)} + \overline{\Delta T}_{(x,y,z)}. \quad (2.5)$$

Iremos descrever agora, com base na teoria quase-geostrófica, a Equação do Balanço Hidrostático seguida da Equação da Conservação do *Momentum* de O ( $R_o$ ), sem a inclusão do termo de atrito, e no plano  $\beta$ , respectivamente, utilizando a mesma notação de [Cronin & Watts \(1996\)](#):

$$0 = -\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial P}{\partial z} + g\alpha\Delta T \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla_h) \mathbf{u} + \beta y (\mathbf{k} \times \mathbf{u}) + f_0 (\mathbf{k} \times \mathbf{u}_a) = 0 \quad (2.7)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ),  $\beta$  é a variação do parâmetro de Coriolis de acordo com a latitude ( $m^{-1}s^{-1}$ ) e  $\mathbf{k}$  está associado ao eixo vertical do sistema de coordenadas. Como as componentes geostróficas da velocidade possuem uma magnitude muito maior do que as componentes ageostróficas, nos termos de aceleração local, advectivo e de correção do parâmetro de Coriolis devido ao plano  $\beta$  (três primeiros termos da Equação 2.7), as componentes ageostróficas foram negligenciadas (e.g. [Cushman-Roisin, 1994](#)).

A variável velocidade que consta na Equação (2.7) pode ser decomposta a partir da utilização de  $\mathbf{a} = \bar{\mathbf{a}} + \mathbf{a}'$  nos termos de velocidade, conforme segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}')}{\partial t} + ((\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}') \cdot \nabla_h) (\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}') + \beta y (\mathbf{k} \times (\bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}')) \\ + f_0 (\mathbf{k} \times (\bar{\mathbf{u}}_a + \mathbf{u}'_a)) = 0. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Este procedimento (Cronin & Watts, 1996) resulta em uma equação com as variáveis médias e turbulentas da Equação da Conservação do *Momentum* de  $O(R_o)$ . A promediação desta equação tem como resultado:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h) \bar{\mathbf{u}} + \overline{(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \mathbf{u}'} + \beta \gamma (\mathbf{k} \times \bar{\mathbf{u}}) + f_0 (\mathbf{k} \times \bar{\mathbf{u}}_a) = 0. \quad (2.9)$$

Esta é a Equação Média da Conservação do *Momentum* Horizontal, que será utilizada posteriormente para o desenvolvimento da equação do balanço da ECM. Para o cálculo posterior da equação do balanço da ECT, utilizaremos a componente turbulenta da Equação da Conservação do *Momentum*, através da subtração da Equação (2.9) pela Equação (2.8), ou seja, a equação total menos a média. O resultado, que introduz a Equação Turbulenta da Conservação do *Momentum* Horizontal, segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} + (\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \bar{\mathbf{u}} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h) \mathbf{u}' + [(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \mathbf{u}' - \overline{(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \mathbf{u}'}] \\ + \beta \gamma (\mathbf{k} \times \mathbf{u}') + f_0 (\mathbf{k} \times \mathbf{u}'_a) = 0. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Segue ainda, tendo em vista a composição futura do diagrama de Lorenz, a Equação da Conservação do Calor de  $O(R_o)$ , que é dada por (e.g. Holton, 1992):

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla_h) \Delta T + w_a \theta_z = 0 \quad (2.11)$$

onde foi negligenciada a derivada vertical da perturbação da temperatura, por esta ser muito menor do que a derivada vertical do campo básico  $\theta_z$ .

Cabe ressaltar ao leitor a diferença entre os termos  $\theta_{(z)}$  e  $\theta_z$ . O primeiro é o campo básico, e indica que a variável possui um valor para cada profundidade, ou seja, é função de  $z$  (profundidade). Já o segundo representa a derivada deste campo básico com relação à  $z$ .

## 2.2.2. Instabilidades

O conceito de instabilidade é muito importante na dinâmica dos oceanos e, conseqüentemente, possui uma grande importância no estudo das interações entre as formas de energia encontradas neste meio.

Todo o escoamento geofísico que se encontra em balanço geostrófico está propenso à ocorrência de instabilidades. Estas são responsáveis pela “drenagem” de energia do campo médio para o campo turbulento do escoamento. Processos de instabilidade são caracterizados pelo aumento contínuo da energia turbulenta do escoamento. A partir disto, podemos caracterizar dois tipos diferentes de instabilidades dinâmicas: a barotrópica e a baroclínica. A instabilidade barotrópica ocorre a partir do cisalhamento horizontal do campo médio de velocidade, à custa do consumo da energia cinética associada a este campo, com conversão de ECM para ECT, denominada conversão barotrópica. Quando a conversão se dá no sentido contrário, do campo turbulento para o médio, o processo é chamado de “sobre-estabilidade” barotrópica.

O outro tipo de instabilidade é a baroclínica, que ocorre à custa do consumo do campo médio de energia potencial, mediante o relaxamento da inclinação das superfícies isopicnais do fluido, decorrendo em uma transferência indireta de energia do campo de massa para o campo de escoamento (i.e., de EPM para ECT). Este tipo de instabilidade está associado ao cisalhamento vertical do campo médio de velocidade do escoamento, que gera gradientes horizontais de temperatura, e assim, energia potencial disponível, a qual pode ser liberada e transferida para as perturbações (Pedlosky, 1987). A energia potencial disponível é a quantidade dinamicamente relevante da EP, e que pode ser definida como a diferença entre a energia potencial observada e a energia potencial deste mesmo fluido caso fosse adiabaticamente reconfigurado de modo que suas superfícies isopicnais ficassem planas. (Lorenz, 1955).

O processo de instabilidade baroclínica se dá, então, mediante a conversão de EPM em EPT, e esta em ECT. Apenas o processo de transferência de EPM em EPT é chamado de conversão baroclínica. Se este for seguido por um fluxo vertical de calor contra o gradiente do campo de temperatura, ocorrerá a conversão de EPT para ECT, e, portanto, se estabelecerá a instabilidade baroclínica. Esta advecção líquida de calor na vertical, que tem como resultado a redução da cota vertical da posição do centro de massa da coluna d'água, está diretamente ligada à componente divergente do fluxo de calor médio turbulento (Marshall & Shutts, 1981; Cronin & Watts, 1996; Bishop et al, 2013). Como não é objetivo deste trabalho estimar as componentes divergente e não-divergente do fluxo de calor turbulento

médio, tendo em vista a extrema complexidade do assunto, iremos adotar o desenvolvimento tradicional do cálculo do termo CBC, ressaltando também a metodologia de [Cronin & Watts \(1996\)](#), que utiliza um fator dois como divisor entre a componente divergente e a não-divergente.

A partir de agora iremos apresentar as equações de balanço de energia que compõem o Diagrama de Lorenz utilizado em [Cronin & Watts \(1996\)](#) e adotado neste trabalho. Estas equações são fundamentadas na teoria já apresentada neste capítulo, e permitirão a montagem deste DL passo a passo.

### 2.3. Equação do Balanço da Energia Cinética Turbulenta

A energia cinética turbulenta pode ser considerada como a variabilidade associada ao campo médio de velocidade, e é de extrema importância no estudo da energética do oceano, sendo responsável pela “drenagem” de energia do campo médio.

A energia cinética turbulenta do escoamento, por unidade de massa, em um dado volume elementar, é dada por:

$$ECT \cong \frac{\overline{\mathbf{u}'^2}}{2} = \frac{\overline{u_g'^2 + v_g'^2}}{2} \quad (2.12)$$

Conforme [Cronin & Watts \(1996\)](#), podemos ainda definir uma  $ECT'$  não promediada no tempo:

$$ECT' \cong \frac{\mathbf{u}'^2}{2} = \frac{u_g'^2 + v_g'^2}{2} \quad (2.13)$$

Iremos apresentar agora o balanço da ECT, com a finalidade de montar o Diagrama de Lorenz, representando seus termos que irão compor este diagrama. Este balanço é obtido através da soma de duas promediações, ou seja: (1) do produto escalar entre a Equação Turbulenta da Conservação do *Momentum* Horizontal (Equação 2.10) e a componente turbulenta do vetor velocidade ( $\mathbf{u}'$ ), e (2) do produto escalar entre a Equação do Balanço Hidrostático (Equação 2.6) e a velocidade vertical ageostrófica turbulenta ( $w_a'$ ), ou seja,

$$\text{Balanço } ECT = \overline{\mathbf{u}' \cdot (\text{equação 2.10})} + \overline{w_a' \cdot (\text{equação 2.6})} \quad (2.14)$$

Portanto segue que o resultado da Equação (2.14), com a substituição de  $\Delta T = \overline{\Delta T} + T'$  e com a consideração que  $\overline{u' \bar{u}} = 0$ , é:

$$\begin{aligned} \underbrace{\overline{\mathbf{u}' \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} \right)}}_1 &= \underbrace{-\overline{\mathbf{u}' \cdot [(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \bar{\mathbf{u}}]}}_2 - \underbrace{\overline{\mathbf{u}' \cdot [(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h) \mathbf{u}']}}_3 - \underbrace{\overline{\mathbf{u}' \cdot [(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \mathbf{u}']}}_4 \\ &\quad - \underbrace{\overline{\mathbf{u}' \cdot [\beta y (\mathbf{k} \times \mathbf{u}')]}}_5 - \underbrace{\overline{\mathbf{u}' \cdot [f_0 (\mathbf{k} \times \mathbf{u}'_a)]}}_6 - \underbrace{\overline{\left[ \frac{w'_a}{\rho_0} \frac{\partial p'}{\partial z} \right]}}_7 + \underbrace{g \alpha w'_a T'}_8 \end{aligned} \quad (2.15)$$

O primeiro termo representa a variação local de ECT, e é igual a zero, pois estamos considerando o estado estacionário do escoamento, ou seja,  $\overline{\mathbf{u}' \cdot \left( \frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} \right)} = \frac{\partial \overline{\mathbf{u}' \cdot \mathbf{u}'}}{\partial t} = \frac{\partial (ECT)}{\partial t} = 0$ .

O segundo termo, depois de desenvolvido, resulta em:

$$-\overline{\mathbf{u}' \cdot [(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \bar{\mathbf{u}}]} = - \left[ \overline{u'_g u'_g} \frac{\partial \bar{u}_g}{\partial x} + \overline{u'_g v'_g} \left( \frac{\partial \bar{u}_g}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_g}{\partial x} \right) + \overline{v'_g v'_g} \frac{\partial \bar{v}_g}{\partial y} \right] \quad (2.16)$$

Este é o termo de conversão barotrópica, que indica a taxa com que a ECM se converte em ECT, ou com que a ECT se converte em ECM, dependendo do seu sinal resultante. Percebe-se que este termo depende do cisalhamento horizontal do campo médio de velocidade do escoamento. Quando positivo, indica que energia cinética está sendo transferida do campo médio de larga escala para o turbulento de mesoescala, indicando assim a conversão de ECM em ECT. Quando negativo, este termo indica uma condição de sobre-estabilidade barotrópica, quando então energia cinética do campo turbulento de mesoescala do escoamento está sendo repassada para o seu campo médio de larga escala. Ressalva-se a utilização dos termos "larga escala" e "mesoescala" que se justificam pela escala espaço-temporal analisada no presente trabalho, apesar do DL poder ser desenvolvido para qualquer etapa da cascata de energia.

O desenvolvimento do terceiro termo da Equação (2.15) resulta em:

$$-\overline{\mathbf{u}' \cdot [(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h) \mathbf{u}']} = -\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h ECT \quad (2.17)$$

Este é o termo de advecção da ECT pelo escoamento médio (AECT\_EM).

De forma análoga, o seu quarto termo, quando desenvolvido, resulta:

$$-\overline{\mathbf{u}' \cdot [(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \mathbf{u}']} = -\nabla_h \cdot \overline{\mathbf{u}' ECT'} \quad (2.18)$$

o qual corresponde à advecção da ECT pelo escoamento turbulento (AECT\_ET). Se considerarmos o domínio total dividido em volumes elementares, estes termos (terceiro e quarto) representam sumidouros ou fontes de ECT (Kundu & Cohen, 1990). Se considerarmos o domínio de estudo inteiro, estes termos representam a redistribuição do campo turbulento no escoamento.

O quinto termo da Equação (2.15), após seu desenvolvimento matemático, resulta nulo. Os sexto e o sétimo termos são, respectivamente, o trabalho horizontal da pressão turbulenta média pelo escoamento turbulento (THP\_ET), e o trabalho vertical da pressão turbulenta média pelo escoamento turbulento (TVP\_ET). O termo THP\_ET atua apenas na redistribuição espacial da energia (Gill, 1982), e como possui a componente ageostrófica do escoamento, ele caracteriza a redistribuição do trabalho realizado pelos gradientes de pressão no escoamento ageostrófico. Quando desenvolvido, o termo 6 resulta em:

$$\overline{\mathbf{u}' \cdot f_0(\mathbf{k} \times \mathbf{u}'_a)} = \overline{\left(\mathbf{k} \times \nabla_h \frac{1}{f_0 \rho_0} P'\right) \cdot (f_0(\mathbf{k} \times \mathbf{u}'_a))} = \overline{\frac{u'_a}{\rho_0} \nabla_h P'} \quad (2.19)$$

O último termo é chamado de fluxo de calor vertical pelo escoamento turbulento (FCV\_ET), e é associado ao processo de instabilidade baroclínica, pois liga os reservatórios de ECT e de EPT. O termo FCV\_ET é responsável pela mudança na posição do centro de massa do fluido, que está associada com fluxos verticais de calor, como pode ser percebido através do termo  $\overline{w'_a T'}$  que consta em seu cálculo. Este fluxo vertical de calor altera a pressão hidrostática local e, conseqüentemente, resultando em um trabalho da pressão sob o escoamento turbulento (ou médio, no caso do balanço de ECM). Quando este termo é positivo, significa que está ocorrendo uma subida de água quente ou uma descida de água fria, indicando uma conversão de EPT em ECT (Cronin & Watts, 1996; Oliveira, 2008). A nomenclatura dos termos segue Azevedo et al. (2008).

A equação resultante final do balanço de ECT será então dada por:

$$\underbrace{\frac{\partial(ECT)}{\partial t}}_{\text{Variação local da ECT}} = - \underbrace{\left[ \overline{u'_g u'_g} \frac{\partial \overline{u}_g}{\partial x} + \overline{u'_g v'_g} \left( \frac{\partial \overline{u}_g}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v}_g}{\partial x} \right) + \overline{v'_g v'_g} \frac{\partial \overline{v}_g}{\partial y} \right]}_{\text{CBT}} \underbrace{- \overline{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h ECT}_{\text{AECT\_EM}} \quad (2.20)$$

$$\underbrace{- \nabla_h \cdot \overline{\mathbf{u}' ECT'}}_{\text{AECT\_ET}} - \underbrace{\frac{\overline{\mathbf{u}'_a} \cdot \nabla_h P'}{\rho_0}}_{\text{THP\_ET}} - \underbrace{\frac{\overline{w'_a} \partial P'}{\rho_0 \partial z}}_{\text{TVP\_ET}} + \underbrace{g \alpha \overline{w'_a T'}}_{\text{-FCV\_ET}}$$

É importante ressaltar que os dois últimos termos se anulam (TVP\_ET+FCV\_ET=0), porém, não podem ser excluídos, pois, segundo [Cronin & Watts \(1996\)](#), são os responsáveis pelo acoplamento entre o campo de massa e o campo de velocidade do escoamento.

## 2.4. Equação do Balanço da Energia Cinética Média

A energia cinética média do escoamento, por unidade de massa, em um conhecido volume elementar, é dada por:

$$ECM \cong \frac{\overline{\mathbf{u}\mathbf{u}}}{2} = \frac{\overline{u_g^2 + v_g^2}}{2} \quad (2.21)$$

A promediação do produto escalar entre o vetor velocidade média ( $\overline{\mathbf{u}}$ ) e a Equação Média da Conservação do *Momentum* (Equação 2.9) somada ao produto escalar entre a velocidade vertical média ageostrófica ( $\overline{w}_a$ ) e a Equação do Balanço Hidrostático (Equação 2.6), resulta na Equação do Balanço da Energia Cinética Média, como se segue:

$$\text{balanço ECM} = \overline{\mathbf{u}} \cdot (\text{equação 2.9}) + \overline{w}_a \cdot (\text{equação 2.6}) \quad (2.22)$$

Portanto segue que o resultado da Equação (2.22) é dado por:

$$\underbrace{\overline{\mathbf{u}} \cdot \left( \frac{\partial \overline{\mathbf{u}}}{\partial t} \right)}_1 = \underbrace{- \overline{\mathbf{u}} \cdot [(\overline{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h) \overline{\mathbf{u}}]}_2 - \underbrace{- \overline{\mathbf{u}} \cdot [(\overline{\mathbf{u}'} \cdot \nabla_h) \overline{\mathbf{u}'}]}_3 - \underbrace{- \overline{\mathbf{u}} \cdot [\beta \gamma (\mathbf{k} \times \overline{\mathbf{u}})]}_4$$

$$\underbrace{- \overline{\mathbf{u}} \cdot [f_0 (\mathbf{k} \times \overline{\mathbf{u}}_a)]}_5 - \underbrace{- \frac{\overline{w}_a \partial \overline{P}}{\rho_0 \partial z}}_6 + \underbrace{g \alpha \overline{w}_a \overline{\Delta T}}_7 \quad (2.23)$$

Após uma extensa manipulação matemática, a Equação (2.23) resulta em:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(ECM)}{\partial t} = & \underbrace{-\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h ECM}_{2} + \underbrace{\left[ u'_g u'_g \frac{\partial \bar{u}_g}{\partial x} + u'_g v'_g \left( \frac{\partial \bar{u}_g}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_g}{\partial x} \right) + v'_g v'_g \frac{\partial \bar{v}_g}{\partial y} \right]}_{3} - \\ & \underbrace{\left( u'_g \frac{\partial \bar{u}_g u'_g}{\partial x} + v'_g \frac{\partial \bar{u}_g u'_g}{\partial y} + u'_g \frac{\partial \bar{v}_g v'_g}{\partial x} + v'_g \frac{\partial \bar{v}_g v'_g}{\partial y} \right)}_{4} - \underbrace{\frac{\bar{\mathbf{u}}_a \cdot \nabla_h \bar{P}}{\rho_o}}_{5} - \underbrace{\frac{\bar{w}_a \partial \bar{P}}{\rho_o \partial z}}_{6} + \underbrace{g \alpha \bar{w}_a \Delta T}_{7} \quad (2.24) \end{aligned}$$

Analisando os termos da Equação (2.24), o primeiro termo será novamente zerado devido à condição de escoamento estacionário. O segundo termo representa a advecção de ECM pelo escoamento médio (AECM\_EM), e considerando o domínio completo estudado, quando positivo significa uma fonte de ECM, e quando negativo, um sumidouro de ECM. Ele surge através da decomposição de:

$$-\bar{\mathbf{u}} \cdot [(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h) \bar{\mathbf{u}}] = -\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h ECM \quad (2.25)$$

O terceiro termo da Equação (2.24) é o termo de conversão barotrópica, igual ao do balanço da ECT, porém com sinal contrário, indicando a existência de uma "mão dupla" entre os reservatórios de ECM e de ECT. O quarto termo é chamado em Cronin & Watts (1996) como o produto de tensões turbulentas pela taxa de deformação do campo médio (TECM\_TR). Ambos os termos surgem da manipulação algébrica do terceiro termo da Equação (2.23):

$$\begin{aligned} -\bar{\mathbf{u}} \cdot [(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \mathbf{u}'] = & \left[ \frac{u'_g u'_g}{\partial x} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{u'_g v'_g}{\partial y} \left( \frac{\partial \bar{u}_g}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}_g}{\partial x} \right) + \frac{v'_g v'_g}{\partial y} \frac{\partial \bar{v}_g}{\partial y} \right] - \\ & \left[ \frac{\partial u'_g u'_g \bar{u}_g}{\partial x} + \frac{\partial u'_g v'_g \bar{u}_g}{\partial y} + \frac{\partial v'_g u'_g \bar{v}_g}{\partial x} + \frac{\partial v'_g v'_g \bar{v}_g}{\partial y} \right] \quad (2.26) \end{aligned}$$

O quinto termo e o sexto termo da Equação (2.24) se assemelham aos termos seis e sete do balanço da ECT, porém estão relacionados com o escoamento médio, e não com o turbulento. Portanto, o quinto termo é chamado de trabalho horizontal da pressão turbulenta média pelo escoamento médio (THP\_EM), e o sexto seria o trabalho vertical da pressão turbulenta média pelo escoamento médio (TVP\_EM). Estes termos possuem significados semelhantes aos termos do balanço de ECT.



O quinto termo surge de:

$$\overline{\mathbf{u} \cdot f_0(\mathbf{k} \times \bar{\mathbf{u}}_a)} = \overline{(\mathbf{k} \times \nabla_h \frac{1}{f_0 \rho_0} \bar{P}) \cdot (f_0(\mathbf{k} \times \bar{\mathbf{u}}_a))} = \frac{\overline{\mathbf{u}_a \cdot \nabla_h \bar{P}}}{\rho_0} \quad (2.27)$$

O ultimo termo da Equação (2.24) é o fluxo de calor vertical pelo escoamento médio (FCV\_EM), que novamente é equilibrado pelo trabalho vertical da pressão, porém não podendo ser excluídos por representarem o acoplamento entre os campos de massa e de velocidade do escoamento (Cronin & Watts, 1996).

## 2.5. Equação do Balanço da Energia Potencial Turbulenta

Segundo LeBlond & Mysak (1978), a energia potencial turbulenta, por unidade de massa, em um dado volume elementar, pode ser calculada como:

$$EPT = \frac{g\alpha}{2\theta_z} \overline{T'^2} \quad (2.28)$$

Ou ainda, na sua forma instantânea:

$$EPT' = \frac{g\alpha}{2\theta_z} T'^2 \quad (2.29)$$

O balanço da EPT é calculado pela promediação da multiplicação da Equação da Conservação do Calor (Equação 2.11), em sua forma turbulenta, pelo fator  $g\alpha T'/\theta_z$  (Cronin & Watts, 1996), o que resulta em:

$$\begin{aligned} \underbrace{\left(\frac{g\alpha T'}{\theta_z}\right) \frac{\partial T'}{\partial t}}_1 &= - \underbrace{\left(\frac{g\alpha T'}{\theta_z}\right) (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h) T'}_2 - \underbrace{\left(\frac{g\alpha T'}{\theta_z}\right) (\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) \bar{\Delta T}}_3 \\ &\quad - \underbrace{\left(\frac{g\alpha T'}{\theta_z}\right) (\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) T'}_4 - \underbrace{g\alpha w'_a T'}_5 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Analisando termo por termo, teremos novamente o primeiro termo igualado a zero devido à característica estacionária do nosso escoamento.

O segundo e o quarto termos representam a advecção da EPT pelo escoamento médio (AEPT\_EM) e a advecção da EPT pelo escoamento turbulento (AEPT\_ET), respectivamente. A mesma análise feita para estes termos na equação da ECT pode ser feita aqui, em relação a eles poderem ser considerados fontes ou

sumidouros de energia. Segue abaixo o resultado do cálculo destes termos, respectivamente, após extensa manipulação matemática:

$$-\overline{\left(\frac{g\alpha T'}{\theta_z}\right)(\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h)T'} = -\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h EPT \quad (2.31)$$

$$-\overline{\left(\frac{g\alpha T'}{\theta_z}\right)(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h)T'} = -\nabla_h \cdot \overline{\mathbf{u}' EPT'} \quad (2.32)$$

O terceiro termo representa a conversão baroclínica. Este termo quando positivo indica um fluxo de calor turbulento horizontal  $\overline{\mathbf{u}'T'}$  contra o gradiente do campo de temperatura média, ocorrendo assim a conversão de EPM em EPT. Esta é a primeira parte de um processo de instabilidade baroclínica. O desenvolvimento deste termo resulta na Equação (2.33):

$$-\overline{\left(\frac{g\alpha T'}{\theta_z}\right)(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h)\Delta\bar{T}} = -\frac{g\alpha}{\theta_z} \overline{\mathbf{u}'T'} \cdot \nabla_h \bar{T} \quad (2.33)$$

O ultimo termo é o fluxo de calor vertical pelo escoamento turbulento (FCV\_ET), e seu sinal é contrário ao sinal no balanço da ECT, demonstrando assim o sentido contrário da conversão de EPT em ECT.

Com isso chegamos à equação final do balanço da EPT:

$$\underbrace{\frac{\partial(EPT)}{\partial t}}_{\text{Variação local de EPT}} = \underbrace{-\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h EPT}_{AEPT\_EM} - \underbrace{\nabla_h \overline{\mathbf{u}' EPT'}}_{AEPT\_ET} - \underbrace{\frac{g\alpha}{\theta_z} \overline{\mathbf{u}'T'} \cdot (\nabla_h \bar{T})}_{CBC} - \underbrace{g\alpha \overline{T'w'_a}}_{FCV\_ET} \quad (2.34)$$

## 2.6. Equação do Balanço da Energia Potencial Média

A energia potencial média, por unidade de massa, em um dado volume elementar, pode ser calculada como:

$$EPM = \frac{g\alpha}{2\theta_z} (\Delta\bar{T})^2 \quad (2.35)$$

A multiplicação da Equação da Conservação do Calor (Equação 2.11), em sua forma promediada, pelo fator  $g\alpha\Delta\bar{T}/\theta_z$ , resulta em:

$$\underbrace{\frac{g\alpha\Delta\bar{T}}{\theta_z} \frac{\partial\Delta\bar{T}}{\partial t}}_1 = - \underbrace{\frac{g\alpha\Delta\bar{T}}{\theta_z} \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h \Delta\bar{T}}_2 - \underbrace{\frac{g\alpha\Delta\bar{T}}{\theta_z} \overline{(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h)T'}}_3 - \underbrace{g\alpha \bar{w}_a \Delta\bar{T}}_4 \quad (2.36)$$

Analisando termo a termo, o primeiro representa a variação local da EPM e novamente será nulo. O segundo termo representa a advecção da EPM pelo escoamento médio (AEPM\_EM), possuindo a mesma característica de fonte ou sumidouro do termo AECM\_EM no balanço da ECM.

$$\frac{g\alpha\overline{\Delta T}}{\theta_z} \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h \overline{\Delta T} = \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h EPM \quad (2.37)$$

O terceiro termo após uma extensa manipulação matemática resulta em dois outros termos:

$$\frac{g\alpha\overline{\Delta T}}{\theta_z} \overline{(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) T'} = \frac{g\alpha}{\theta_z} \overline{(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) T' (\overline{\Delta T})} + \frac{g\alpha}{\theta_z} \overline{\mathbf{u}' T'} \nabla_h \bar{T} \quad (2.38)$$

O primeiro deles representa o transporte de EPM pelo escoamento turbulento (TEPM\_ET), enquanto que o segundo termo é novamente o termo de CBC, igual ao termo da equação do balanço de EPT, porém com sinal contrário, evidenciando o sentido das conversões ("mão dupla") entre EPM e EPT.

O último termo da Equação (2.36) representa o fluxo de calor vertical pelo escoamento médio (FCV\_EM), novamente equilibrado pelo trabalho vertical da pressão da equação do balanço da ECM (TVP\_EM), responsáveis pelo acoplamento entre os campos de massa e de escoamento.

A equação final do balanço da EPM é dada por:

$$\underbrace{\frac{\partial(EPM)}{\partial t}}_{\text{Variação local de EPM}} = \underbrace{-\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla_h EPM}_{\text{AEPM\_EM}} - \underbrace{\frac{g\alpha}{\theta_z} \overline{(\mathbf{u}' \cdot \nabla_h) T' (\overline{\Delta T})}}_{\text{TEPM\_EM}} + \underbrace{\frac{g\alpha}{\theta_z} \overline{\mathbf{u}' T'} \nabla_h \bar{T}}_{\text{-CBC}} - \underbrace{g\alpha \bar{w}_a \overline{\Delta T}}_{\text{FCV\_EM}} \quad (2.39)$$

## 2.7. Representação do Diagrama de Lorenz

Após o estabelecimento das quatro equações de balanço de energia dos reservatórios energéticos do DL, seguindo a metodologia de [Cronin & Watts \(1996\)](#), podemos agora montar o diagrama, em sua parte final, com a representação das quatro caixas de energias, suas fontes e sumidouros, os termos de conversão de uma energia em outra e o acoplamento entre as caixas de EC e de EP. Este

acoplamento interliga o campo de massa com o de velocidade do escoamento, conforme Cronin & Watts (1996). O DL final é mostrado na Figura 6.

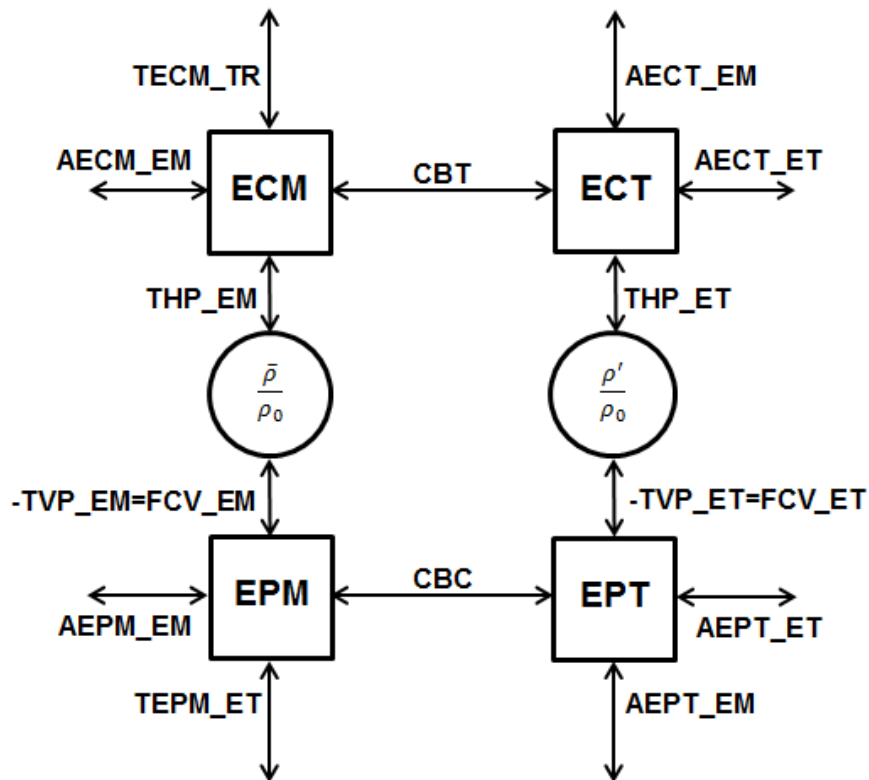


Figura 6 - Diagrama de Lorenz, adaptado de Azevedo *et al.* (2008).

Cabe aqui destacar o sentido físico dos termos de conversão do diagrama. A conversão barotrópica, que envolve os dois tipos de energia cinética (média e turbulenta), é realizada através de trabalho mecânico, forçando um processo de convecção de calor. A conversão baroclínica, que envolve os dois tipos de energia potencial, é um processo termodinâmico, envolvendo fluxos de calor, gerando espontaneamente um processo de convecção. Dimensionalmente, se dividirmos estes termos de conversão por unidade de massa, teremos o valor desta conversão em unidade de potência, o *Watt*.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAL E MÉTODOS

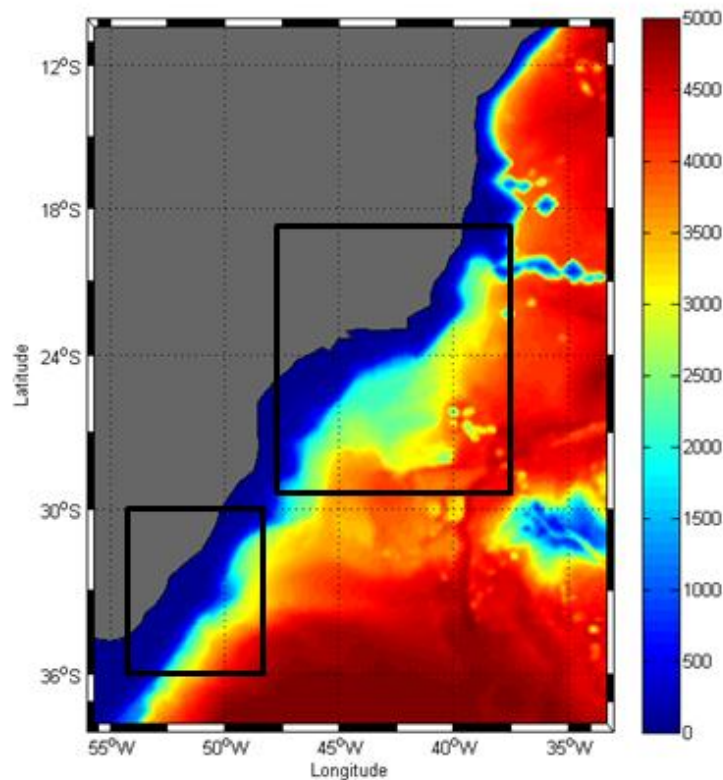
Neste capítulo iremos apresentar a metodologia utilizada para a análise do Diagrama de Lorenz como uma ferramenta de estudo energético de CCOs, assim como introduziremos o banco de dados utilizado e o cenário escolhido.

#### 3.1. A Metodologia e Cenários Escolhidos

A metodologia utilizada neste trabalho seguiu dois passos. Primeiramente foi realizada uma avaliação prévia da dinâmica local de duas regiões escolhidas através do cálculo das duas formas de energia (EC e EP), em suas formas média e turbulenta, e dos termos de conversão barotrópica e baroclínica. O segundo passo foi a escolha de três transectos estrategicamente posicionados em cada uma das regiões, para avaliar o potencial de utilização do DL como ferramenta de análise energética, tendo em vista que uma análise energética de cada região já foi previamente realizada. As duas regiões escolhidas para a análise dos transectos são mostradas na Figura 7.

A análise do potencial de utilização do Diagrama de Lorenz como ferramenta de análise energética de CCOs será feita através da análise dos resultados dos termos que compõem o referido diagrama nos transectos selecionados, baseados nos resultados da análise dos fluxos de energia, indicando possíveis evoluções de instabilidades, baroclínicas ou barotrópicas, assim como fluxos advectivos. Uma delas, a região de Cabo Frio, possui uma dinâmica local relativamente bem estudada na literatura (Signorini, 1978, 1989; Müller et al., 1998; Silveira et al. 2000a, 2004, 2008; Calado, 2006; Cerrone, 2010; Belo, 2011; Rocha et al., 2014). Neste trabalho, espera-se que o DL reproduza, em termos energéticos, os processos dinâmicos associados a CB que são encontrados nesta região. Já a segunda região, na costa gaúcha do Brasil, carece de um melhor entendimento da sua dinâmica local (Soares, 2005; Nardi, 2013). A escolha desta região deve-se,

principalmente, à existência de uma conhecida feição batimétrica local, o Cone do Rio Grande, onde se observará como o DL reproduzirá, energeticamente, os processos dinâmicos esperados para a CB, em virtude desta feição com que ela se depara em seu *path*.

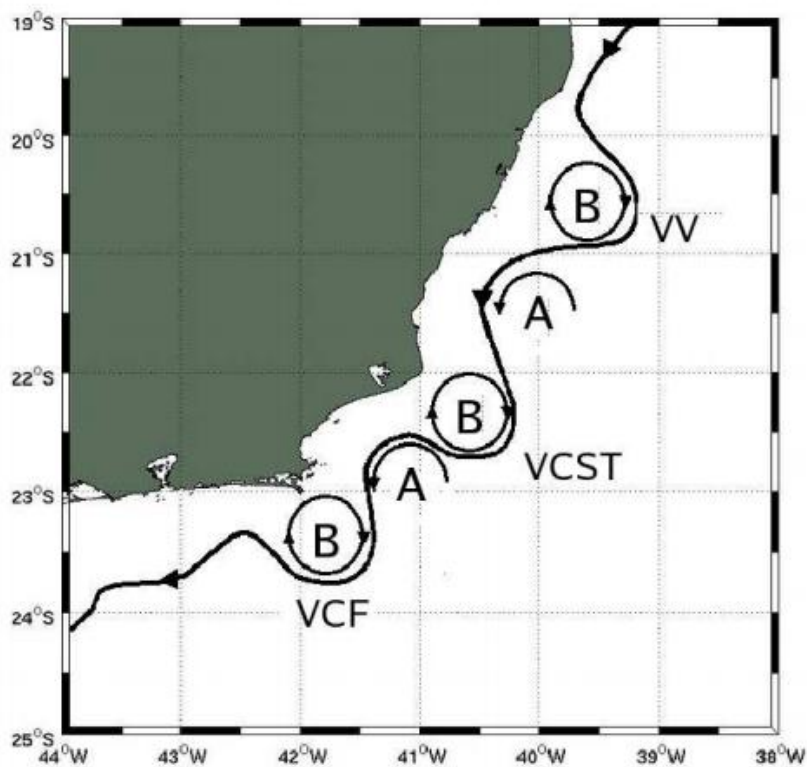


**Figura 7** - Mapa batimétrico de toda a região da CB (valores em metros) com a representação das duas regiões de ênfase neste trabalho (retângulos em preto). O retângulo mais ao norte representa a região de Cabo Frio e o retângulo mais ao sul representa a região do Cone do Rio Grande.

A região mais ao norte compreende a região de Cabo Frio, contendo a Bacia de Santos e a Bacia de Campos. Essa é a região da CB mais estudada, e que atualmente vem recebendo mais aporte financeiro em termos de pesquisa devido à sua importância econômica em relação à descoberta do pré-sal. Esta região é conhecida na literatura por apresentar grande atividade turbulenta e consequente liberação de vórtices oceânicos (e.g. [Mascarenhas et al., 1971](#); [Garfield, 1990](#); [Campos et al., 1995](#)). Espera-se que o DL retrate este comportamento. Uma das

feições oceânicas resultantes dos meandramentos da CB nesta região que apresenta maior ocorrência é o Vórtice de Vitória (Schimid *et al.*, 1995; Gaeta *et al.*, 1999; Campos, 2006).

A brusca alteração na direção da linha de costa nesta região também é outro fator importante nos processos de transferência de energia (Calado, 2001). Isto ocorre pelo princípio da conservação da vorticidade potencial, onde a corrente tende a meandrar quando a sua profundidade local é alterada repentinamente. Esse meandramento pode vir seguido da liberação de vórtices, caso a energia turbulenta aumente continuamente, caracterizando assim um processo de instabilidade no escoamento. O vórtice de Cabo Frio foi descrito através de dados hidrográficos por Mascarenhas *et al.* (1971), seguido pela descrição mais detalhada da sua estrutura baroclínica por Silveira *et al.* (2004)(Figura 8).



**Figura 8** - Representação do meandramento da CB, com a representação da zona de formação dos principais vórtices: VV (vórtice de Vitória), VCST (vórtice do Cabo de São Tomé) e VCF (vórtice de Cabo Frio). A sigla “A” significa centro de alta pressão, “B” centro de baixa pressão. Fonte: Calado (2006).

A segunda região que será enfatizada neste trabalho localiza-se mais ao sul do Brasil. A feição topográfica conhecida como Cone do Rio Grande possui características semelhantes à feição chamada de Charleston Bump, encontrada ao longo do caminho da Corrente do Golfo (Brooks & Bane, 1978; Bane, 1983; Olson et al., 1983; Xie et al., 2007). Com isso, é esperado que a energética local seja influenciada de alguma maneira pela alteração topográfica causada pelo CRG e que isso seja destacado pelo DL. Alguns aspectos energéticos desta região foram previamente estudados por Nardi (2013), e seus resultados serão comparados com os do presente trabalho.

Além destas duas regiões, que são a ênfase deste trabalho, outra grande área também será considerada no presente trabalho em termos energéticos, com a finalidade de uma maior comparação entre os reservatórios, e as interações entre eles. Essa nova área foi definida como a área da Corrente do Brasil, já que esta área permite a visualização dos processos energéticos em toda a extensão da CB. Esta área da CB pode ser visualizada como sendo a área total da Figura 7.

### **3.2. O Banco de Dados**

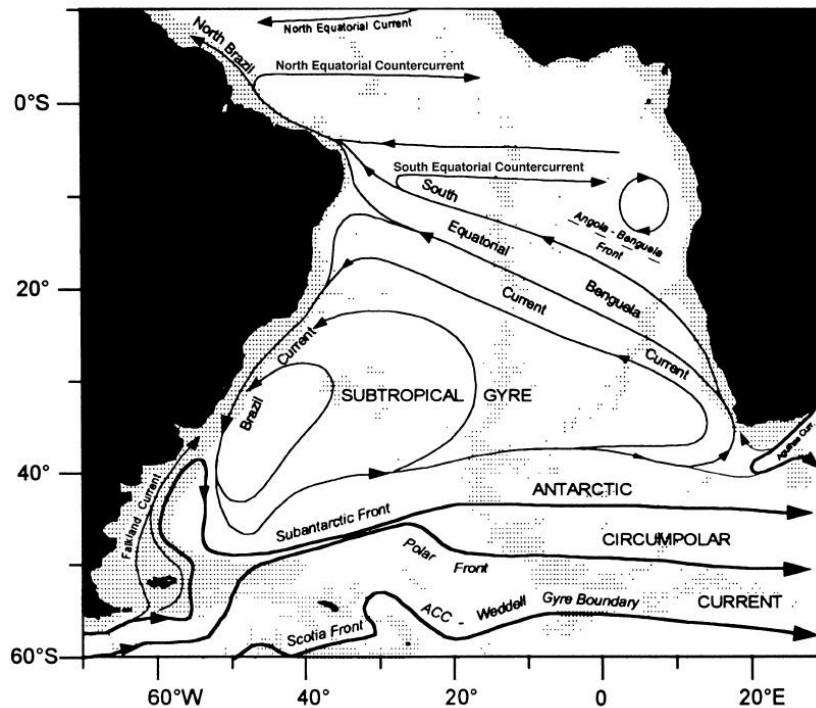
Os dados que foram utilizados para a análise do potencial de utilização do Diagrama de Lorenz são oriundos da saída do modelo hidrodinâmico ROMS (Regional Ocean Modeling System), a partir de uma modelagem desenvolvida por Dias (2013) e que foi gentilmente cedida para a realização deste trabalho. Este modelo de circulação oceânica resolve as equações primitivas do movimento e tem recebido um desenvolvimento especial para simulações de sistemas oceânicos regionais. Maiores detalhes deste modelo são encontrados em Shchepetkin & McWilliams (2005), e também em <https://www.myroms.org/wiki>.

O período de dados utilizado neste trabalho é de dois anos (2004 e 2005), que representam os dois últimos anos de um total de seis anos de simulação de Dias (2013), período em que as variáveis do modelo já haviam se estabilizado adequadamente.



### 3.3. A Corrente do Brasil

O cenário escolhido para a análise do DL foi a Corrente do Brasil, a qual faz parte do giro subtropical anticiclônico do oceano Atlântico Sul (OAS) (Figura 9), como a corrente de contorno oeste deste giro.



**Figura 9** - Representação das principais correntes do OAS. Fonte: [Peterson & Stramma \(1991\)](#).

A CB surge na latitude de 10°S como uma bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE), que ao se encontrar com a costa brasileira dá origem à CB, que flui para sul, e à Corrente Norte do Brasil, que flui para norte (e.g. [Stramma & England, 1999](#)). A CB flui para sul até a latitude aproximada de 38°S, embora essa latitude final varie sazonalmente, em função também da sazonalidade da Corrente das Malvinas (CM), que flui para norte a partir da costa Argentina (e.g. [Olson et al., 1988](#)). O encontro entre estas duas correntes chama-se Confluência Brasil-Malvinas, e tem sua latitude variando sazonalmente, mais para o norte durante o inverno, e mais para o sul durante o verão. A região da Confluência Brasil-Malvinas é conhecida por um forte contraste termohalino (e.g. [Olson et al., 1988](#)) e intensa atividade de mesoescala (e.g. [Gordon, 1989](#)). A Corrente do Atlântico Sul migra para

leste, até a costa da África, fechando o giro do Atlântico Sul ao dar origem a Corrente de Benguela, no lado oeste do continente africano.

A Corrente do Brasil é uma corrente de contorno oeste relativamente fraca, se comparada a outras correntes de contorno oeste. Estudos anteriores mostraram o transporte da CB variando de 4 Sv em seu local de formação até cerca de 20 Sv próximo a CBM (e.g. [Silveira et al., 2000b](#); [Rocha et al., 2014](#)). Estes valores, se comparados a outras CCOs, são relativamente baixos. Um exemplo disso são os estudos de [Fofonoff & Hall \(1983\)](#) e [Halkin & Rossby \(1985\)](#), que calcularam o transporte da Corrente do Golfo em 100 Sv e 120 Sv, respectivamente. Um estudo de [Stommel \(1958\)](#) tentou explicar essa diferença entre a CB e as outras CCOs pela separação da circulação nas componentes termohalina e na componente gerada pelo vento. Neste estudo ele demonstra que na CB estas componentes possuem sentido contrário uma da outra, diminuindo a intensidade resultante da CB, o que não ocorre nas outras CCOs, onde as duas componentes possuem sentidos iguais.

A CB é inicialmente composta apenas por Água Tropical, uma água superficial com cerca de 150 m de espessura (e.g. [Stramma & England, 1999](#)) que possui características de uma água quente e salina e pobre em nutrientes. Porém, à medida que flui para sul, a CB vai ganhando extensão vertical pelo aporte de outras massas de água. Por volta da latitude de 20° S, a CB recebe o aporte da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), aumentando então a sua espessura que pode chegar até 500 m ([Evans & Signorini, 1985](#)). Este aporte se dá devido à bifurcação da CSE em nível picnoclínico, que dá origem à Subcorrente Norte do Brasil (para norte) e a ACAS (que flui para sul). Na latitude de 25° S ([Stramma & England, 1999](#)), a Água Intermediária Antártica (AIA) se une a CB fluindo para sul, aumentando ainda mais a espessura da CB. O trabalho de [Rocha et al. \(2014\)](#) mostra o aumento na espessura da CB. Sua profundidade aumenta de cerca de 350 m próximo à latitude de 22,5° S para cerca de 850 m próximo à latitude de 28° S.

### 3.4. O Cálculo dos Termos do Diagrama

De posse das saídas de velocidade e temperatura do modelo de [Dias \(2013\)](#), e com as equações dos balanços de energia já definidas, poderemos então calcular os

termos do DL nas regiões pré-estabelecidas e em alguns transectos que serão apresentados mais a frente neste trabalho. Com os resultados obtidos nestes cálculos, temos como intenção conseguir analisar a dinâmica local em termos energéticos, e também comparar os resultados obtidos com informações pretéritas da literatura. A partir desta comparação, iremos avaliar o potencial de uso do Diagrama de Lorenz para estudos energéticos.

Além disso, os estoques de energia, e posteriormente os Diagramas, foram calculados para três profundidades pré-estabelecidas: 50, 200 e 600 metros; para todas as regiões de estudo, e nos transectos descritos a seguir neste trabalho. Essas profundidades foram escolhidas por representarem, na maior parte do *path* da CB, as profundidades da camada mais superficial, do núcleo e da borda inferior da CB, respectivamente. Será demonstrado neste trabalho que nem sempre essas profundidades correspondem às características referidas (na região do Cone do Rio Grande, por exemplo, a CB pode chegar à profundidade de 1000 m em alguns momentos), porém, como critério de comparação, essas profundidades foram escolhidas para a análise energética.

Os resultados obtidos com o DL são apresentados no próximo capítulo.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS

A partir de agora iremos apresentar os resultados dos cálculos dos balanços de energia obtidos a partir da utilização dos termos das equações do balanço de energia desenvolvidas no Capítulo 2. Cada estoque de energia foi avaliado separadamente e seus resultados foram comparados entre si e entre as diferentes áreas escolhidas, assim como os termos de conversão. Após a análise termo a termo, montamos os diagramas com os resultados finais. Porém, antes dos resultados dos termos do Diagrama de Lorenz, realizamos uma série de validações dos resultados da saída do modelo número utilizado neste trabalho, o que é apresentado na subseção seguinte.

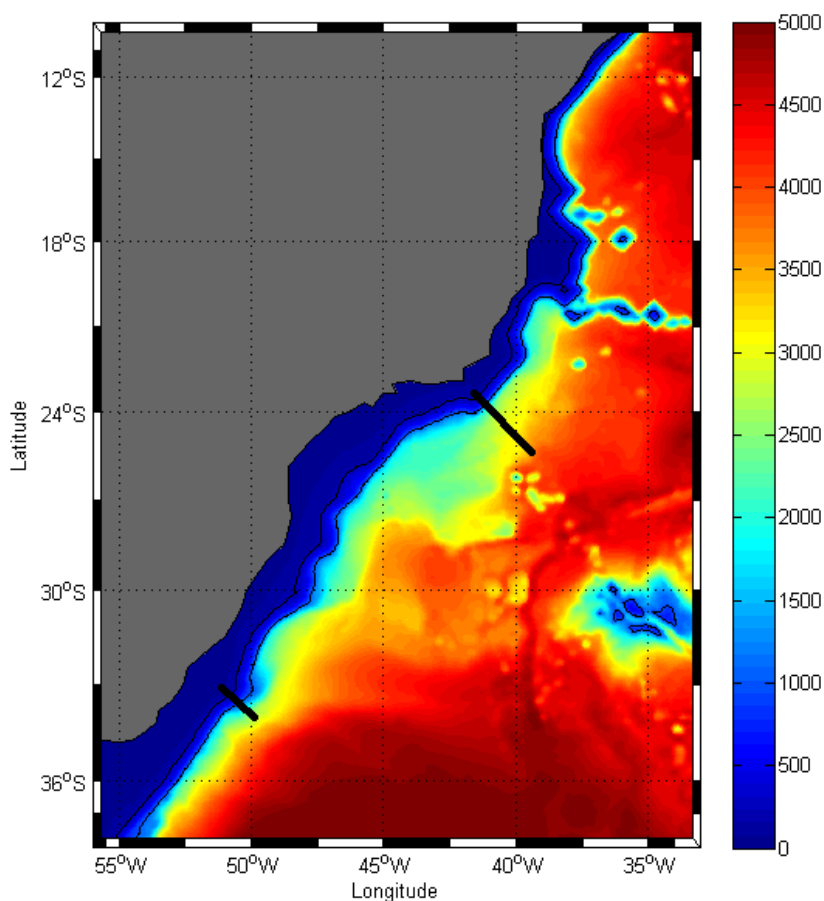
#### 4.1.A Validação do Modelo

Os resultados do modelo numérico de [Dias \(2013\)](#) foram comparados com dados medidos *in situ* no oceano, para a validação do modelo de acordo com as condições dinâmicas locais, garantindo assim, a acurácia dos resultados obtidos pelo Diagrama de Lorenz. Apesar de [Dias \(2013\)](#) já ter feito a validação de seu modelo em sua dissertação de mestrado, novas validações serão aqui apresentadas.

A primeira validação será feita a partir da comparação do cálculo do transporte da CB em dois transectos, localizados nas regiões que serão enfatizadas neste estudo, com valores encontrados na literatura. Estes transectos são mostrados na Figura 10.

O primeiro transecto, localizado na região de Cabo Frio (Rio de Janeiro), foi escolhido por ser uma região da Corrente do Brasil que vem sendo muito estudada. [Dias \(2013\)](#) encontrou valores próximos de 7 Sv em um transecto aproximadamente neste mesmo local, enquanto neste trabalho o transporte da CB neste transecto foi de 6,1 Sv. Na literatura ([Evans & Signorini, 1985](#); [Garfield, 1990](#); [Campos et al.,](#)

1995; Silveira et al., 2004), os valores de transporte na região do transecto variam entre 4 e 14 Sv, dependendo da profundidade de referência e da localização exata do transecto. Todos os valores de transporte destes trabalhos foram calculados dentro da região da Bacia de Santos. Ou seja, o valor aqui calculado, assim como o de Dias (2013) encontra-se na faixa indicada na literatura pretérita.



**Figura 10** - Mapa batimétrico da região da costa brasileira. As linhas finas representam as profundidades de 200 e 1000 metros. As linhas grossas representam os dois locais onde foram simulados os transectos para o cálculo do transporte local da CB a partir dos dados de saída do modelo ROMS.

No segundo transecto, localizado na região do Cone do Rio Grande, mais ao sul do *path* da CB, espera-se, de acordo com a literatura, que o transporte esteja maior. Nardi (2013) encontrou valores de 16 Sv nesta região, enquanto que na literatura (Evans et al., 1983; Gordon & Greengrove, 1986; Silveira et al., 2000a) este valor varia entre 6 e 18 Sv. Neste estudo, encontramos o valor de 15 Sv, ou seja, dentro da margem da literatura pretérita.

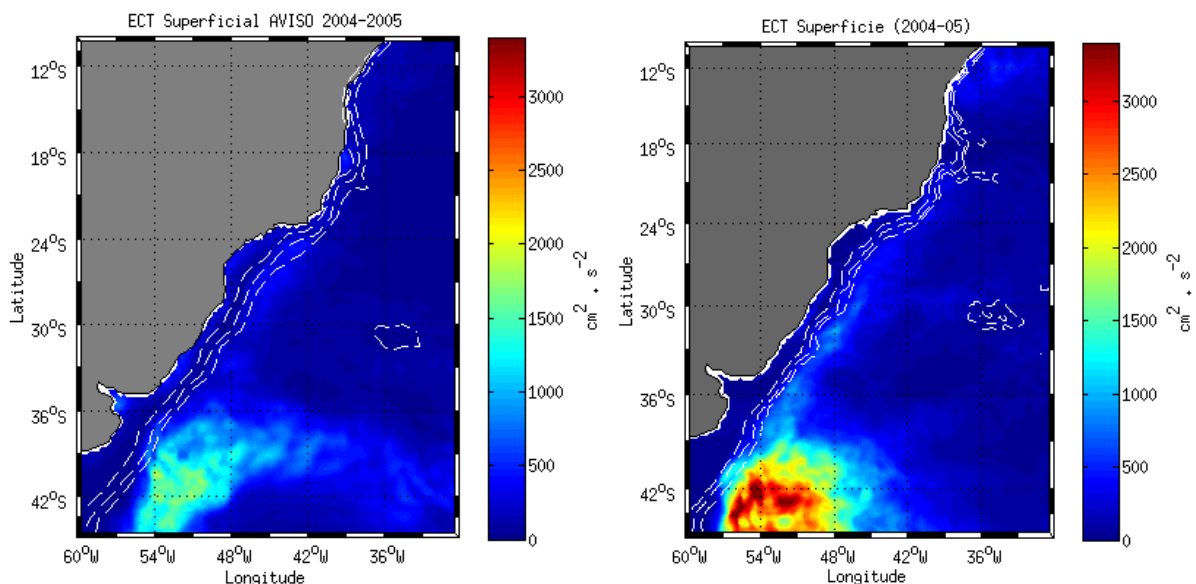
Outra maneira de tentar validar um modelo é através da comparação do campo de ECT produzida através das saídas de velocidade do modelo, com o obtido através das componentes da anomalia de velocidade geostrófica estimada pelos dados altimétricos. Relembrando a equação da ECT =  $\frac{u'^2 + v'^2}{2}$ , e levando em conta que os dados da AVISO são calculados através das anomalias de altura da superfície do mar (AASM), seguem as equações de anomalias de velocidade geostrófica superficiais, a partir das AASM:

$$u_g' = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial y} ; v_g' = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta'}{\partial x} \quad (4.1)$$

Os dados de anomalia do nível do mar foram retirados do site da AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>) para o mesmo período de tempo dos dados gerados pelo modelo numérico utilizado neste trabalho (2004 e 2005), porém com uma média de saída de 7 dias, enquanto os dados de saída do modelo numérico possuem uma periodicidade de 5 dias.

Analisando a Figura 11, percebemos uma semelhança de padrão entre a região de maior atividade turbulenta, localizada próxima à latitude de 42° S, na região da Confluência Brasil-Malvinas. A ordem de grandeza dos valores de ECT é a mesma ( $10^3$ ), apesar de uma diferença no valor máximo encontrado durante a comparação. Estudos pretéritos da ECT nesta região (Chelton et al., 1990; Cirano et al., 2006; Oliveira et al., 2009) encontram valores também próximos de 3000 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, corroborando com os valores encontrados neste trabalho.

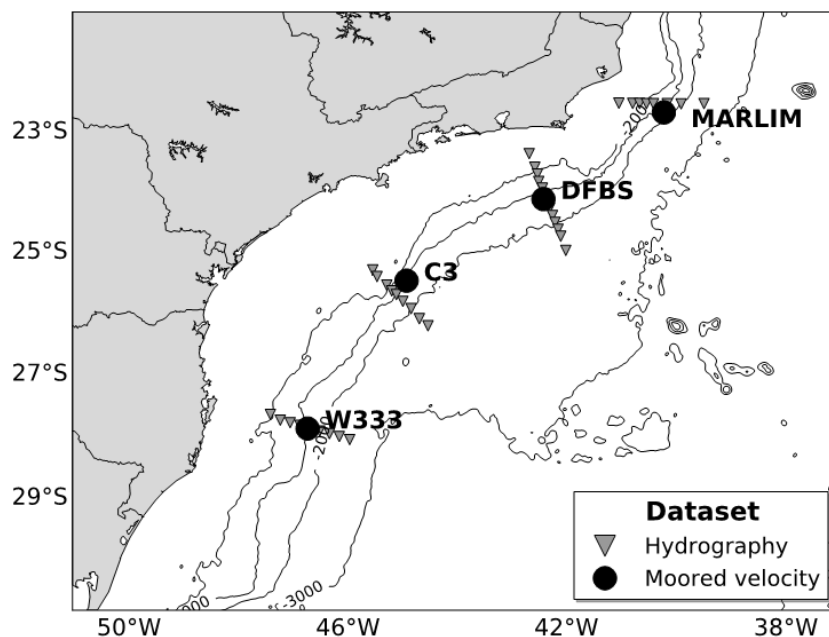
Estudos pretéritos (e.g. Wyrcki et al., 1976; Assireu et al., 2003), utilizando boias de deriva, encontraram valores de ECT na região da Corrente do Brasil entre 300 e 800 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. O campo de ECT gerado pelo produto da AVISO, mostrado na Figura 11, também apresentou valores entre 500 e 800 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>. Oliveira et al. (2009) encontraram valores de ECT entre 500 e 1000 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> na região da CB. Estes valores encontrados na literatura acompanham o resultado do campo de ECT calculado com as saídas de velocidade do modelo ROMS utilizadas neste trabalho, também mostrado na Figura 11, onde a ECT associada com a região do *path* da CB varia entre 500 e 1000 cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>.



**Figura 11** - Campo de ECT média, para a região de estudo, a partir de dados das AASM. Na esquerda a ECT foi calculada a partir de dados do site da AVISO, enquanto à direita foram utilizados os dados de saída do modelo ROMS. As linhas tracejadas em branco representam as linhas batimétricas de 200, 1000 e 2000 m.

Uma terceira validação feita neste trabalho foi uma comparação da ECM e ECT calculada em Rocha et al. (2014), com dados de um dos fundeios utilizados por estes autores, com as energias calculadas com os dados do ROMS. Além disso, também foram comparados perfis verticais de velocidade da CB com perfis obtidos a partir de dados dos fundeios de Rocha et al. (2014). Para que estas comparações pudessem ser feitas, reproduzimos estes fundeios com os dados do modelo ROMS, selecionando os mesmo locais e as mesmas profundidades dos fundeios de Rocha et al. (2014). Apesar da diferença temporal entre os dados dos fundeios de Rocha et al. (2014) e os dados do modelo ROMS aqui utilizados, acreditamos que o perfil médio da CB permanece praticamente o mesmo ao longo do período compreendido entre estas comparações.

Em um dos quatro fundeios utilizados pelos autores deste trabalho, chamado de “C3”, foram calculados valores de ECM e ECT, que foram comparados com os valores de ECM e ECT calculados com as saídas do modelo ROMS aqui adotado. A Figura 12 mostra a localização destes fundeios utilizados para os cálculos energéticos.



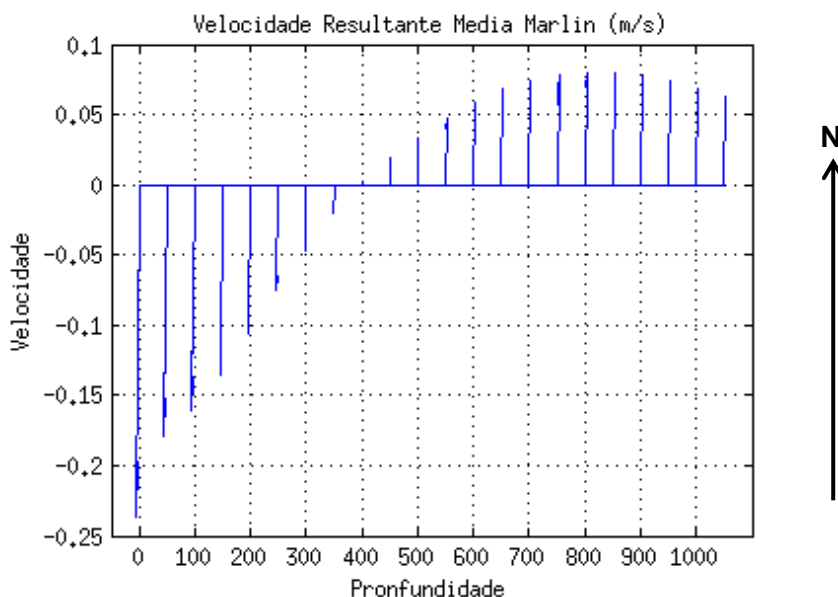
**Figura 12** - Representação da localização dos fundeios na região de Cabo Frio. Fonte: [Rocha et al. \(2014\)](#).

A diferença entre os valores de ECM e ECT calculados neste trabalho com os valores destas energias no artigo de Rocha e colaboradores foi de 20%, enquanto que a diferença na proporção ECT/ECM caiu para 4%. Ou seja, o modelo representou bem a dinâmica local quando comparado com dados *in situ*, e a diferença nos valores de ECM e ECT pode ser justificada pela diferença não só no tipo de dado (*in situ* e saída de modelo), mas também na quantidade de níveis verticais e no diferente período de tempo dos dados. Enquanto o fundeio C3 de [Rocha et al. \(2014\)](#) possuía apenas quatro sensores na coluna d'água de 1000 m e seus dados variam do ano de 1991 até 1994 (apenas um fundeio entre quatro, deste trabalho, coletou dados entre os anos de 2003 e 2004), no modelo ROMS tínhamos saídas de 50 em 50 m, ou seja, 20 dados de saída para uma coluna de 1000 m de espessura, com os dados representando os anos de 2004 e 2005.

[Rocha et al. \(2014\)](#) ainda analisaram o sentido do fluxo das correntes na região dos fundeios utilizados. Os dados dos quatro fundeios de [Rocha et al. \(2014\)](#), representados na Figura 12, foram repetidos neste trabalho, como já foi explicado anteriormente, analisando o sentido da corrente na coluna d'água.

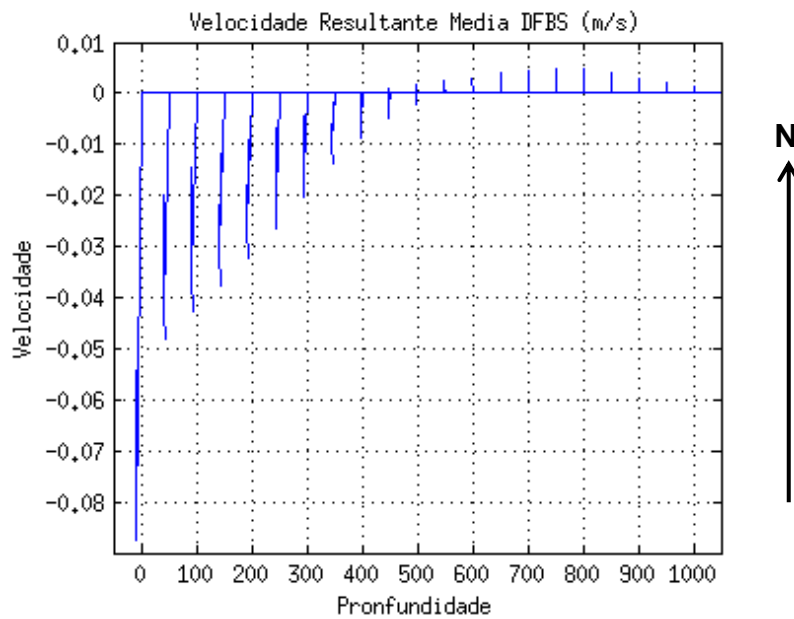


No primeiro fundeio mais ao norte, chamado de MARLIM, foi descrita uma CB forte acima de 300 m, onde a partir dessa profundidade já começaram a serem percebidas algumas variações de sentido. A Contracorrente de Contorno Intermediária do Brasil (CCIB) apareceu com maior consistência entre 650 e 1050 m, não apresentando nenhuma inversão nesta profundidade, o que sugeriu que os meandros presentes nesta região estão confinados nas camadas superiores. A Figura 13 mostra a representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo ROMS na mesma localização do fundeio MARLIM. Percebe-se que a CB tem suas velocidades mais altas acima de 300 m e os maiores valores de velocidade média resultante da CCIB estão entre as profundidades de 600 e 1000 m, valores compatíveis com os encontrados por Rocha et al. (2014).



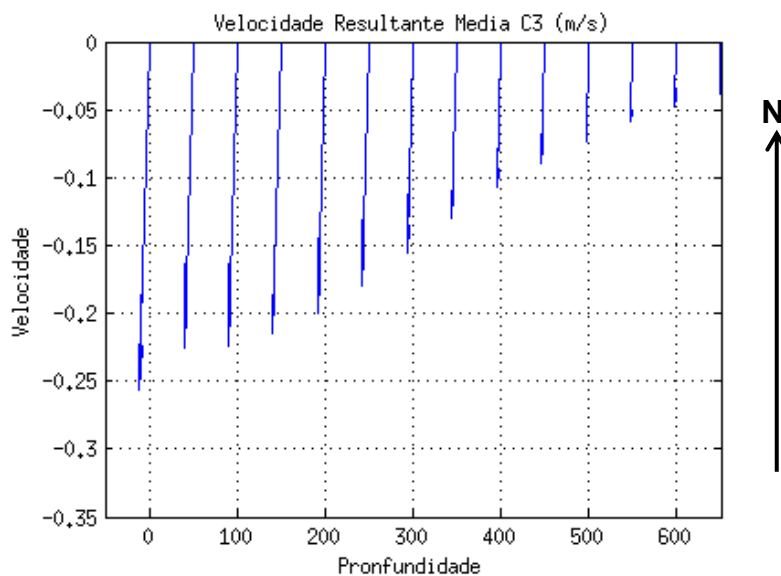
**Figura 13** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo ROMS no mesmo local do fundeio MARLIM de Rocha et al. (2014).

O fundeio DFBS foi descrito por Rocha et al. (2014) mostrando uma forte CB nas camadas superficiais e a CCIB fluindo para norte entre 800 e 1000 m. Por volta da profundidade de 500 m ocorrem inversões de sentido do fluxo, sugerindo o centro de inversão entre CB e CCIB. A Figura 14 mostra o resultado do modelo ROMS compatível com os dados do artigo. Este fundeio apresentou os menores valores de velocidade tanto em Rocha et al. (2014) quanto na saída do modelo ROMS calculada neste trabalho, 0,17 e 0,08 m/s respectivamente.



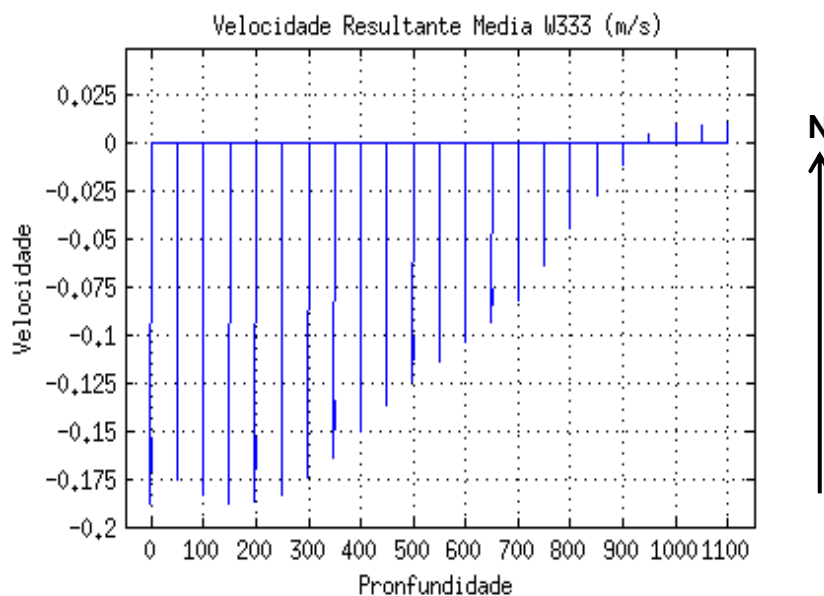
**Figura 14** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo no mesmo local do fundeio DFBS de Rocha et al. (2014).

O terceiro fundeio do artigo, já citado anteriormente, foi chamado de C3 e apresentou uma forte CB nas camadas superficiais até cerca de 300 m, corroborando com a Figura 15 obtida a partir de dados de saída do modelo numérico. Tanto na saída do modelo numérico ROMS quanto no trabalho de Rocha et al. (2014), este fundeio foi o que apresentou os maiores valores de velocidade média para a CB, 0,25 e 0,5 m/s respectivamente.



**Figura 15** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo no mesmo local do fundeio C3 de Rocha et al. (2014).

Por fim, o quarto e último fundeio analisado por Rocha et al. (2014), chamado de W333, encontrou a presença da CB até o instrumento fundeado em 670 m, sendo que o último instrumento, em 885 metros, apresentou alta variabilidade, sem direção definida, sugerindo que não existe evidência da presença da CCIB neste ponto. Corroborando com os resultados deste trabalho mostrados da Figura 16, onde a CB apresentasse forte até cerca de 700 metros. Essa presença exclusiva da CB nessa região é corroborada ainda no trabalho de Legeais (2013), o qual sugere que ao sul da bifurcação de Santos não existe a presença da CCIB. Podemos perceber pelas Figuras 13 a 16, que as saídas do modelo ROMS utilizadas neste trabalho representam a dinâmica da região já documentada na literatura.



**Figura 16** - Representação da média do sentido do fluxo para os dois anos do modelo no mesmo local do fundeio W333 de Rocha et al. (2014).

#### 4.2.A Distribuição Horizontal dos Estoques de Energia

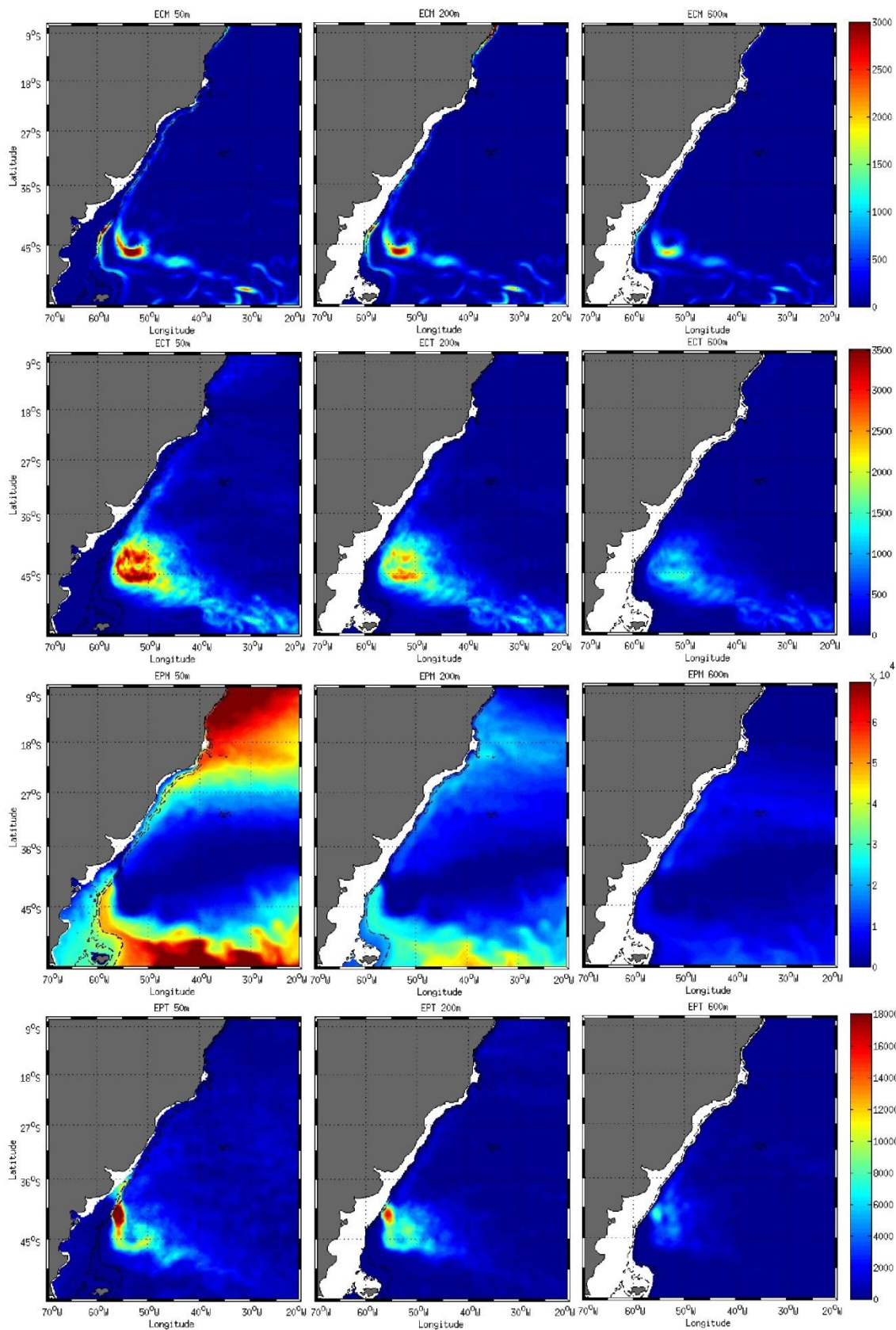
Inicialmente, os valores de energia cinética e potencial (média e turbulenta) foram avaliados em toda a região abordada pelo modelo ROMS (ou seja, não só nas duas regiões selecionadas anteriormente).

A Figura 17 apresenta a distribuição horizontal dos estoques dos quatro reservatórios de energia calculados para toda a área de saída do modelo ROMS.

Podemos perceber os altos valores de ECM e ECT na região da Confluência Brasil-Malvinas nas três profundidades de referência, como já foi caracterizado anteriormente.

Os termos de energia potencial exigem uma análise mais complexa, principalmente o termo de EPM. Podemos observar que os maiores valores de EPM encontram-se na região de bifurcação da Corrente Sul Equatorial, seguindo para o sul acompanhando o *path* da CB, e na região da CBM, seguindo para leste acompanhando o *path* da Corrente do Atlântico Sul. A EPM é calculada, conforme demonstra a Equação (2.35), em função da multiplicação da derivada vertical do campo básico para cada profundidade com a média do desvio instantâneo da temperatura ( $\overline{\Delta T}$ ). Por isso, é de suma importância para a avaliação (e futura comparação) do estoque de EPM, que o domínio estabelecido para o cálculo seja o mesmo domínio com o qual se deseja comparar o resultado, já que este domínio influenciará tanto a distribuição do campo básico, quanto o valor da temperatura média na camada, o que irá influenciar o desvio da temperatura instantânea (e.g. [Kang & Curchitser, 2015](#); [Von Storch et al., 2012](#)). Por isto, neste trabalho, todos os valores de energia potencial foram calculados tendo como referência o campo básico do domínio total do modelo, ou seja, mesmo os reservatórios das menores regiões, foram calculados com valores do campo básico do domínio inteiro, para que possa ser feita uma real comparação entre todos os subdomínios.

Ainda analisando a Figura 17, podemos perceber que a maior parte da energia potencial turbulenta, nas três profundidades, está confinada na região da CBM, assim como a ECM e a ECT. Sabe-se pela literatura ([Roulet et al., 2014](#)), que, no oceano global, a estrutura horizontal da EPT é muito parecida com a estrutura horizontal da ECT, e esta semelhança será demonstrada neste trabalho.

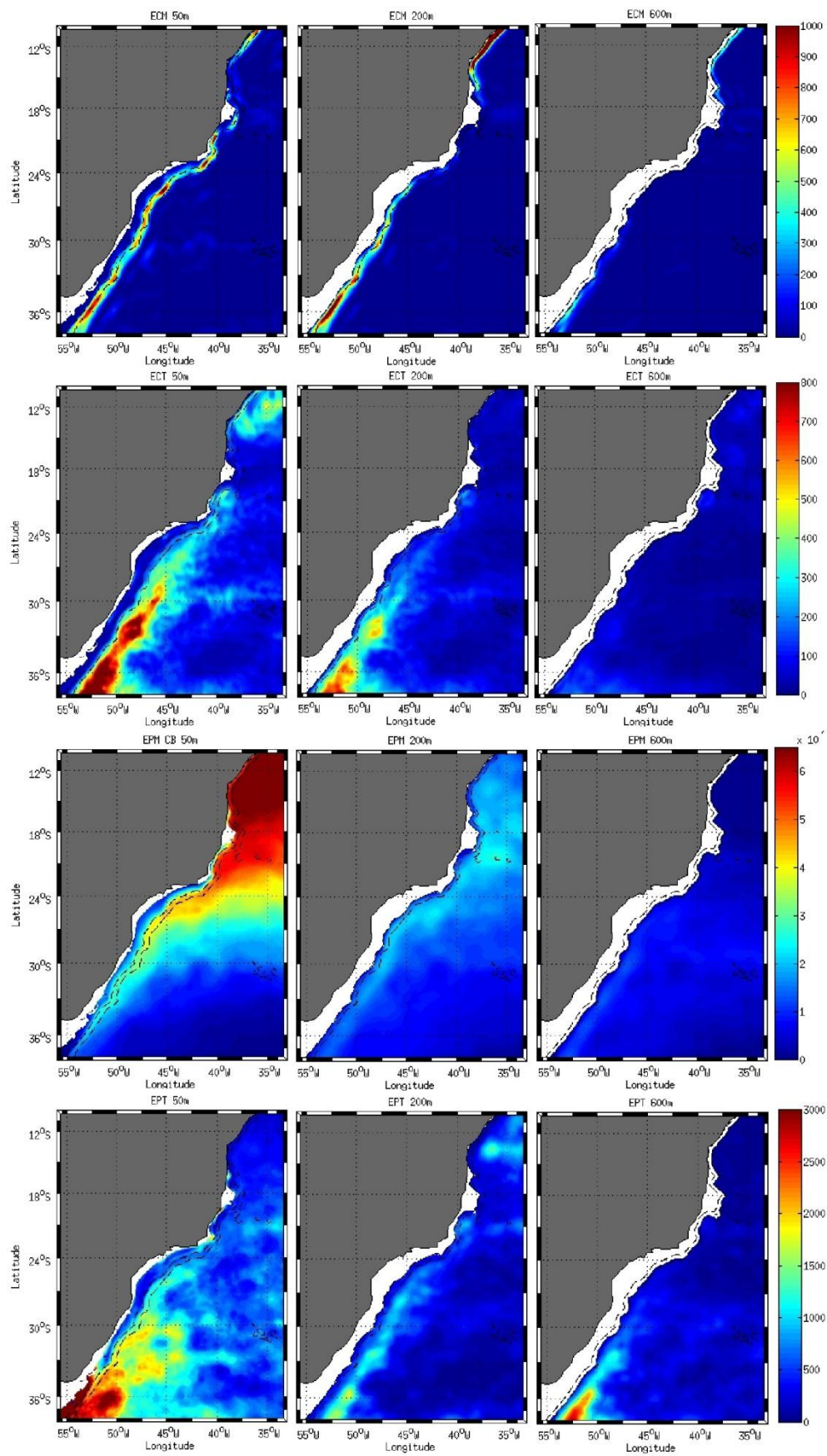


**Figura 17** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da esquerda para a direita, respectivamente) para todo o domínio da saída do modelo de Dias (2013). As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

Após apresentarmos esses resultados para todo o domínio, iremos agora concentrar a nossa análise em uma região menor que abranja somente a CB, que é onde serão analisadas as áreas de enfoque deste trabalho. Isso terá como efeito direto a eliminação da influência das energias na CBM na barra de cores das figuras, pois lá os valores de energia são acentuadamente maiores, mascarando nas figuras os valores das energias ao longo do *path* da CB. Por isso, na continuação deste estudo, não serão feitas mais figuras dos termos para esse domínio mostrado na Figura 17.

Analisando a Figura 18, correspondente à região da Corrente do Brasil, percebemos uma semelhança na localização dos maiores valores de ECT e EPT, todos localizados principalmente ao sul do *path* da CB, a partir da latitude de 30° S. Os valores de ECM apresentaram picos alternados de magnitude na profundidade mais superficial, e, à medida que a profundidade aumenta, observa-se um padrão onde os maiores valores de ECM encontram-se nas áreas mais ao norte e mais ao sul das imagens. E notamos também, assim como na Figura 17, que os menores valores, para essas energias, encontram-se na região mais offshore do domínio. Este padrão de aumento nos valores das energias, principalmente no de ECT, à medida que a corrente (CB) flui para a região final de seu *path*, seguindo no sentido offshore, agora a Corrente do Atlântico Sul (CAS), corrobora com a literatura pretérita (e.g. [Watts & Johns, 1982](#); [Tracey & Watts, 1986](#); [Cornillon, 1986](#); [Lee & Cornillon, 1996](#); [Von Storch et al., 2012](#), [Kang & Curchitser, 2015](#)).

A EPM já possui um padrão diferente, com os maiores valores localizados ao norte da região. Como a EPM depende da inclinação das isopicnais, o que altera o campo de massa, esses maiores valores localizados ao norte da região podem indicar uma maior inclinação das isopicnais nesta região, que pode estar relacionado com a proximidade da CB em relação ao talude nesta área.



**Figura 18** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da esquerda para a direita, respectivamente) para a região da CB. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

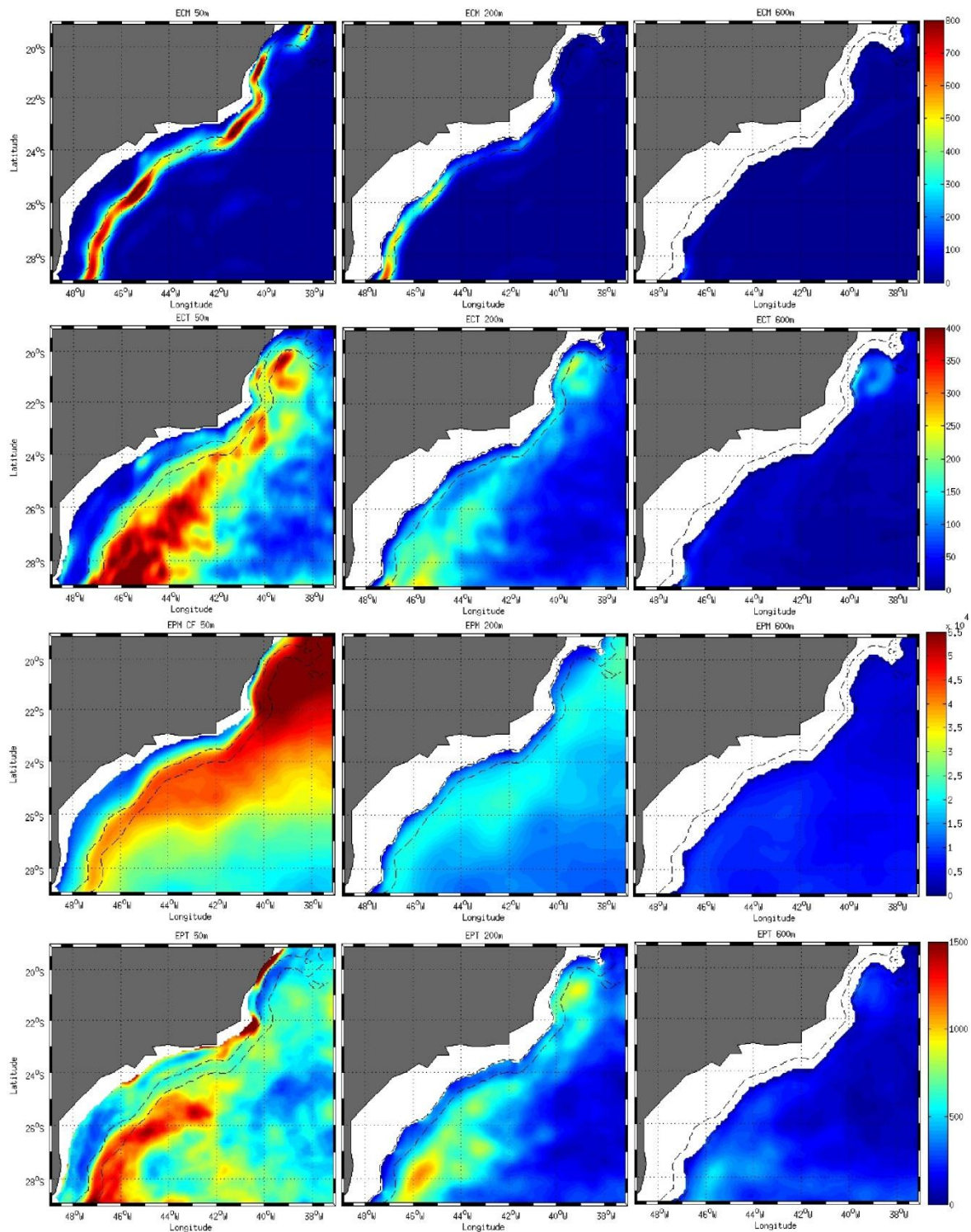
Já a Figura 19, apresenta os padrões das energias da região de Cabo Frio. Analisando a figura, percebemos que a ECM estreita-se principalmente entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros, apresentando maiores valores na camada superficial (50 m) do que na camada central (200 m), indicando que o jato da CB nesta região encontra-se mais próximo da superfície.

A ECT não possui a mesma tendência de manter-se entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. Ela está mais localizada em direção offshore da CB, na sua borda oeste (considerando que o jato da CB flui de norte para sul), e assim como a ECM, possui os maiores valores próximos da superfície. Cabe ainda salientar a região da cadeia de montes submarinos Vitória – Trindade ( $\sim 20^\circ$  S) que apresenta alta atividade turbulenta nas três profundidades, o que pode ser um indício da formação do Vórtice de Vitória, o que também será analisado posteriormente com o cálculo dos termos CBC e CBT.

A EPT apresenta estrutura semelhante a ECT, porém com dois grandes picos em  $22^\circ$  S e  $20^\circ$  S, na borda da plataforma continental. A EPT está relacionada à variância da temperatura, e altos valores de variância de temperatura coincidentes com fortes gradientes laterais de velocidade paralela a corrente podem refletir o meandramento no caminho de uma corrente (Rossby, 1987). Esta afirmativa corrobora com a dinâmica da região, que é de alta atividade turbulenta e de muitos meandros, inclusive com o constante desenvolvimento do Vórtice de Vitória. Observa-se ainda um interessante valor alto de EPT na profundidade de 200 metros, bem no centro do que seria um giro de ECT na região.

A estrutura horizontal da EPM novamente apresenta seus maiores valores na superfície e na área mais ao norte do domínio.



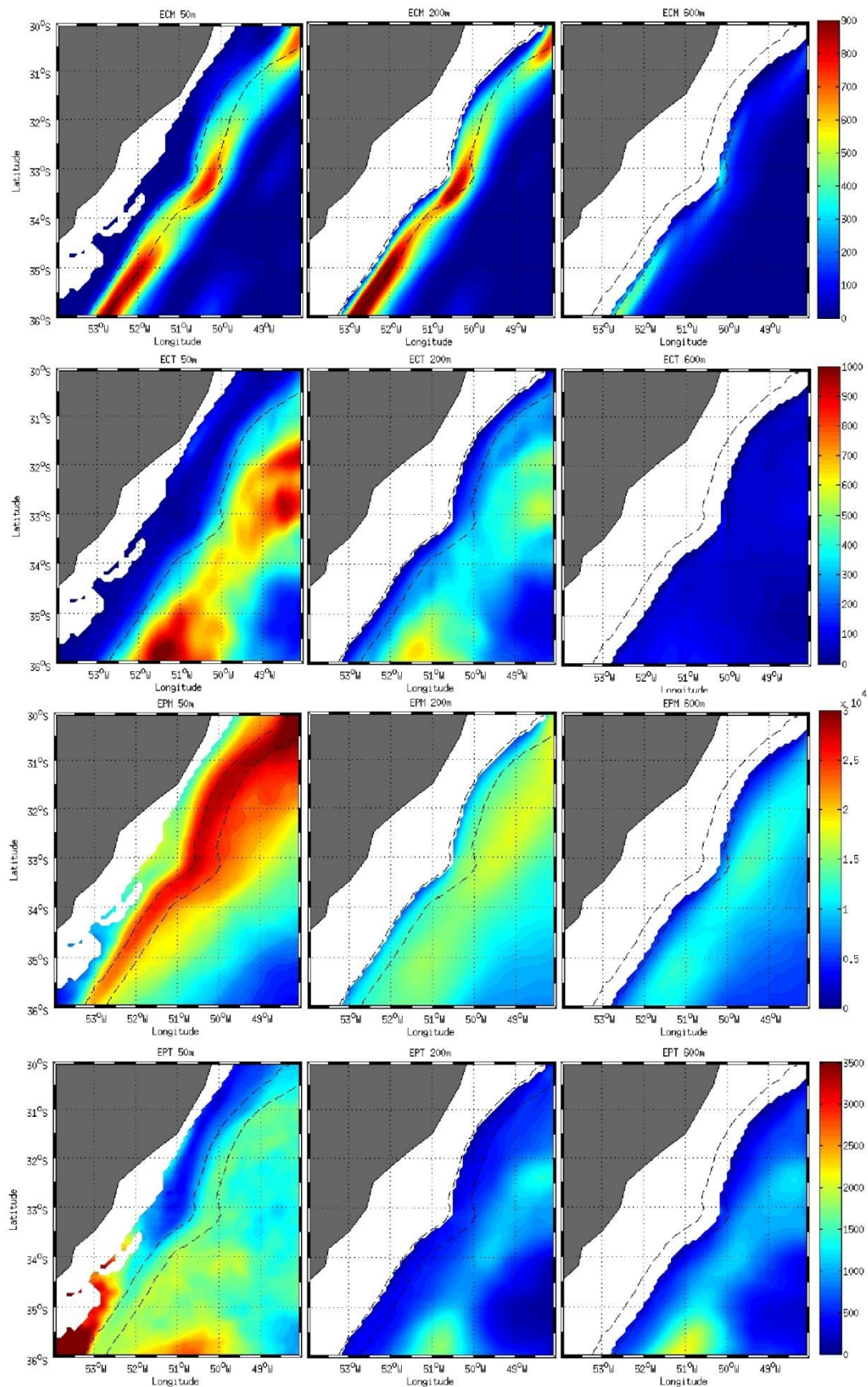


**Figura 19** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da esquerda para a direita, respectivamente) para a região de Cabo Frio. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

A Figura 20 ilustra os valores de energia na região do Cone do Rio Grande. Diferentemente da região de Cabo Frio, aqui a ECM encontra-se mais forte na profundidade de 200 metros, indicando que o núcleo do jato da CB nesta região está mais profundo do que na região de Cabo Frio. Podemos observar dois picos de ECM, um em cima do Cone (aproximadamente na latitude de  $33,5^{\circ}$  S e na longitude de  $50,5^{\circ}$  W), e outro mais ao sul, o que pode ser um indicativo de uma conversão de ECM devido à presença do Cone, seguido de uma recuperação dessa ECM após o restabelecimento do jato da corrente mais ao sul.

A ECT novamente encontra-se na borda oeste do jato da CB (considerando que ela flui para sul) e apresenta dois máximos distintos, um antes e outro após o Cone. Este máximo antes do Cone deve ser analisado levando em conta o *path* da CB antes desta região, que seria a região do Cabo de Santa Marta, também muito conhecida pela alta atividade turbulenta, e como uma zona de liberação de vórtices oceânicos (Pereira et al., 2009; Sato, 2014). Observa-se ainda que este padrão da ECT mantém-se verticalmente. Maiores valores de ECT após o Cone podem se dever ao meandramento da corrente na região do Cone.

A EPM apresenta estrutura novamente mais forte na superfície, seguindo as linhas batimétricas. Os maiores valores novamente encontram-se ao norte da região, porém, em maiores profundidades, este padrão não segue bem estabelecido. Percebe-se que a EPT apresenta padrão semelhante à ECT. Contudo, na profundidade de 50 metros um forte máximo é encontrado bem ao sul da região, provavelmente representando os altos valores de EPT que foram encontrados mais ao sul até a CBM. Com exceção deste máximo, a EPT segue o padrão da ECT inclusive verticalmente.



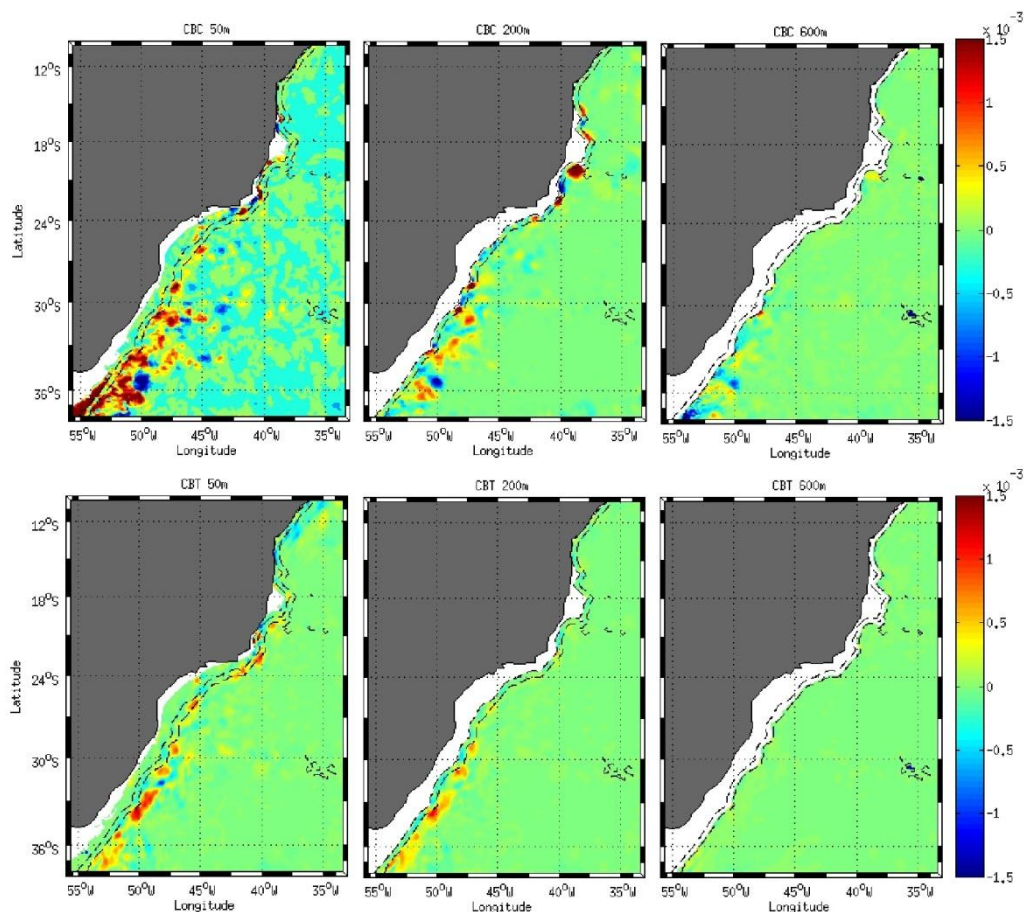
**Figura 20** - Distribuição horizontal dos estoques de ECM, ECT, EPM e EPT (de cima para baixo, nesta ordem) nas profundidades de referência (50 m, 200 m e 600 m da esquerda para a direita, respectivamente) para a região do Cone do Rio Grande. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

Após o cálculo das energias nas diferentes regiões de estudo, realizamos o cálculo dos termos de conversão, barotrópica (CBT) e baroclínica (CBC), para cada região. Sabemos que o termo CBC pode estar sendo superestimado por estarmos considerando não só a componente divergente do fluxo de calor turbulento médio, mas também a componente não-divergente.

A região da CB, representada na Figura 21, apresenta valores para os termos de CBT e CBC que novamente tendem a seguir aos padrões das energias cinética média e turbulenta, e possuem, geralmente, seus maiores valores nas camadas superficiais.

Analisando apenas o termo CBC, podemos perceber que este tende a diminuir com a profundidade, apesar de ter um pico bem forte na profundidade de 200 m na região dos bancos de Vitória (aproximadamente latitude  $20^{\circ}$  S e longitude  $38^{\circ}$  W), seguido de mais dois picos (um negativo outro positivo) pouco mais ao sul. Estes picos ainda podem ser visualizados na profundidade de 600 metros, porém já sem a mesma magnitude. Na profundidade de 50 metros, podemos observar que o termo CBC apresenta seus maiores valores mais ao sul, próximo à latitude de  $36^{\circ}$  S, seguindo as estrutura de ECT, ECM e EPT, que também têm seus maiores valores nesta área. Como o termo CBC está ligado à conversão de EPM em EPT, seus altos valores positivos indicam que nesta região ocorre uma forte conversão de EPM em EPT, o que pode ser uma causa dos elevados valores de EPT encontrados próximo a esta latitude, como demonstrou a Figura 18.

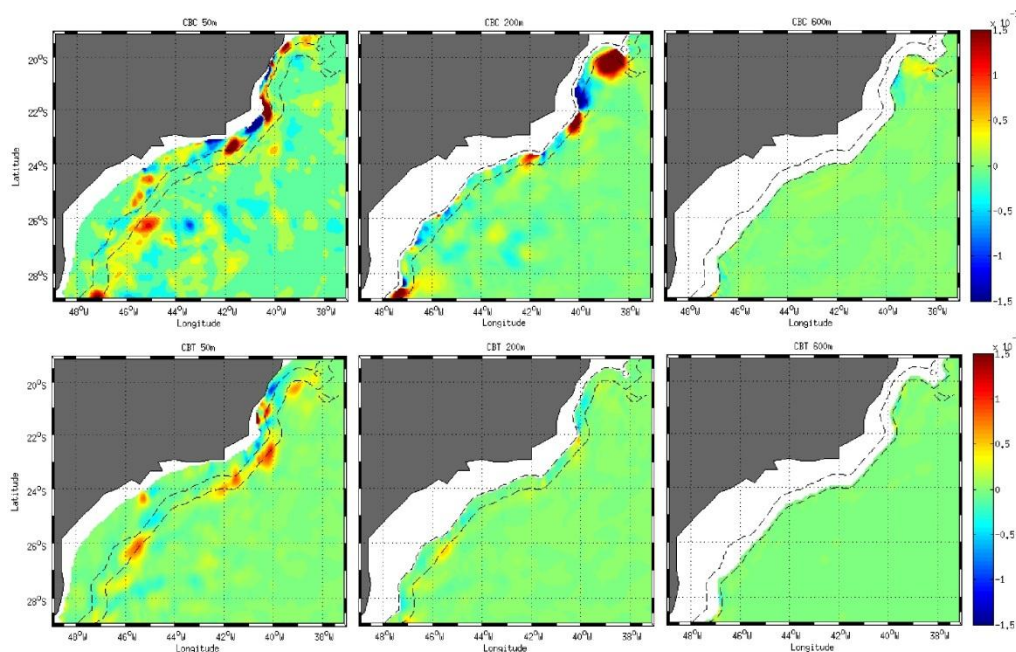
Seguindo a análise da Figura 21, o termo CBT (imagens inferiores) também apresenta estrutura semelhante ao termo CBC, e aos estoques de ECM e ECT, indicando a relação dos estoques em função da conversão barotrópica.



**Figura 21** - Distribuição horizontal dos termos CBC (figuras superiores) e CBT (figuras inferiores) nas profundidades de referência (50, 200 e 600 m) para a região da CB. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

Os termos de conversão barotrópica e baroclínica para a região de Cabo Frio estão mostrados na Figura 22. Podemos visualizar agora com maior clareza, os picos de CBC na região dos bancos de Vitória, e na região onde ocorre uma mudança abrupta na direção da linha de costa, indicando uma forte presença de instabilidades baroclínicas nesta região. Uma característica interessante evidenciada nesta figura é a mudança de sinal da CBC nas profundidades de 50 e 200 metros, próximo as isóbatas de 200 e 1000 metros entre as latitudes de 21 e 23° S. Na profundidade de 200 metros ainda cabe ressaltar o pico de CBC na região dos bancos de Vitória, cujo sinal ainda permanece, porém mais fraco, até a profundidade de 600 metros. Bem ao sul ainda podemos perceber outro pico marcante de CBC. Estes picos de CBC seguem os padrões estruturais do estoque de EPT, sugerindo a relação de conversão entre EPM e EPT.

O termo CBT na região de Cabo Frio apresenta seus maiores valores na superfície, assim como a maioria da CBC, porém estes valores são menores se comparados à CBC. Estes maiores valores dos termos nas menores profundidades indicam que o jato da CB nesta região também se encontra mais raso, conforme será mostrado mais adiante neste trabalho. As áreas onde o termo CBT tem seus maiores valores positivos se relacionam com as áreas de alta ECM e posterior queda no seu valor, indicando uma possível conversão de ECM em ECT, corroborando com o significado do termo CBT.

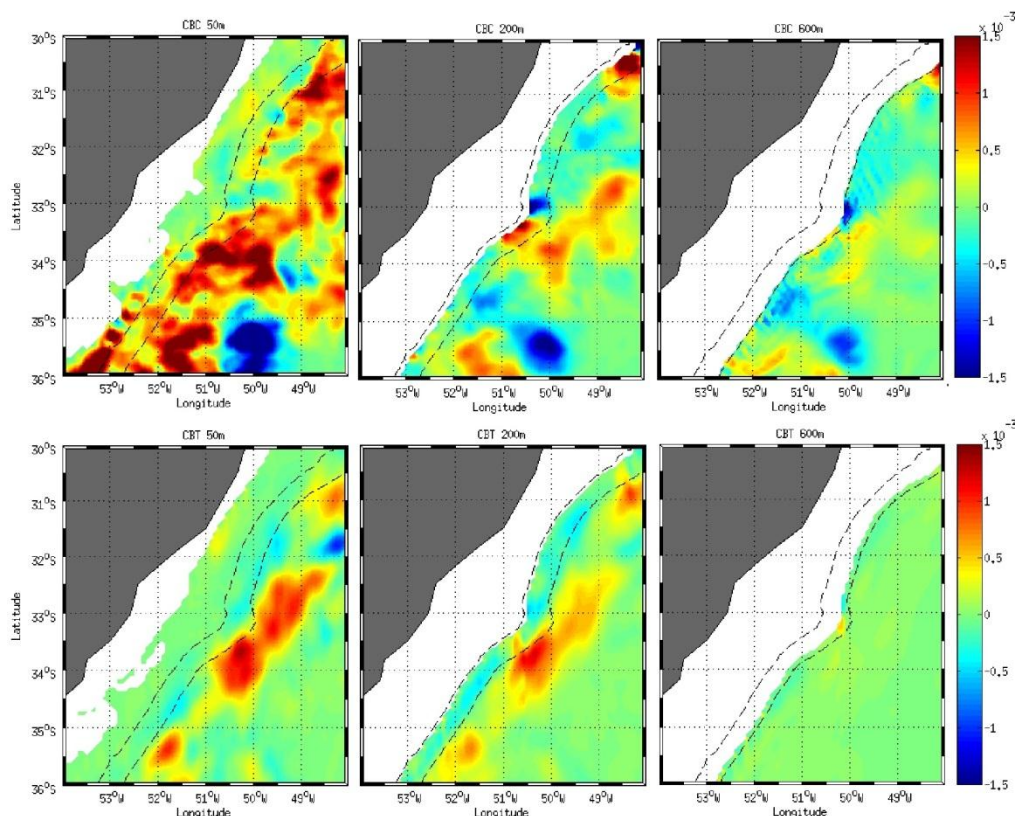


**Figura 22** - Distribuição horizontal dos termos CBC (figuras superiores) e CBT (figuras inferiores) nas profundidades de referência (50, 200 e 600 m) para a região de Cabo Frio. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

A última região onde foram analisados os termos de conversão foi a do Cone do Rio Grande. Podemos perceber através da Figura 23 que o termo CBC é visivelmente mais forte nas menores profundidades, e tem como predominância o sinal positivo, o que indica uma dominância da conversão de energia potencial média em turbulenta. As linhas batimétricas de 200 e 1000 metros, tracejadas na figura, evidenciam bem a região do Cone, próximo à latitude de  $33,5^\circ$  S. Podemos perceber então, tendo o Cone como referência, que a CBC apresenta um pico positivo rapidamente após a passagem da CB pelo Cone em 200 m, e em 50 metros esse pico se dá um pouco mais ao sul. Este pico positivo indica uma conversão de

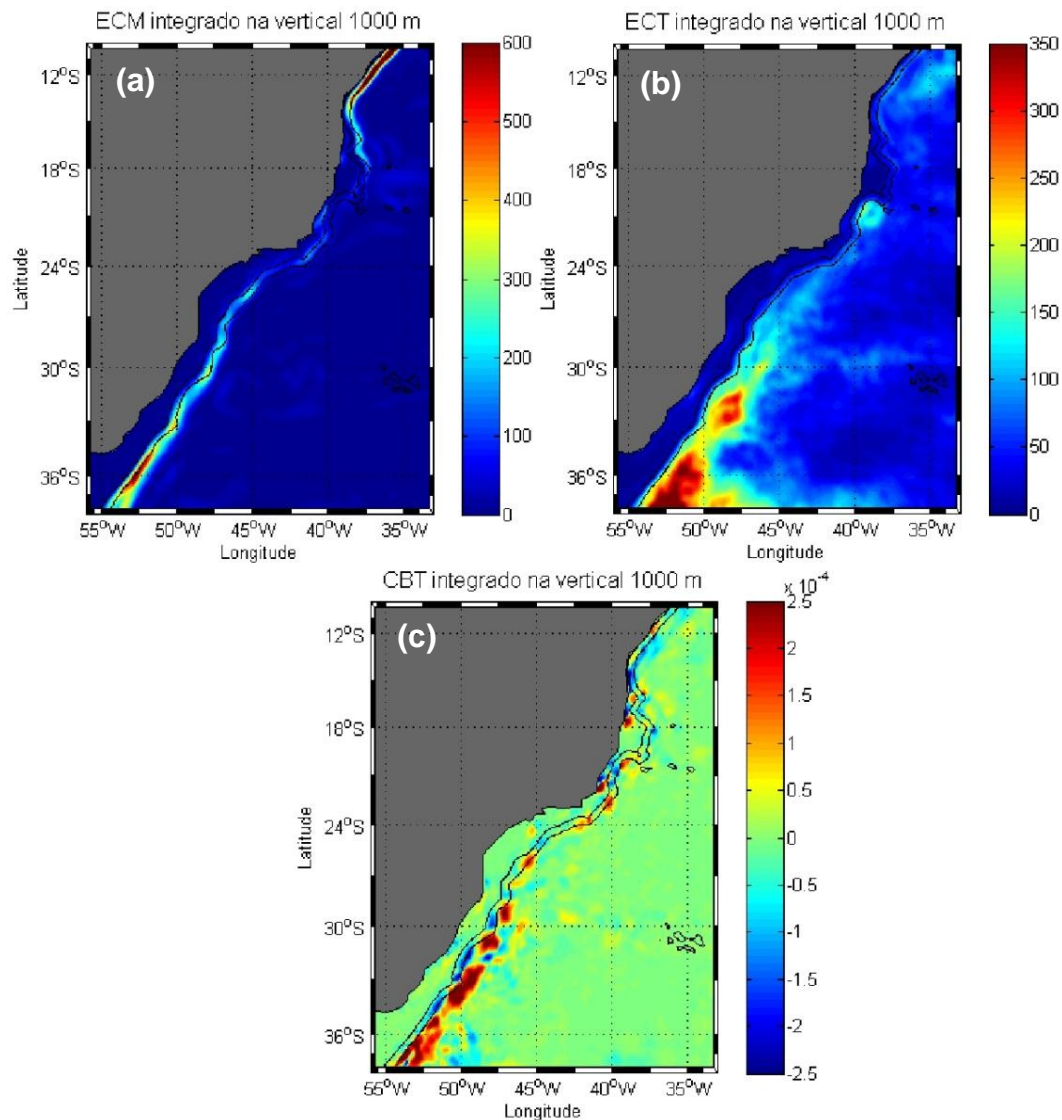
EPM em EPT, este aumento na EPT pode ser visualizado também na Figura 20, porém, se comparado com a magnitude da região de Cabo Frio (Figura 19), a EPT resultante da CBC no Cone possui menor magnitude. Cabe destacar ainda o pico de CBC negativo, indicando a conversão de EPT em EPM, existente antes do Cone do Rio Grande, que está presente até os 600 metros da coluna d'água.

O termo CBT também apresenta seu pico após a passagem da CB pelo CRG, mas sem a presença do pico negativo anterior ao Cone. Este pico positivo de CBT é mais evidente até os 200 metros, já que nas imagens correspondente aos 600 metros quase não se visualiza essa característica. Novamente, como na região de CF, os picos de CBT se relacionam com picos de ECM, seguidos por uma diminuição desta energia, o que indica a conversão do campo médio para o campo turbulento, conforme sinaliza o termo CBT. Comparando os termos CBT e CBC, observamos que o termo CBC se espalha por todo o domínio considerado, enquanto o termo CBT está mais relacionado com o Cone. Ou seja, o CRG tem uma influência maior nas conversões barotrópicas da região do que nas baroclínicas.



**Figura 23** - Distribuição horizontal dos termos CBC (figuras superiores) e CBT (figuras inferiores) nas profundidades de referência (50, 200 e 600 m) para a região do Cone do Rio Grande. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

Após estes resultados das magnitudes das energias e dos seus termos de conversão calculados para as profundidades de referência, realizamos a mesma análise, porém mediante a integração dos valores ao longo de toda a coluna d'água (até a profundidade de 1000 metros). Este resultado serve para analisar o comportamento de cada forma de energia em toda a coluna d'água, e não apenas nas profundidades pré-estipuladas. Primeiramente iremos analisar os estoques para a área que abrange toda a CB através da Figura 24.

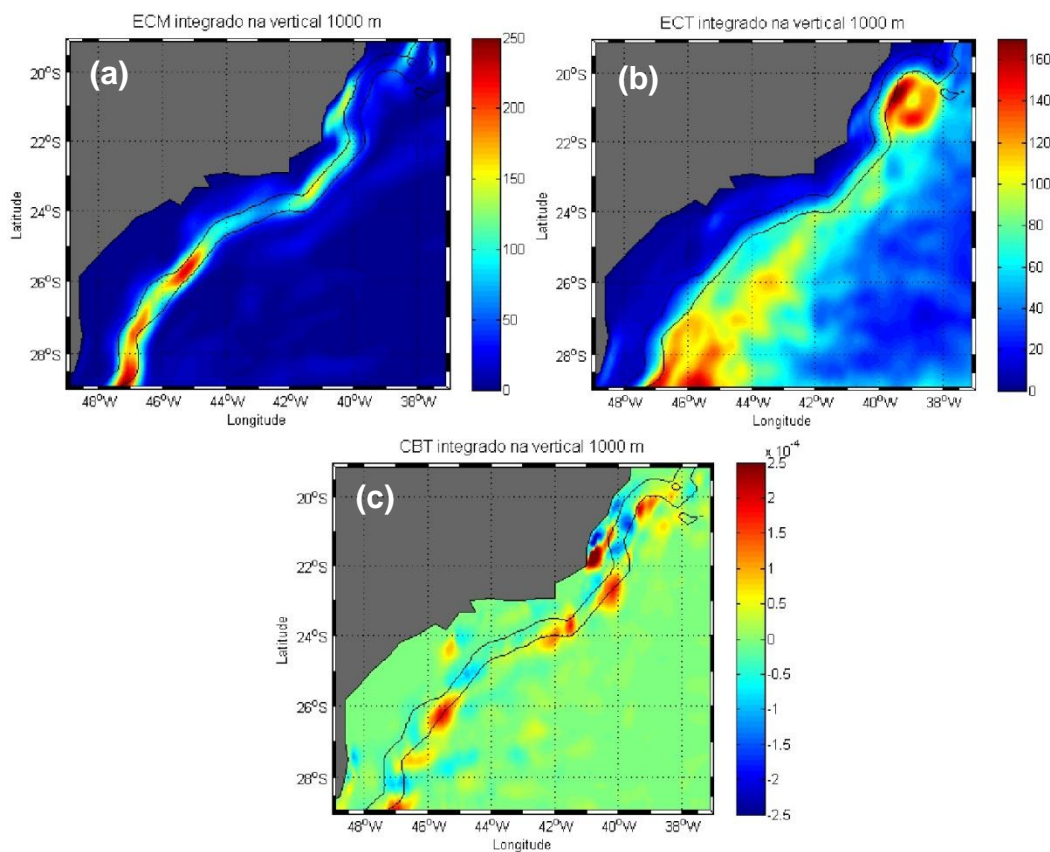


**Figura 24** - Distribuição horizontal dos termos ECM (a), ECT (b) e CBT (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região da CB. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, e (c) está em cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>.



Podemos visualizar nesta figura que o termo CBT tende a ser positivo no lado esquerdo da CB (lado *offshore*, considerando o movimento da CB no sentido de norte para sul). O valor positivo para o termo CBT indica uma conversão de ECM em ECT. Essa característica segue o padrão dos estoques de ECM e ECT apresentados na Figura 24, pois podemos notar que a ECM tende a ser mais forte no lado mais raso da corrente, e a ECT no lado mais profundo. Essa variação *cross-shore* à corrente corrobora com o estudo de Kang & Curchitser (2015) que ao analisar a Corrente do Golfo, também encontrou esse padrão na corrente. Estes autores ainda citam outros trabalhos que também corroboram com essa estrutura “cross-stream” (Webster, 1961; Webster, 1965; Shimitz & Niiler, 1969; Bane et al., 1981). Podemos observar ainda, analisando a Figura 24, a importância dos bancos de Vitória na dinâmica da CB, com valores expressivos no estoque de ECT.

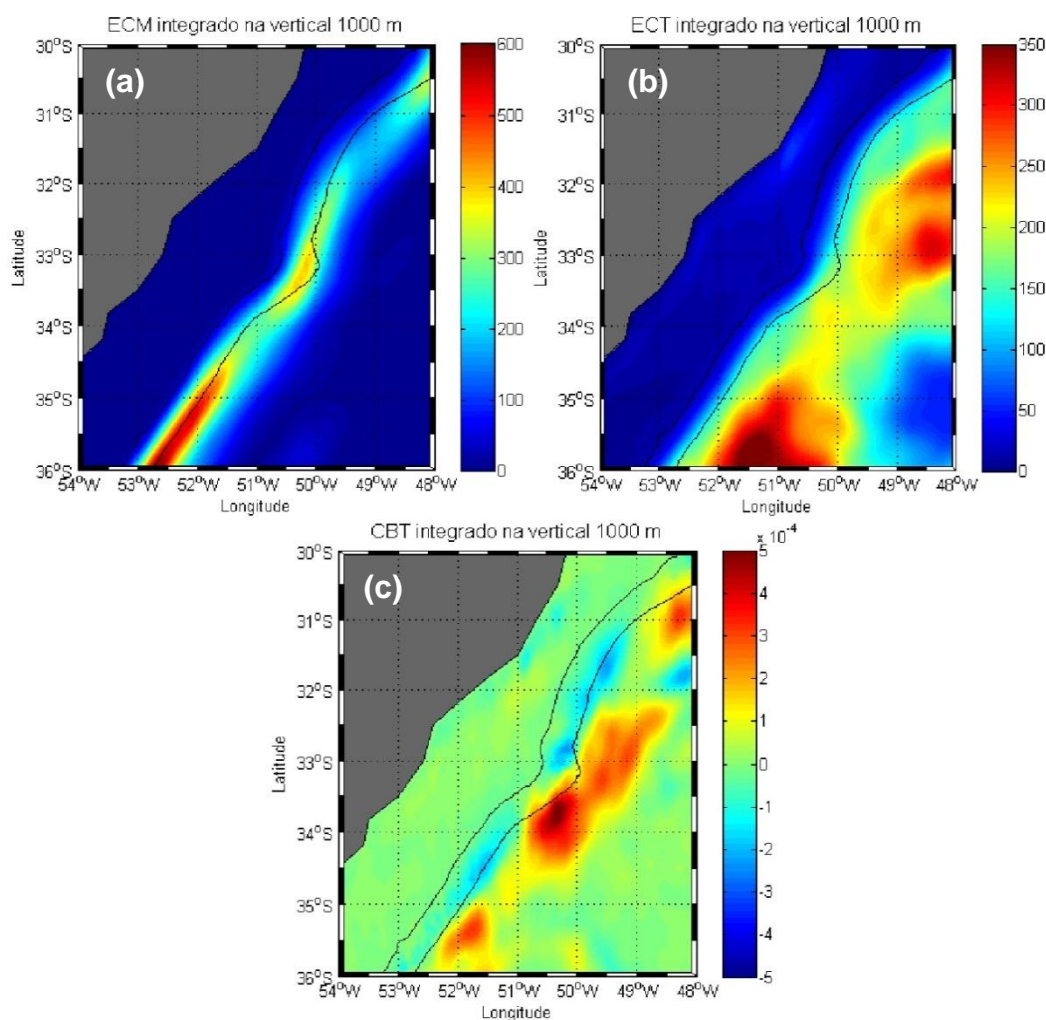
A segunda região que será apresentada será a região de Cabo Frio, apresentada na Figura 25.



**Figura 25** - Distribuição horizontal dos termos ECM (a), ECT (b) e CBT (c) integrados na coluna d’água até a profundidade de 1000 metros para a região de Cabo Frio. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

Percebe-se nesta figura a forte influência dos bancos de Vitória na dinâmica local, com elevados valores no estoque ECT. Podemos perceber uma elevada atividade do termo ECT entre as latitudes de 20° e 22° S, com características espaciais similares a um padrão circular, demonstrando a intensa atividade de mesoescala na região. Observamos novamente que a ECM está confinada principalmente entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros, ou seja, ao longo do *path* da CB, enquanto que a ECT encontra-se mais localizada na região *offshore* da CB.

Finalmente analisaremos os dados integrados na coluna d'água até os 1000 metros de profundidade na região do Cone do Rio Grande e, para tal, utilizaremos a Figura 26.



**Figura 26** - Distribuição horizontal dos termos ECM (a), ECT (b) e CBT (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região do Cone do Rio Grande. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

Os estoques de ECM e ECT, assim como o termo de conversão barotrópica seguem a mesma estrutura da região de Cabo Frio, apresentando a ECM mais estreita e a ECT mais dispersa no lado *offshore*, seguida pelo termo CBT positivo primordialmente na parte mais *offshore* da corrente. Podemos perceber também, que a máxima do termo CBT está localizada logo após a passagem da corrente pela feição do Cone do Rio Grande, demonstrando a influência desta feição para a dinâmica local (e.g. [Nardi, 2013](#)). Ou seja, nesta região, a CB acelera sobre o Cone e libera energia para o campo turbulento.

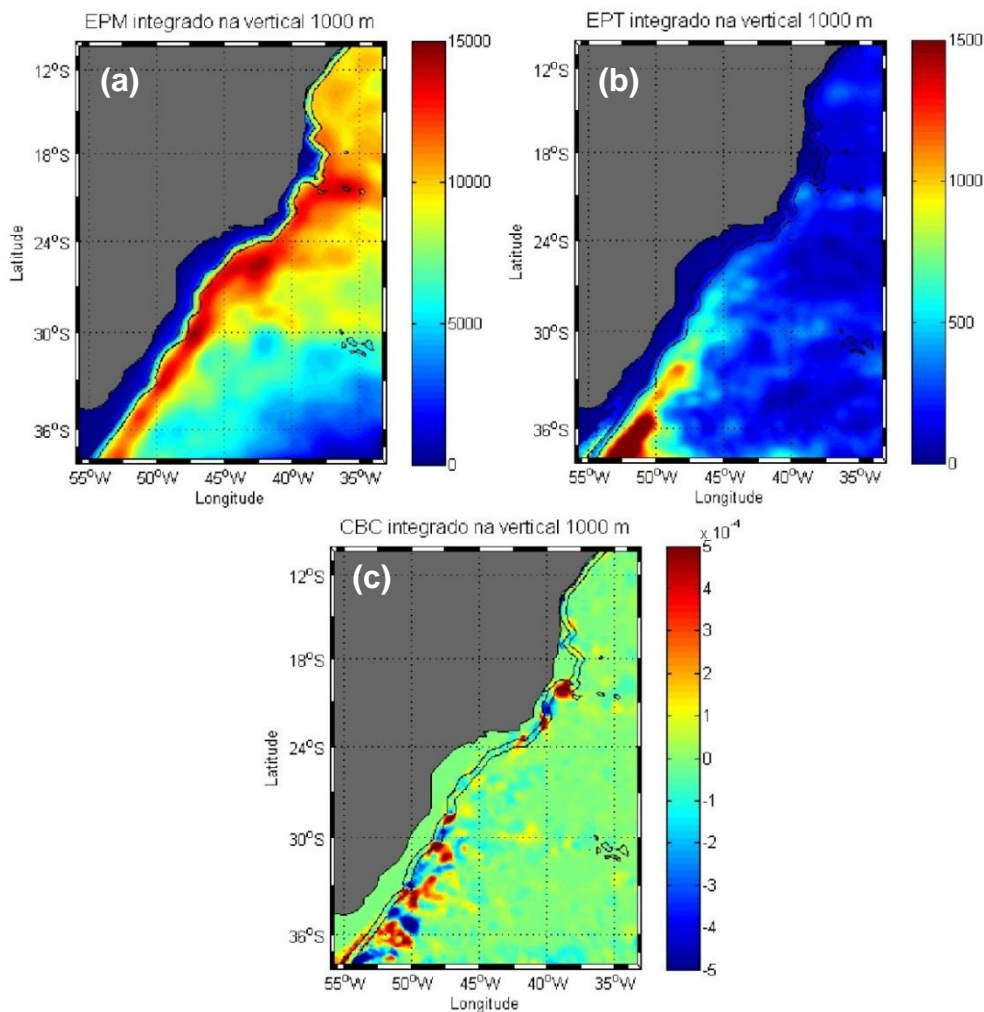
Comparando a Figura 25 com a Figura 26, podemos visualizar que os altos valores de ECT encontrados na Figura 26 entre as latitudes de 32 e 33° S, são uma continuação dos altos valores de ECT encontrados bem ao sul na Figura 25. O termo CBT positivo ao sul na Figura 25, e bem ao norte na Figura 26, indica o processo de conversão do campo médio para o turbulento, explicando o aumento local de ECT.

Após analisar os estoques de ECM e ECT e o termo de conversão barotrópica (CBT) na coluna d'água, iremos agora analisar os estoques de EPM e EPT e o termo de conversão baroclínica (CBC) para as mesmas regiões, e para a mesma coluna d'água até a profundidade de 1000 metros. A Figura 27 apresenta estes termos para a região da CB, onde podemos visualizar melhor a alteração na estrutura do estoque de EPM, se comparado com a Figura 18. Ela mostra que os maiores valores de EPM estão localizados na borda do talude, no lado *offshore* da linha batimétrica de 1000 metros.

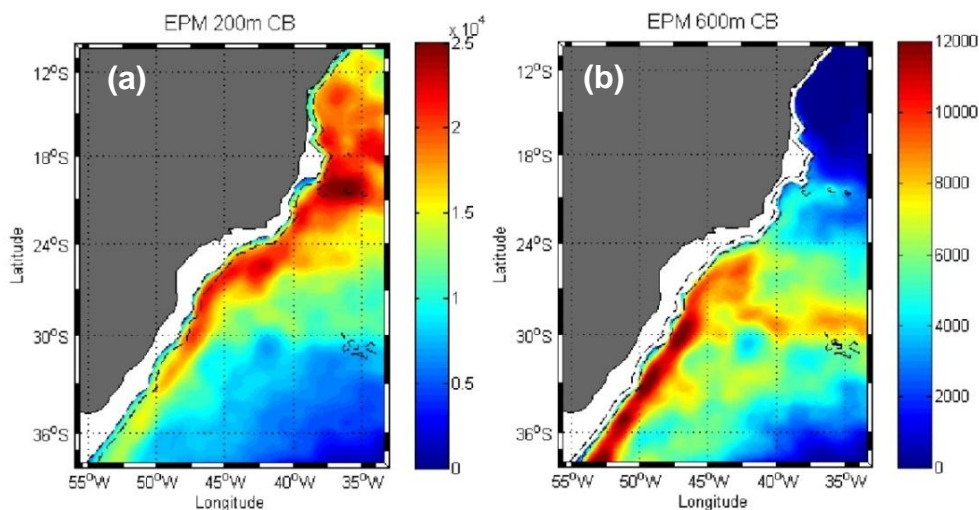
Para uma visualização mais completa, ajustamos os valores de máximo e mínimo da EPM para as profundidades de 200 e 600 metros, conforme mostra a Figura 28. Podemos então perceber por esta figura que o padrão da EPM não se mantém em toda a coluna d'água, o que explica essa alteração na imagem da EPM integrada em 1000 metros. A EPM em 200 metros encontra-se mais forte na região de Cabo Frio, principalmente nas adjacências da cadeia de Vitória-Trindade, enquanto que em 600 metros, a EPM tem seu pico no lado *offshore* da linha batimétrica de 1000 metros, na região do talude, e se estendendo mais para o sul do domínio. Devido à soma dessas características que se estabelece a estrutura mostrada na Figura 27. Cabe ressaltar ao leitor que atente ao analisar os valores de

máxima EPM em cada imagem da Figura 28, já que as barras de cores foram alteradas de uma para outra, justamente para uma melhor visualização das estruturas em cada uma das profundidades.

Diferentemente do estoque de EPM, o estoque de EPT apresenta estrutura semelhante àquela mostrada na Figura 18, com seus maiores valores bem ao sul do domínio, próximos a latitude de 37° S. Esta região de máxima EPT acompanha a região onde o termo CBC teve maiores valores, com vários picos tanto positivos quanto negativos, indicando uma atividade alta em termos de trocas energéticas.

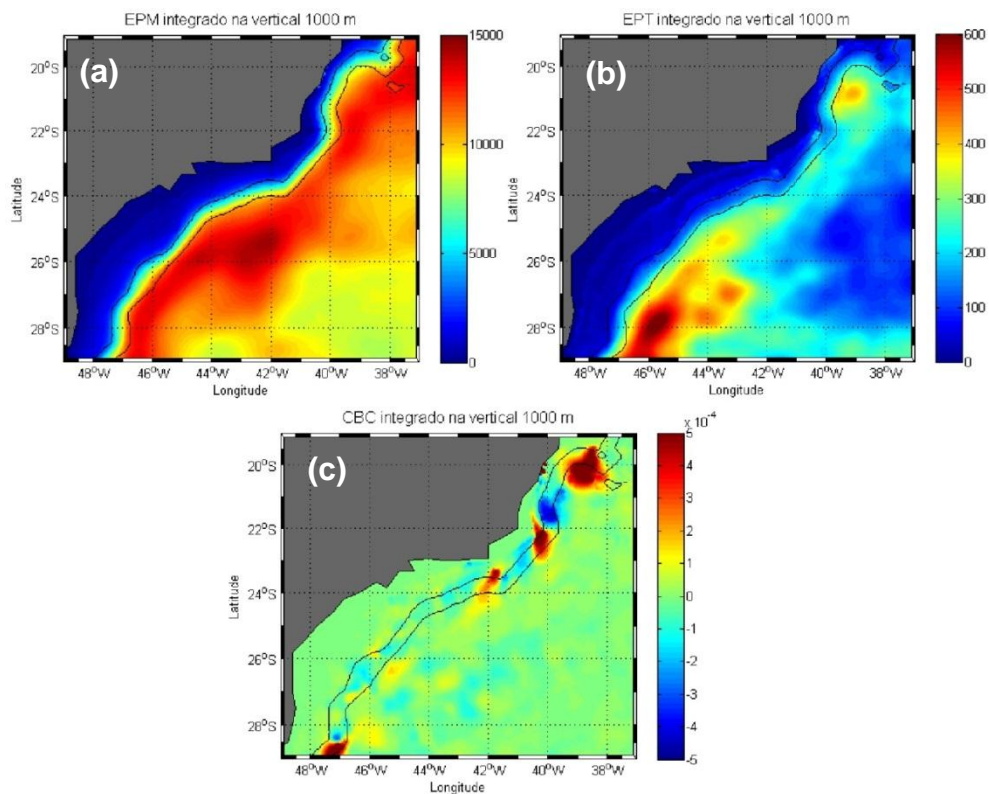


**Figura 27** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), EPT (b) e CBC (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região da CB. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .



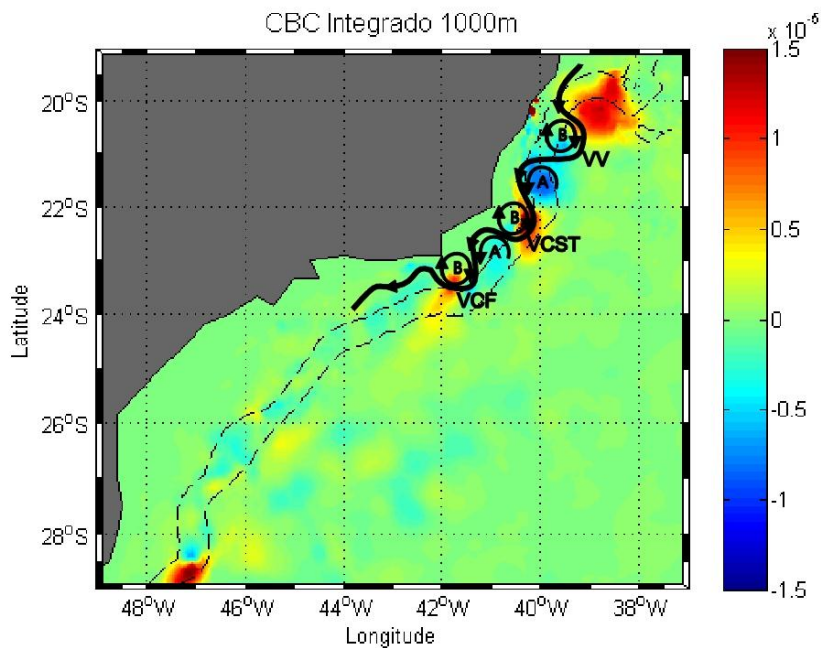
**Figura 28** - Distribuição horizontal do estoque de EPM para as profundidades de 200 metros (a) e 600 metros (b) para a região da Corrente do Brasil. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida são  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

Observando apenas a região de Cabo Frio na Figura 29, observamos a EPM com seu máximo bastante disperso a partir da linha batimétrica de 1000 metros em direção *offshore*. O estoque de EPT local apresenta seu maior valor ao sul do domínio, próximo à latitude de  $28^\circ$  S, área também com altos valores na Figura 19. O alto valor de EPT na região dos bancos de Vitória pode estar relacionado com o pico de CBC encontrado nessa região, conforme mostra a imagem (c) da Figura 29. Dois outros picos de CBC são encontrados um pouco mais ao sul dos bancos de Vitória, e são refletidos em uma leve diminuição seguidos por um aumento da EPT integrada na mesma área (aproximadamente entre as latitudes de  $22$  e  $23^\circ$  S, próximo às linhas batimétricas de 200 e 1000 metros).



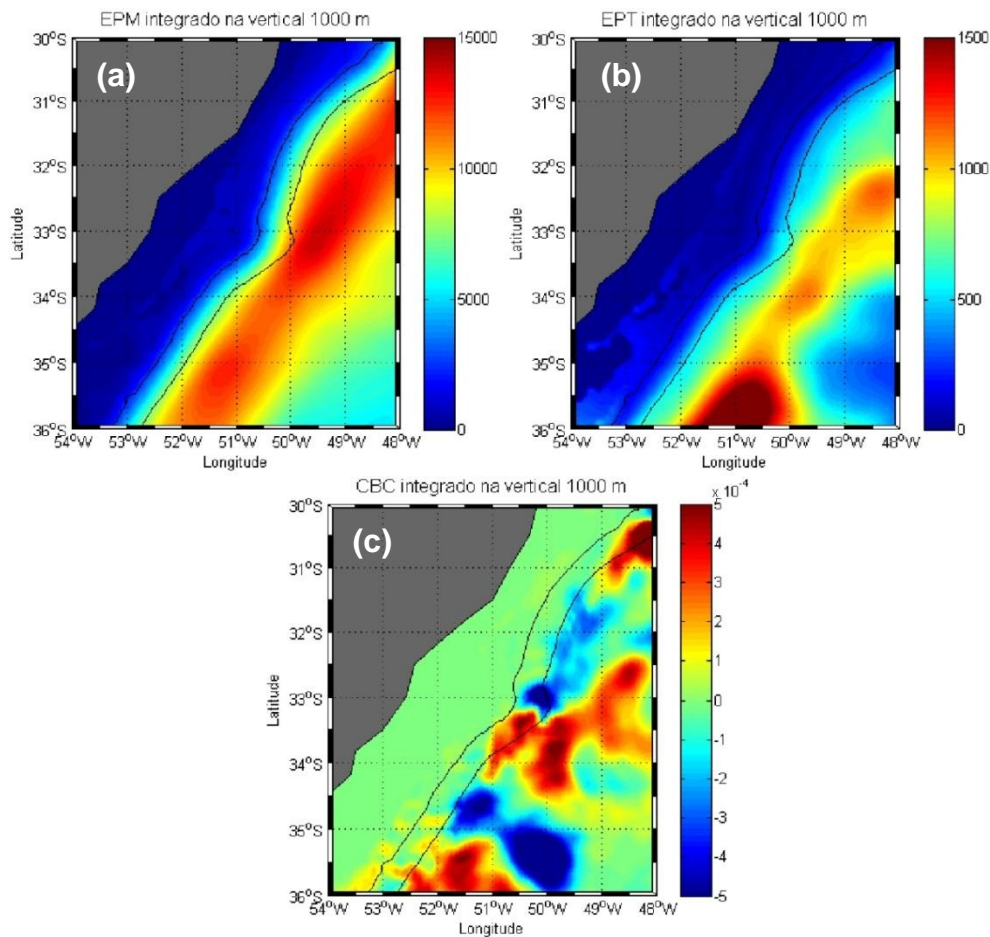
**Figura 29** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), EPT (b) e CBC (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região de Cabo Frio. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

Sobrepondo a Figura 29 (c) à Figura 8 (página 54), observamos que os locais de maior ocorrência de formação de vórtices na região estão ligados à alternância de sinal do termo de conversão baroclínica (Figura 30). Com exceção da região do vórtice de Vitória, localizada mais ao norte e que teve uma pequena defasagem longitudinal, as outras áreas apresentaram um padrão em sua dinâmica, com centros de alta pressão associados à sinais negativos do termo CBC, e centros de baixa pressão associados à sinais positivos do termo CBC. E percebe-se que as principais regiões de formação de vórtices estão ligadas às áreas onde o termo CBC possui sinal positivo.



**Figura 30** - Distribuição horizontal do termo CBC integrado na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros na região de Cabo Frio, com sobreposição do principal caminho de formação de vórtices da região. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. A unidade de medida está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

Finalmente analisamos os estoques de EPM e EPT, assim como o termo CBC, integrados na coluna d'água de 1000 metros na região do CRG, através da Figura 31. Podemos observar que a EPM encontra-se com um padrão similar ao da Figura 20, com seu máximo localizado no lado *offshore* da Corrente do Brasil na região. A EPT segue um padrão muito similar ao da ECT, e possui seus maiores valores em locais onde o termo CBC possui valores positivos elevados. Podemos perceber também que próximo à latitude de  $33,5^\circ$  S, onde as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros representam bem a estrutura do Cone, primeiramente o termo CBC torna-se bastante negativo, e após a passagem da corrente pelo cone, o termo torna-se bastante positivo. Indicando uma influência da inclinação das isopicnais causado pela presença desta feição na região.



**Figura 31** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), EPT (b) e CBC (c) integrados na coluna d'água até a profundidade de 1000 metros para a região do Cone do Rio Grande. As linhas contínuas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida de (a) e (b) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e (c) está em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

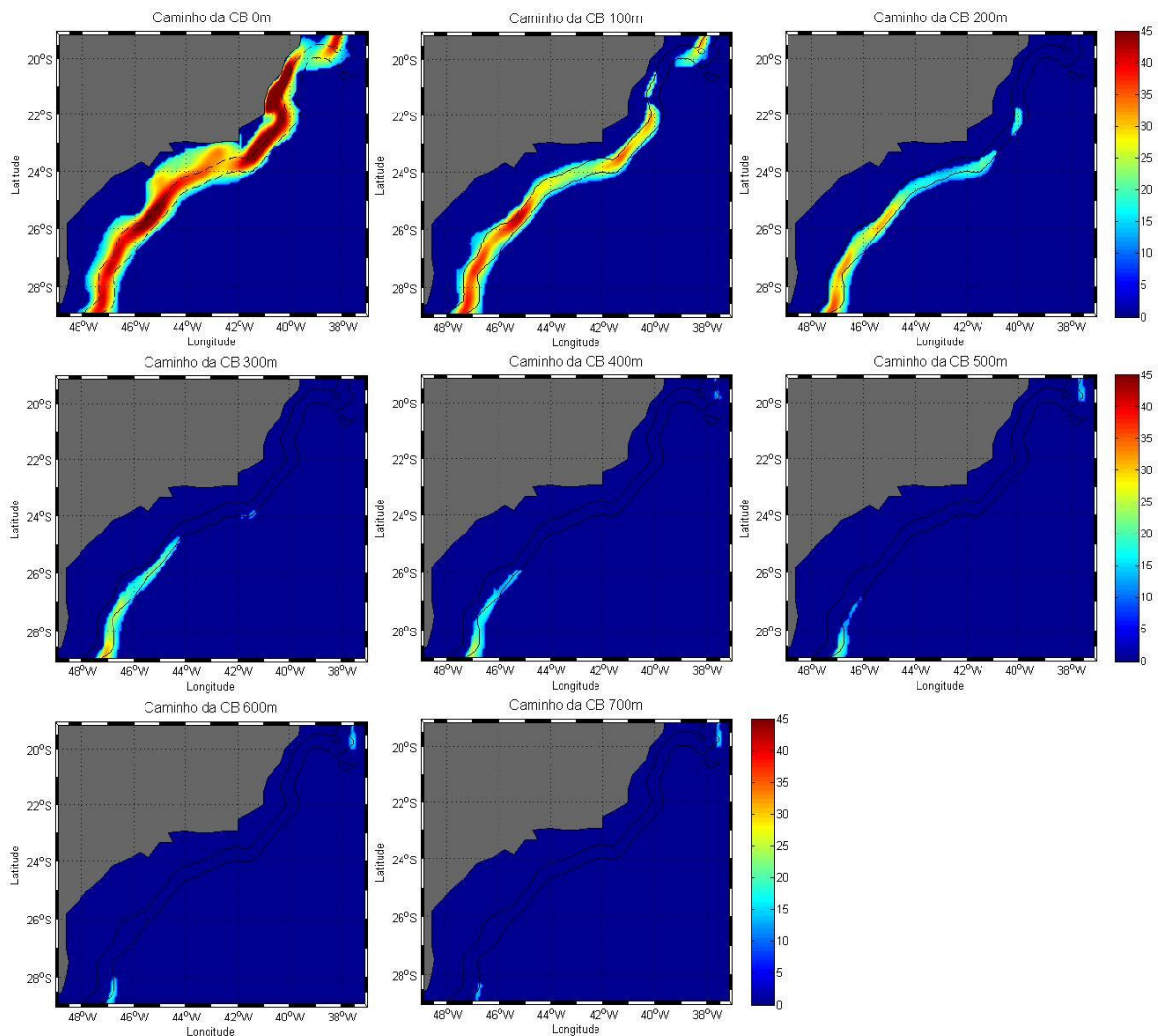
#### 4.3. Distribuição dos Estoques de Energia ao Longo da Corrente do Brasil

Como o enfoque deste trabalho é a análise do potencial de utilização do Diagrama de Lorenz, iremos agora analisar os resultados dos seus termos apenas no caminho de uma corrente de contorno oeste, neste caso, no *path* do jato da CB. Esta análise indicará se os resultados provenientes do diagrama condizem com a dinâmica local, possibilitando assim uma avaliação do potencial desta ferramenta de análise energética.

Primeiramente iremos mostrar o *path* que o jato da CB percorre na região de Cabo Frio, através da Figura 32. A figura apresenta valores de velocidade média resultante, sugerindo o *path* do jato da CB (considerado por conter valores até 30% do máximo da velocidade na coluna d'água) desde a superfície até a profundidade

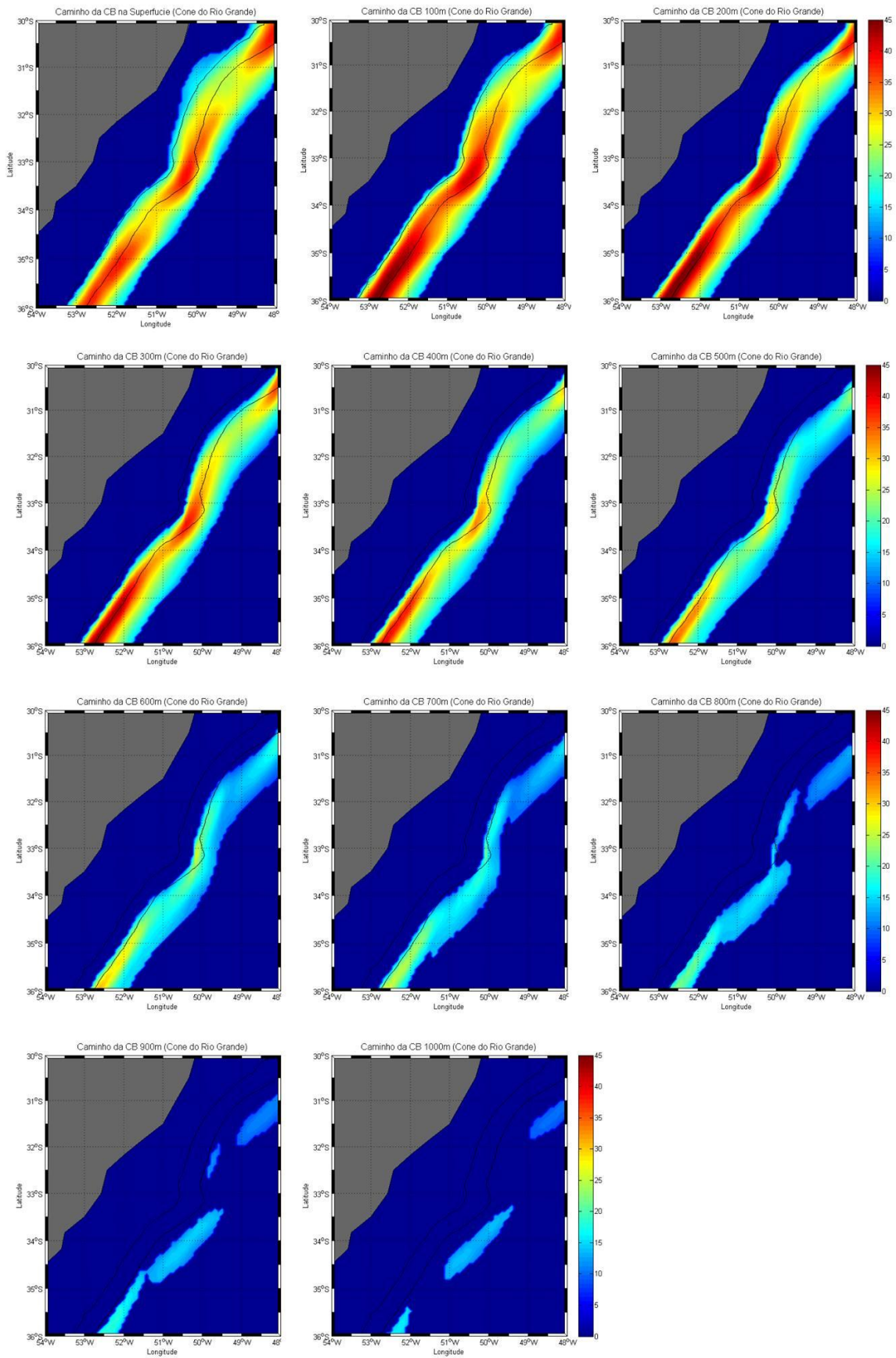


de 700 m, onde ela pode ser encontrada apenas bem ao sul, abaixo da latitude de 28° S. Esta figura é importante para a futura análise de como os estoques de energia e os termos de conversão evoluem com o aumento da profundidade. Podemos observar nesta figura que o jato da CB tem seus maiores valores de velocidade média resultante na superfície, e vai diminuindo de intensidade com o aumento da profundidade. Notamos ainda que a CB aumenta sua espessura à medida que flui para sul, corroborando com a literatura pretérita (e.g. Müller et al., 1998; Rocha et al., 2014).



**Figura 32** - Distribuição horizontal do *path* da CB em diferentes profundidades (através dos valores de velocidade média resultante), conforme indicado no título de cada imagem, para a região de Cabo Frio. As linhas contínuas pretas indicam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades estão em cm/s.

O mesmo cálculo do *path* do jato da CB foi realizado para a região do CRG (Figura 33). Nesta região o jato da CB já encontra-se mais espesso, sendo encontrado até a profundidade de 1000 metros.



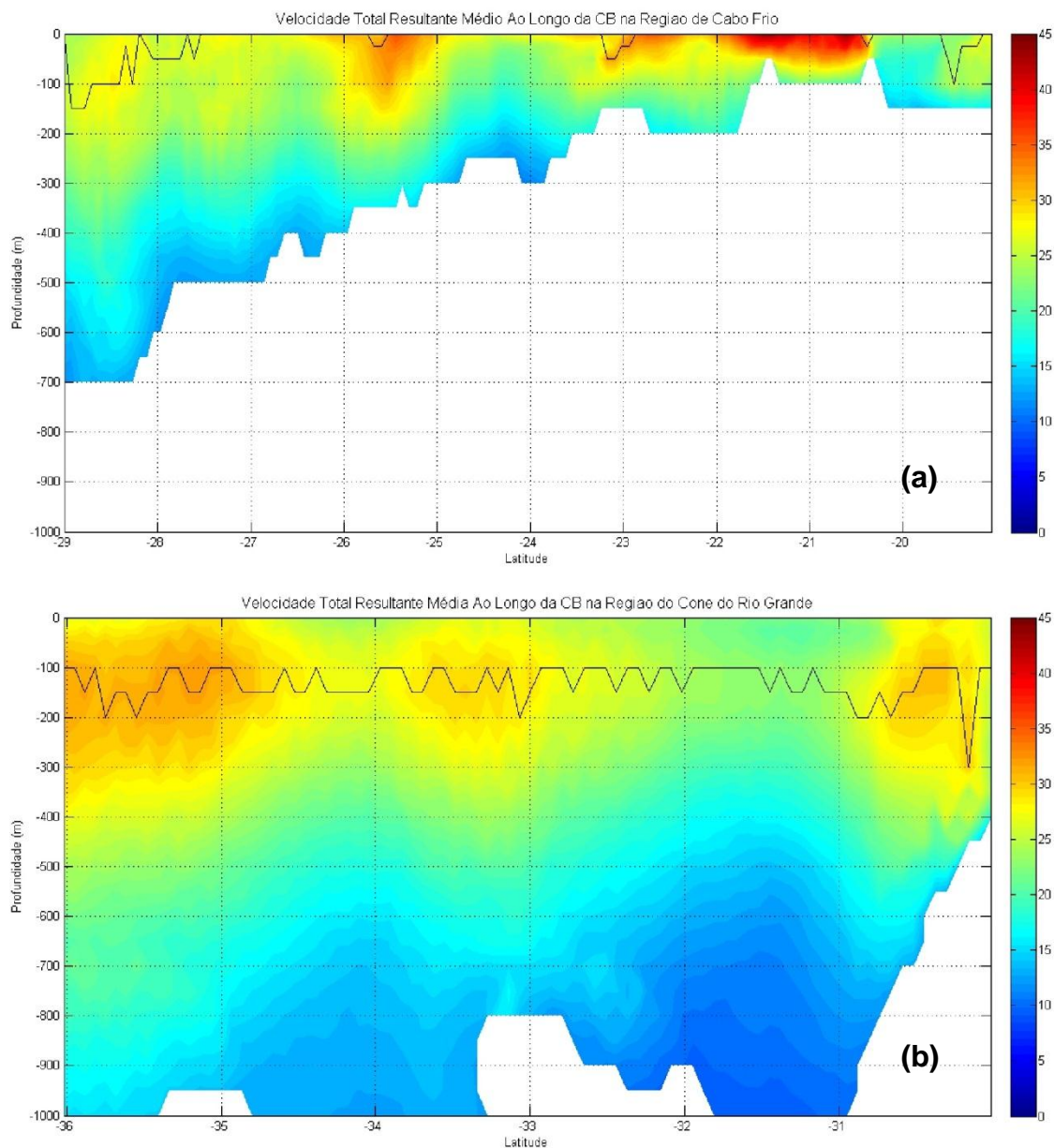
**Figura 33** - Distribuição horizontal do *path* da CB em diferentes profundidades (através dos valores de velocidade média resultante), conforme indicado no título de cada imagem, para a região do Cone do Rio Grande. As linhas contínuas pretas indicam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades estão em cm/s.

Diferentemente da região de Cabo Frio, na região do CRG a CB encontra-se mais forte em sub-superfície, por volta da profundidade de 150 metros. Observamos também que a CB, conforme esperado, tende a acompanhar as linhas isobatimétricas entre 200 m e 1000 m, inclusive apresentando um contorno em cima do Cone do Rio Grande.

Depois de traçado o *path* do jato da CB em toda a coluna d'água, iremos agora analisar a evolução dos estoques de energia e dos termos de conversão em uma visão lateral (como se estivéssemos "vendo" a CB ao lado dela, no sentido do oceano para o continente, enquanto ela flui para sul). Este cálculo foi feito com a média dos valores em cada profundidade, latitudinalmente, mas apenas com os valores localizados "dentro" da área das Figuras 32 e 33 correspondentes ao jato da CB.

Antes de apresentar a evolução dos estoques de energia e dos termos de conversão, vamos demonstrar a evolução do jato da CB pela vista lateral. As velocidades foram promediadas latitudinalmente, ou seja, em cada latitude e em cada profundidade, apenas na área determinada como sendo do jato da CB, conforme mostrado nas Figuras 32 e 33, foi calculada a média da velocidade média resultante e este valor foi plotado na Figura 34. Podemos observar através dela, o aumento de espessura da CB à medida que esta flui para sul, assim como o subsequente aprofundamento do seu jato. Cabe ainda destacar a pequena profundidade do jato da CB entre 20 e 22° S, próximo à região dos bancos de Vitória.

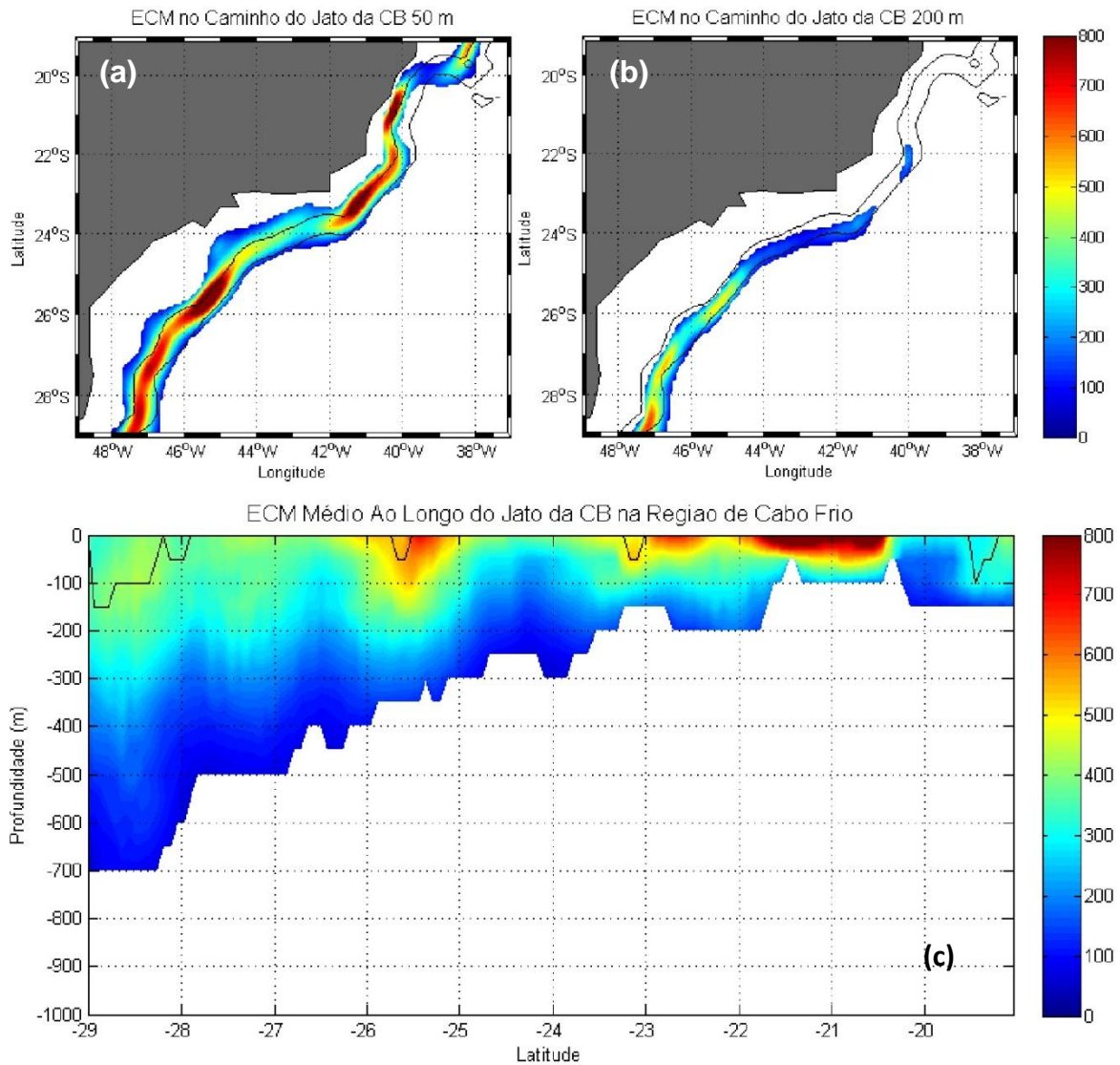
Cabe ressaltar ao leitor que os valores em branco nas figuras de vista lateral representam áreas de terra ou de água que não fazem parte do jato da CB, por isso foram retiradas da figura, para realçar apenas a região do jato da CB.



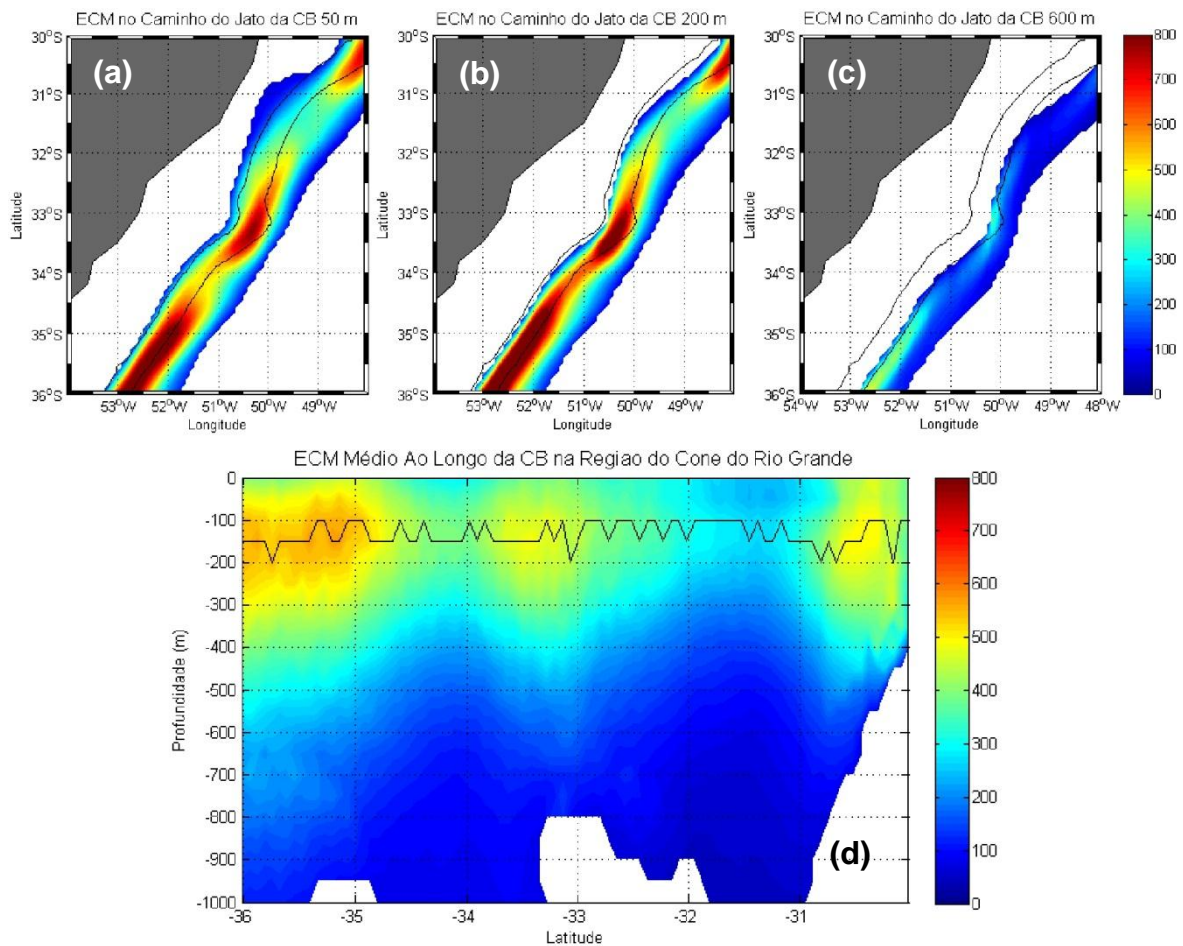
**Figura 34** - Distribuição vertical média das velocidades da CB ao longo do seu *path* de norte para sul, em uma vista lateral. A imagem (a) representa a região de CF, e (b) a região do CRG. As linhas pretas indicam a profundidade de velocidade máxima (onde elas não aparecem significa que o valor máximo encontra-se em superfície). As áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em cm/s.

As Figuras 35 e 36 apresentam, respectivamente, a evolução da ECM nas regiões de Cabo Frio e do Cone do Rio Grande. Podemos perceber que na região de CF a ECM tem seus máximos principalmente na superfície, enquanto na região

do CRG ela possui seus valores máximos em sub-superfície, oscilando entre 100 e 200 metros de profundidade.

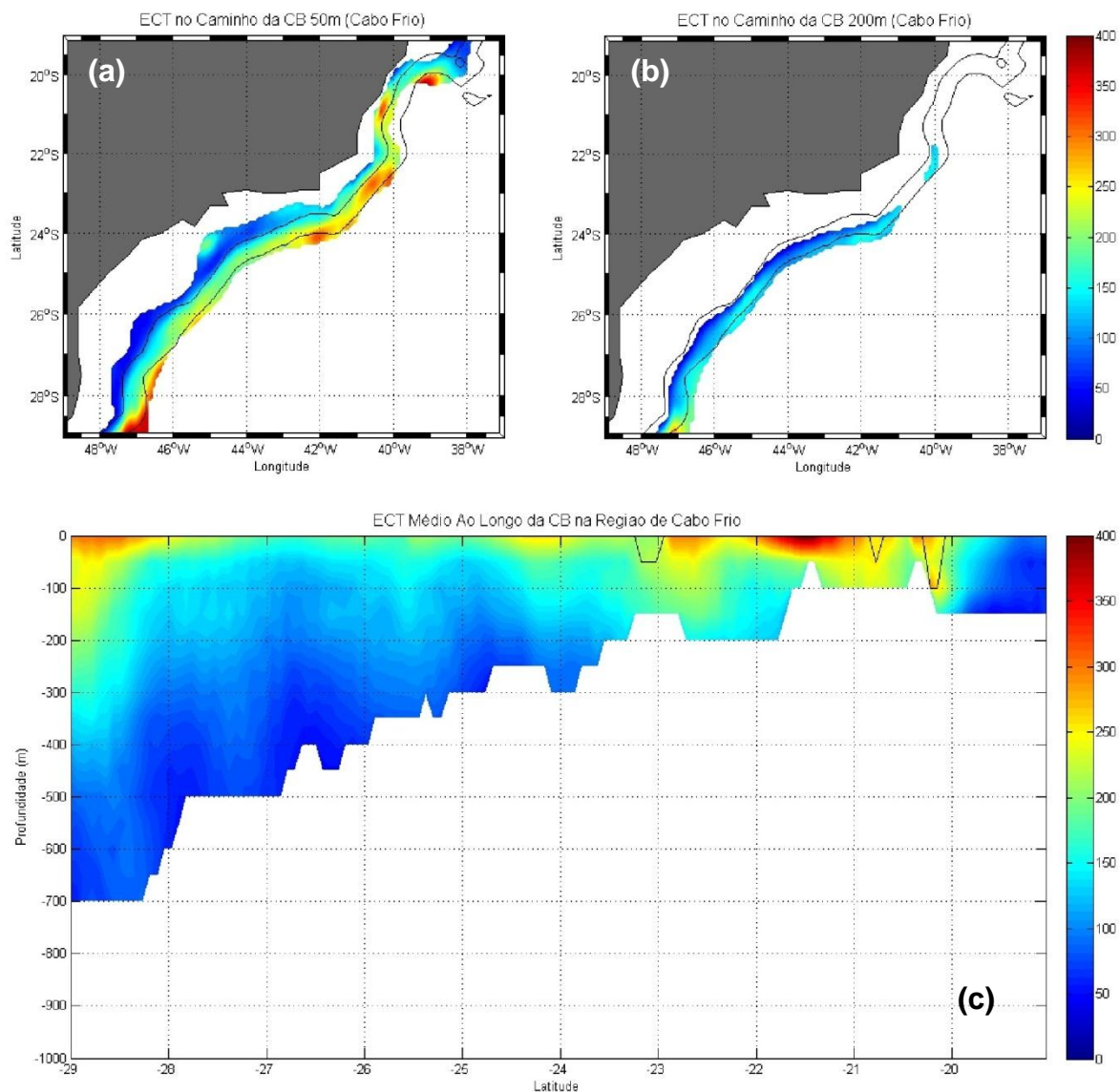


**Figura 35** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de ECM no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de ECM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECM (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

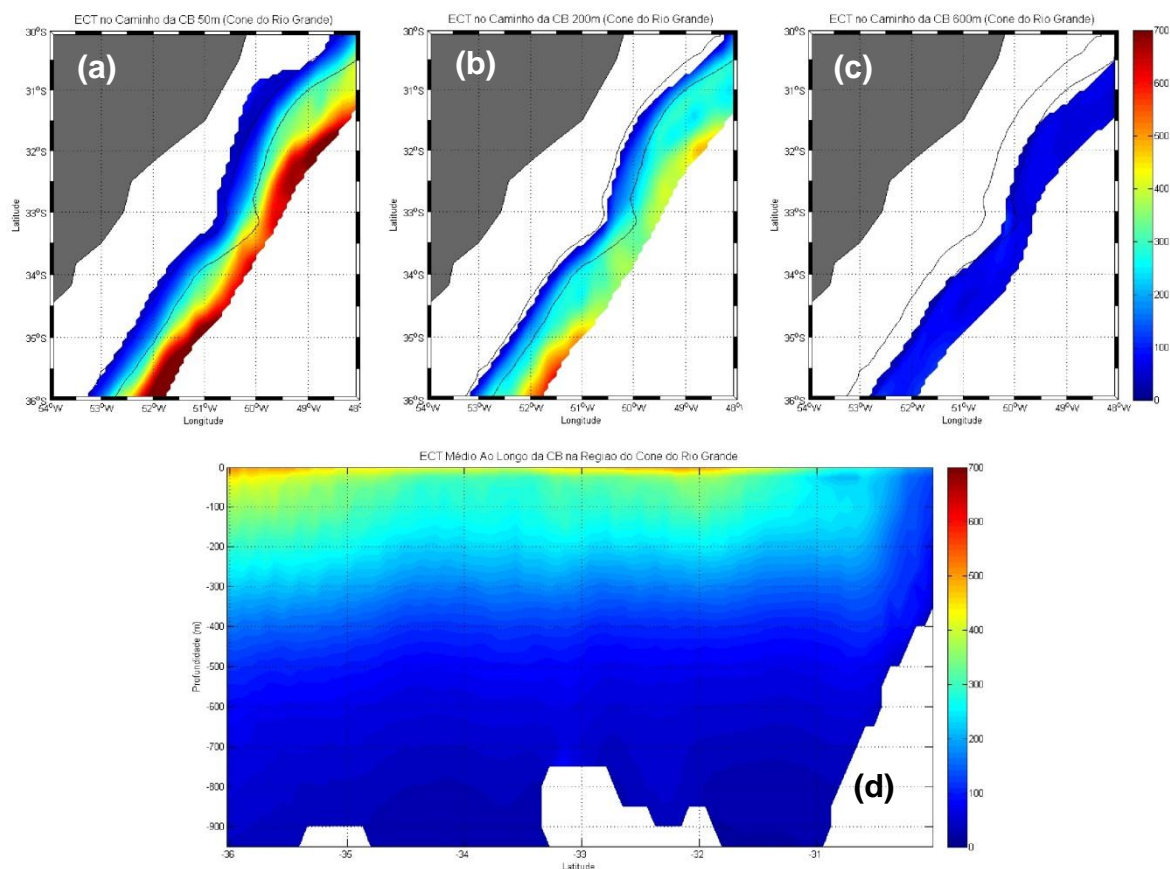


**Figura 36** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de ECM no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de ECM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECM (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

O estoque de ECT nas duas regiões foi avaliado e apresentado nas Figuras 37 e 38. Em ambas as regiões a ECT máxima foi encontrada nas menores profundidades e no lado *offshore* do jato da corrente. Na região do CRG, a ECT é mais intensa, com valores até duas vezes maiores do que na região de CF.



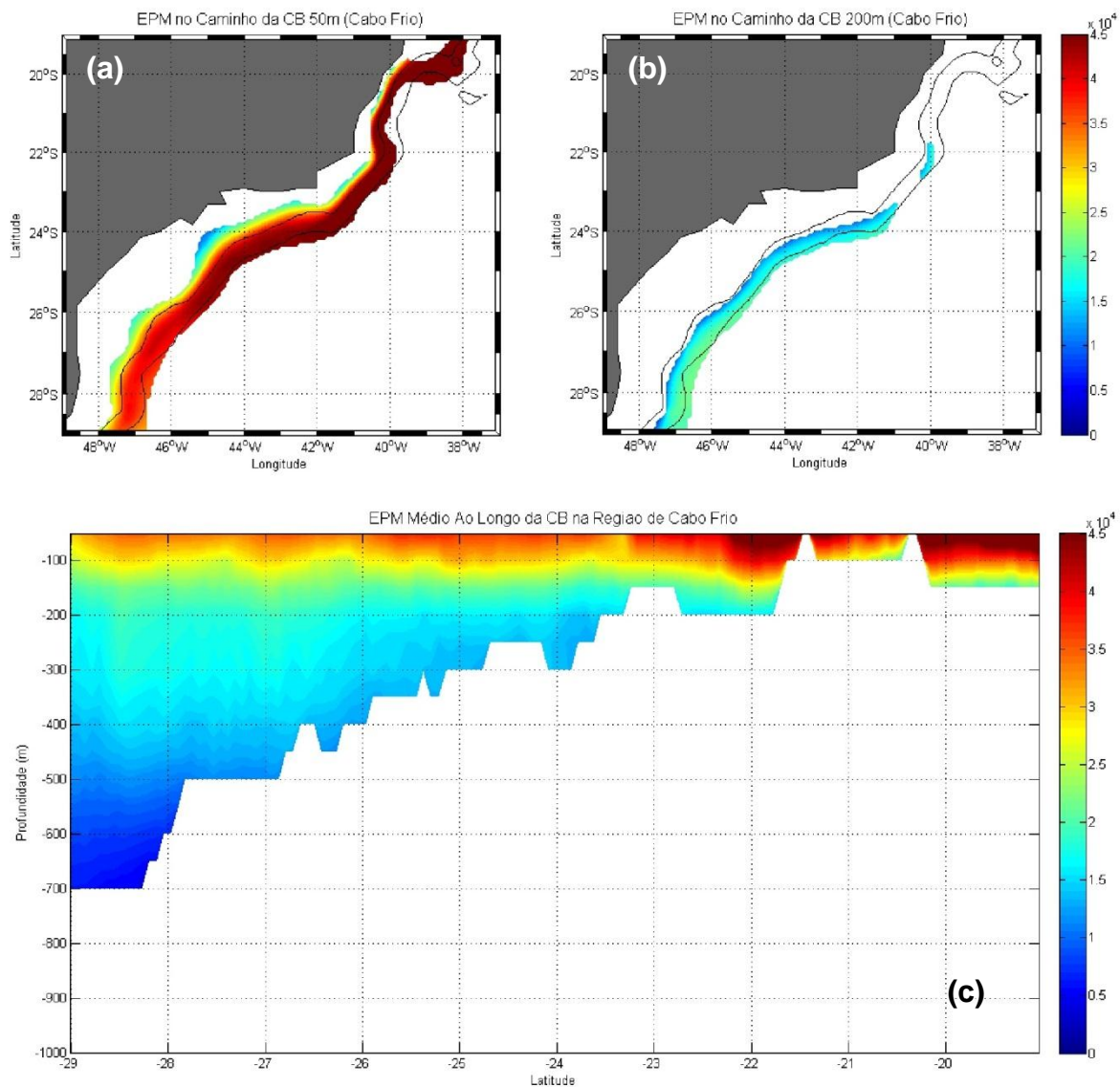
**Figura 37** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de ECT no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de ECT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .



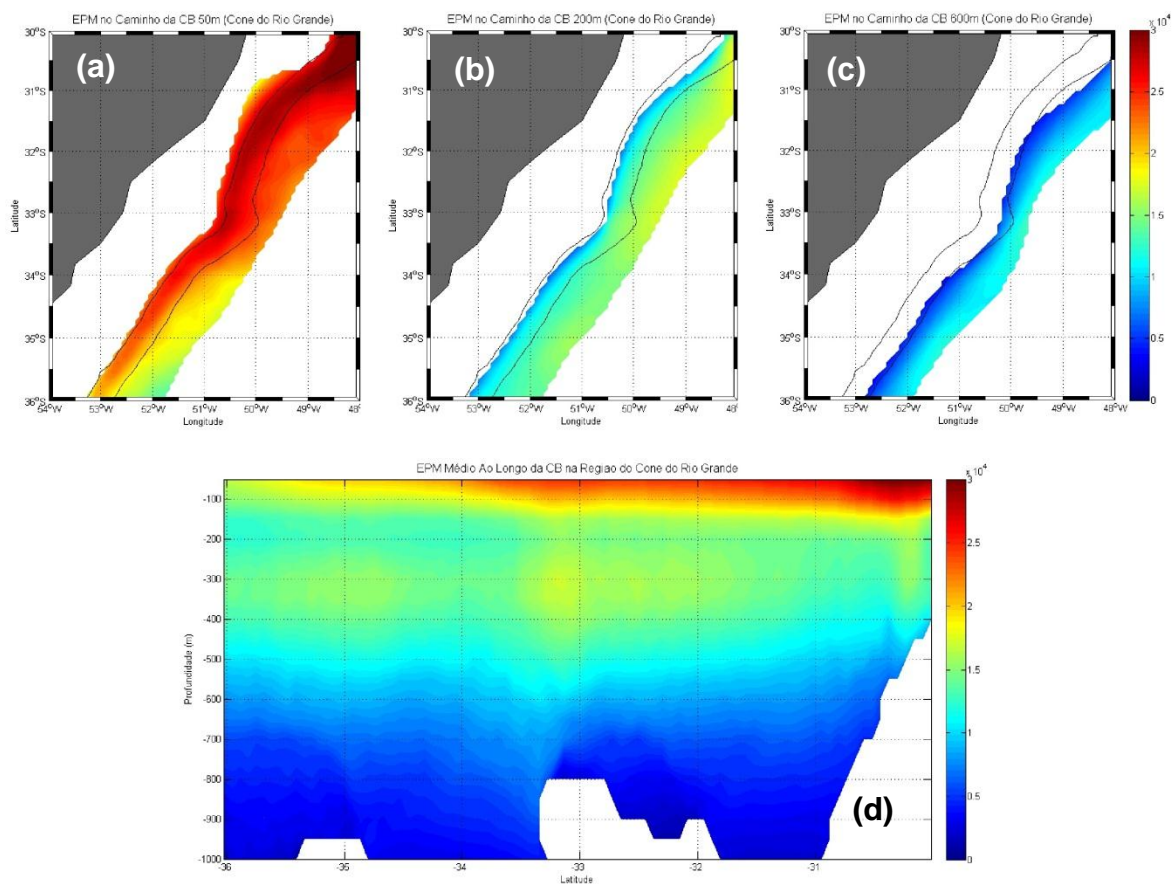
**Figura 38** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de ECT no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de ECT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

Diferentemente dos estoques de ECM e ECT, no estoque de EPM, os maiores valores encontram-se na região de Cabo Frio, mas ainda na superfície (Figuras 39 e 40). Os valores de EPM tendem a diminuir com o aumento (absoluto) na latitude, ao contrário do que acontece com os estoques de ECM e ECT. Nas figuras de EPM, EPT e CBC, a profundidade inicial é de 50 metros, diferente das demais figuras que começam na superfície. Isso se dá devido ao cálculo destes termos apresentarem uma derivada em “z”, o que requer uma diferença entre dois níveis de profundidade, impossibilitando o cálculo destes estoques na superfície do mar.



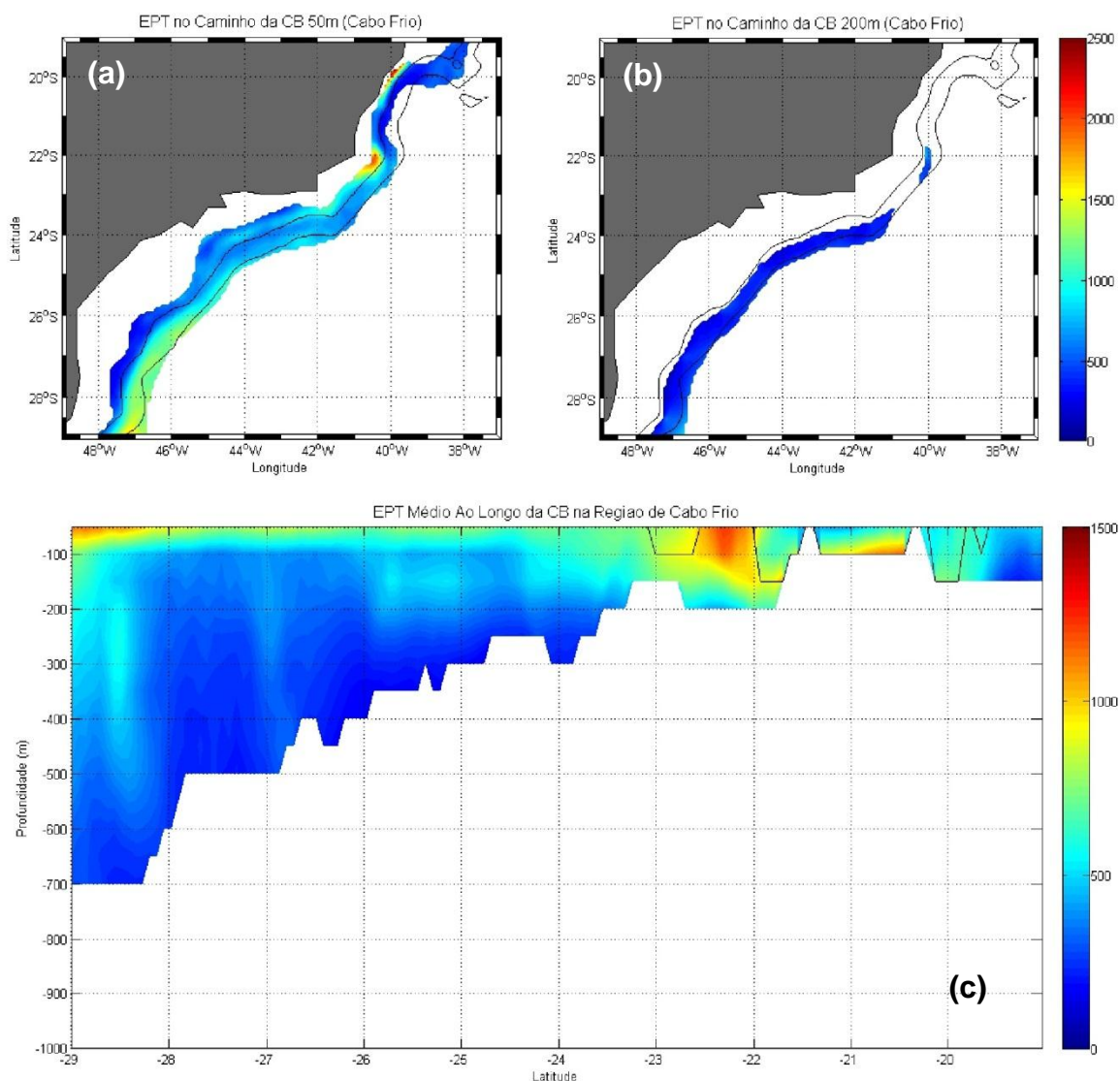


**Figura 39** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de EPM no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatismétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de EPM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

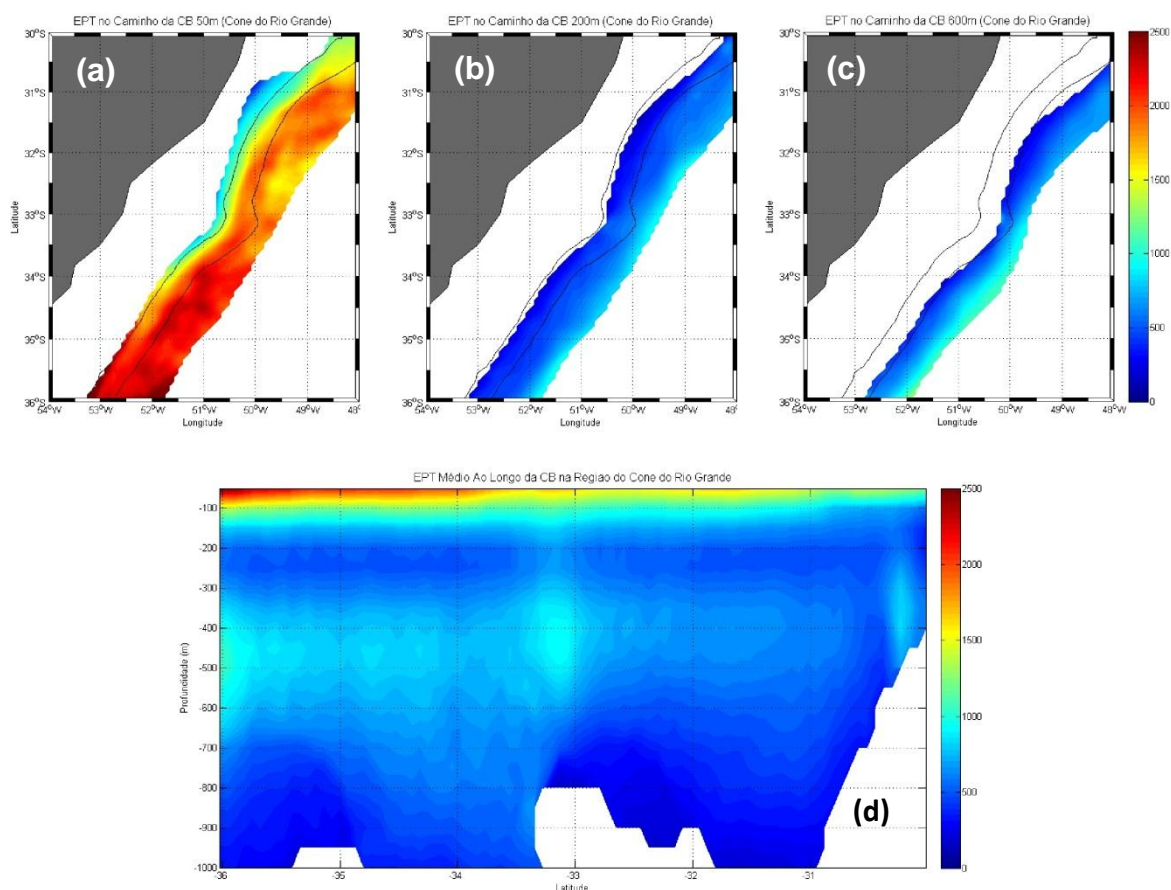


**Figura 40** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de EPM no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de EPM na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

Os estoques de EPT novamente se assemelham bastante aos estoques de ECT, porém apresentam uma elevação nos valores no meio da coluna d'água, em algumas latitudes, assim como o estoque de EPM na região do CRG. O estoque de EPT, assim como o de ECT, tende a ter seus maiores valores no lado *offshore* do jato da CB, com exceção da região de Cabo Frio, onde nas latitudes de 20 e 22° S apresentam um máximo de EPT no lado mais raso da corrente. Na região do CRG, a EPT possui seus valores máximos no topo da coluna d'água, enquanto que em Cabo Frio, apresentam alguns máximos em sub-superfície. As Figuras 41 e 42 apresentam os estoques de EPT citados acima.



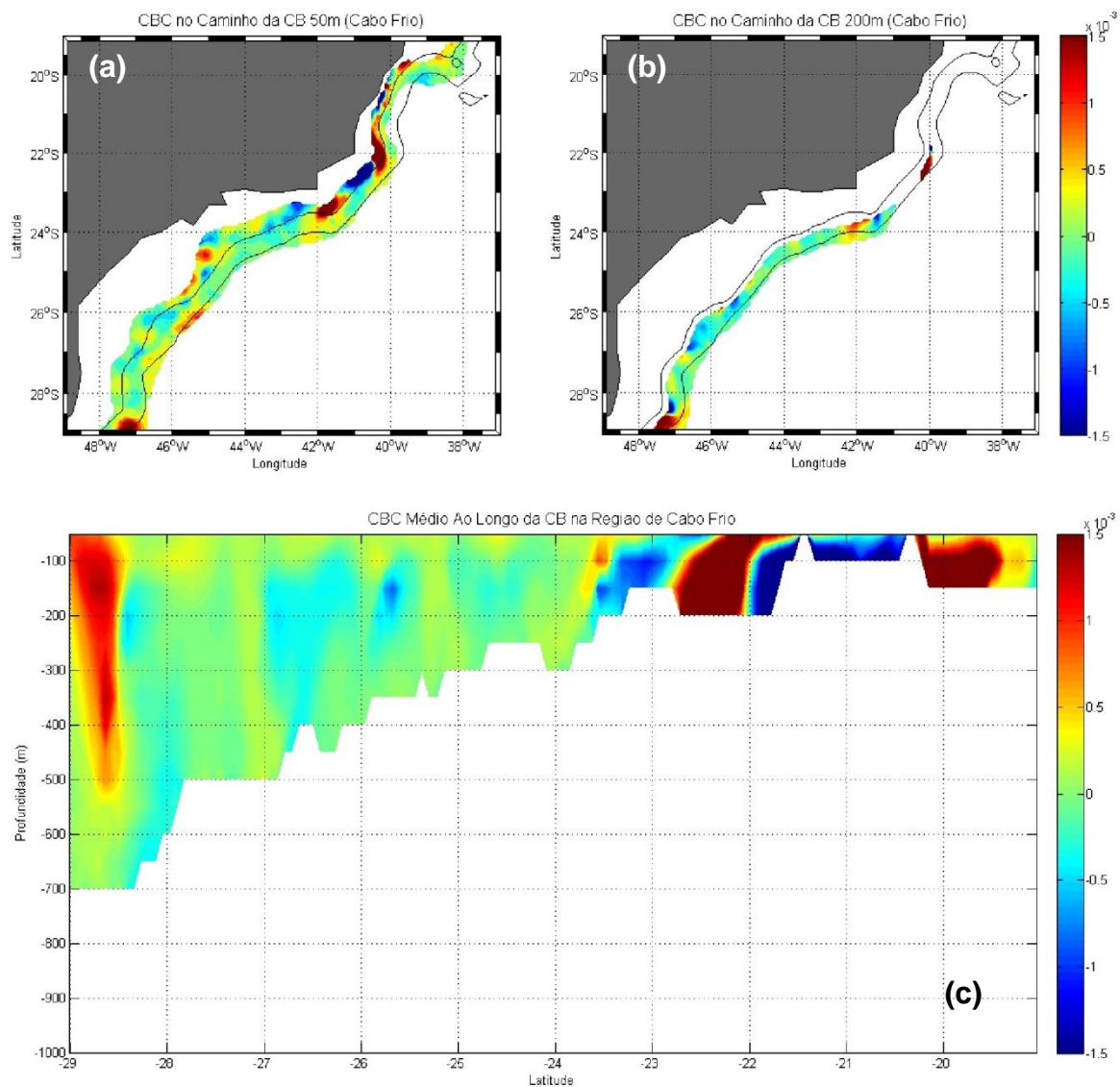
**Figura 41** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do estoque de EPT no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do estoque de EPT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .



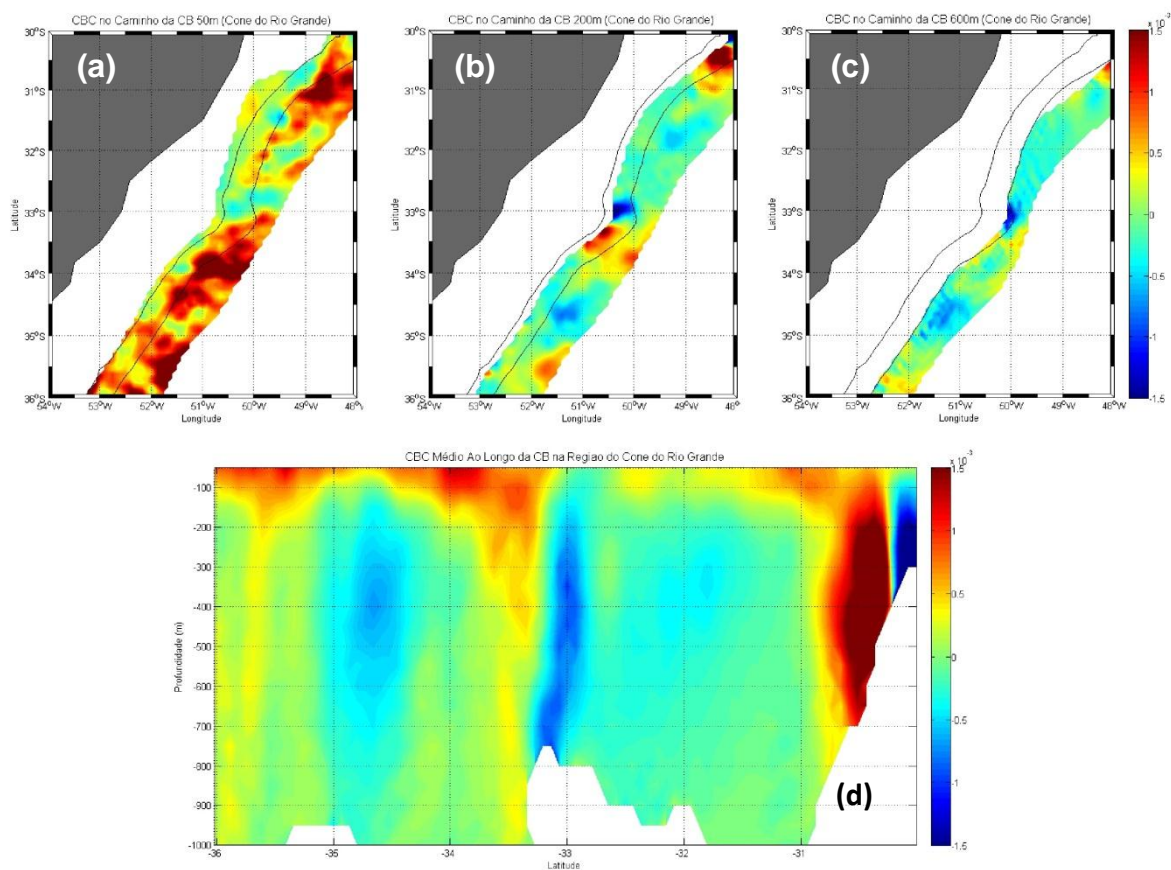
**Figura 42** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do estoque de EPT no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isotimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do estoque de EPT na mesma região, em uma vista lateral, onde a linha contínua preta indica a profundidade de valor máximo de ECT (onde ela não aparece significa que o valor máximo encontra-se em superfície) e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

As Figuras 43 e 44 apresentam a estrutura vertical dos termos de conversão baroclínica (CBC) nas duas regiões. A região de Cabo Frio apresenta os maiores valores deste termo entre as latitudes de 20 e 23° S, e estes altos valores se mantêm com o aumento da profundidade nestas latitudes, demonstrando intensa atividade de conversão de energias nesta área onde a CB muda abruptamente sua direção ao tentar acompanhar a batimetria. Após estes picos, o termo CBC diminui de intensidade, e irá aumentar seus valores novamente apenas ao sul da região de CF, próximo a latitude de 29° S. Na região do CRG este termo é predominantemente positivo nas menores profundidades, e negativo nas profundidades intermediárias. A

Figura 44 evidencia também a troca de sinal do termo CBC quando o jato da CB se aproxima do CRG, ficando negativo quando chega ao Cone, e positivo quando ultrapassa a feição.

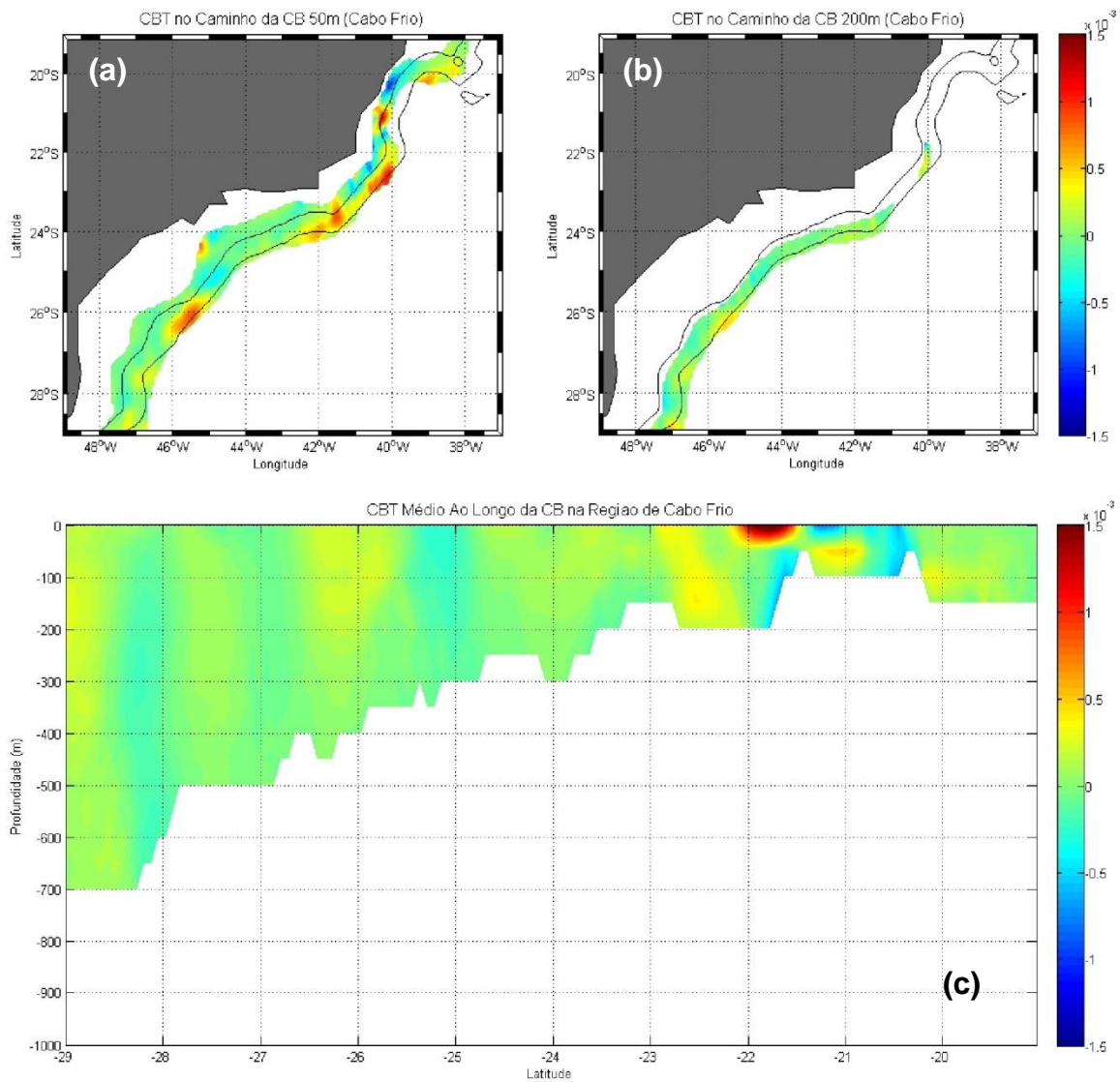


**Figura 43** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do termo CBC no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do termo CBC na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

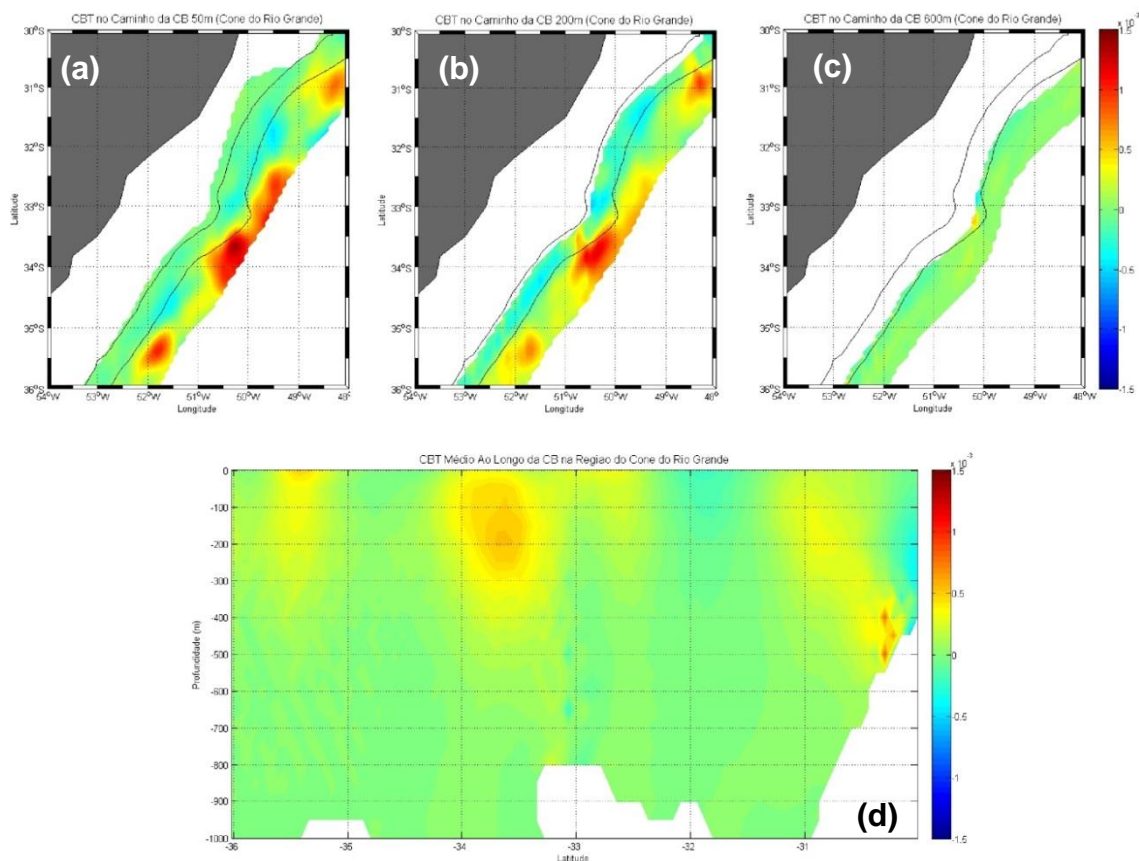


**Figura 44** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do termo CBC no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do termo CBC na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

O termo CBT é apresentado nas Figuras 45 e 46. Podemos observar na região de Cabo Frio que os valores máximos encontram-se aproximadamente nas mesmas áreas dos máximos de CBC, o que indica que o campo médio e o campo turbulento em ambas as energias estão em grande atividade de conversão nesta área. Tanto na região de CF como na região do CRG, o termo CBT apresentou, em média, uma estrutura de valores positivos na região mais *offshore*, e negativo nas menores profundidades.



**Figura 45** - As imagens (a) e (b) representam a distribuição horizontal do termo CBT no *path* do jato da CB na região de Cabo Frio, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (c) representa a distribuição vertical média do termo CBT na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .



**Figura 46** - As imagens (a), (b) e (c) representam a distribuição horizontal do termo CBT no *path* do jato da CB na região do Cone do Rio Grande, as linhas contínuas pretas indicam as isobatimétricas de 200 e 1000 metros, e as profundidades estão indicadas no título das imagens. A imagem (d) representa a distribuição vertical média do termo CBT na mesma região, em uma vista lateral e as áreas em branco em representam regiões de terra ou água fora do jato da CB. As unidades estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

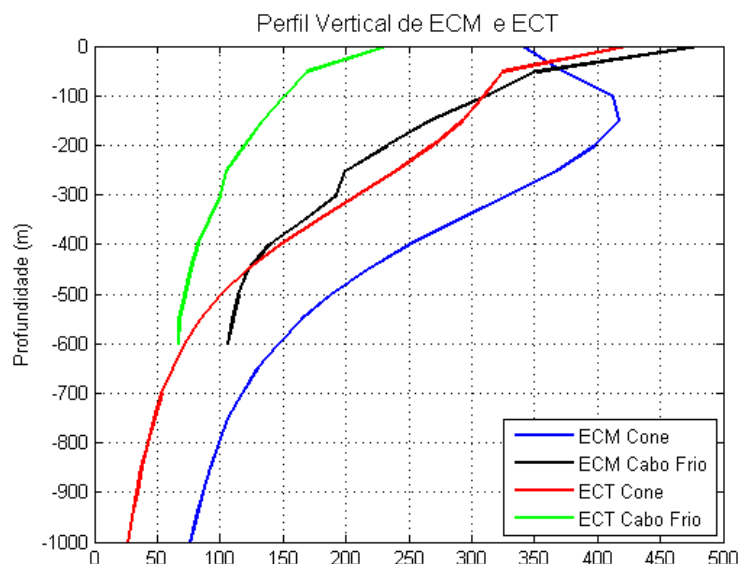
A partir dos dados dos termos acima, restritos à região de atuação de uma CCO (no caso a CB), geramos perfis verticais restritos à área onde passa o jato da CB. Por esse motivo, os termos apresentados a seguir que representam a região de Cabo Frio irão evoluir apenas até a profundidade de 600 metros, pois apesar da Figura 32 demonstrar que em 700 metros ainda podemos ver resquícios da CB bem ao sul desta região, optamos por representar os termos até a profundidade de 600 metros, para uma melhor representação da região.

A Figura 47 apresenta a estrutura vertical dos estoques de ECM e ECT para as duas regiões de ênfase deste estudo, Cabo Frio e Cone do Rio Grande. Podemos observar que tanto a ECM quanto a ECT possuem maiores valores, em média, na região do CRG do que na região de CF (apenas na superfície a ECM em Cabo Frio supera a ECM no Cone do Rio Grande). Notamos ainda que ambas as energias



tendem a diminuir de magnitude com o aumento da profundidade, exceto por um pico de ECM na profundidade de 150 metros na região do CRG, que pode ser explicado pela presença da CB nesta profundidade nesta região, e não em superfície, como na região de CF (que explica o pico maior de ECM em superfície).

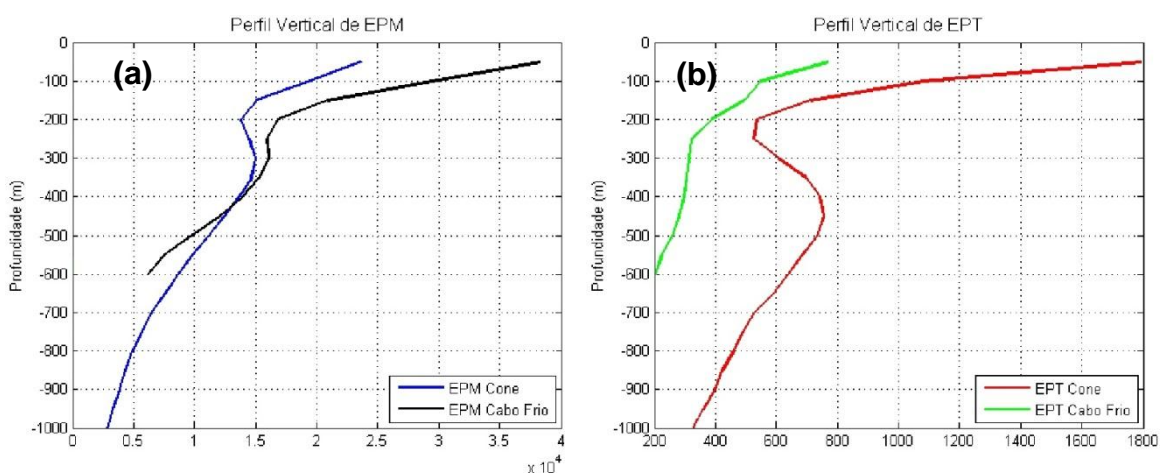
Outra característica que pode ser visualizada é a queda brusca nos valores para a região de CF, onde a ECT cai para valores menores que  $100 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  abaixo dos 300 metros, enquanto que na região do CRG este valor só é atingido em profundidades maiores do que 500 metros; assim como a ECM em CF atinge valores menores que  $300 \text{ cm}^2/\text{s}^2$  por volta de 100 metros de profundidade, ao passo que na região do CRG a ECM é menor que este valor apenas em 350 metros de profundidade. Essa dominância vertical da ECM na coluna d'água não foi encontrada no trabalho de Kang & Curchitser (2015) para a CG, onde eles encontraram valores de ECT dominando os valores de ECM. Assim como no trabalho de Von Storch et al. (2012), que ao realizarem estes perfis verticais para a toda a bacia oceânica global, também encontraram maiores valores de ECT do que de ECM. Porém em ambos estes trabalhos, assim como neste aqui, as energias cinéticas tendem a perder força com o aumento das profundidades.



**Figura 47** - Perfil vertical de ECM e ECT para as regiões de Cabo Frio e Cone do Rio Grade. As unidades no eixo "x" estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

Já os perfis de EPM e EPT são apresentados na Figura 48. Observamos através desta, que os valores de EPM são bem maiores do que os valores de EPT e

ambas as energias potenciais possuem seus maiores valores na superfície. Outra tendência observada aqui, que também foi observada nos estoques de ECM e ECT, é a diminuição dos valores de EPT e EPM com o aumento da profundidade. Apesar de a região do CRG apresentar um aumento significativo em ambos os estoques entre as profundidades de 300 e 500 metros. O perfil do jato de EPM é maior na região de Cabo Frio do que na região do Cone, já o perfil de EPT na região do Cone foi maior do que na região de CF. O trabalho de [Kang & Curchitser \(2015\)](#) também analisou o perfil vertical das energias potenciais (média e turbulenta) para a região da Corrente do Golfo, e assim como neste trabalho, encontrou maiores valores em superfície, e a EPM sendo dominante sobre a EPT.

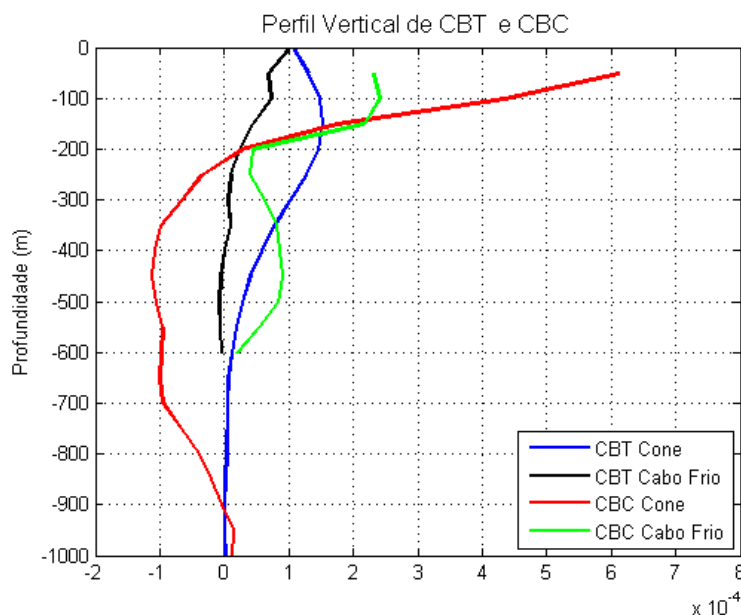


**Figura 48** - Perfil vertical de EPM (a) e EPT (b) para as regiões de Cabo Frio e Cone do Rio Grade. As unidades no eixo “x” estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ .

A análise dos termos de conversão barotrópica e baroclínica será feita através da Figura 49. Avaliando o termo CBT, podemos destacar que este possui (na região do CRG) um alto valor positivo nas camadas acima de 400 metros, indicando uma grande conversão energética de energia cinética do campo médio para o turbulento. Analisando a região de CF, este termo é mais alto da superfície até a profundidade de 200 metros, porém, sempre com menor magnitude do que o mesmo termo na região do CRG. Estes altos valores de CBT nestas profundidades citadas podem estar ligados com a presença de um jato da CB mais intenso nestas profundidades. Chama ainda a atenção a ausência de sobre-estabilidades barotrópicas (mínima em algumas profundidades na região de CF), o que parece indicar que as conversões barotrópicas são imediatamente incorporadas pela

cascata de energia no sentido dos menores vórtices, o que não ocorre, por exemplo, com as conversões baroclínicas na região do CRG.

O termo CBC possui maiores valores próximo à superfície na região do CRG, assim como com o termo CBT. Notamos ainda um pico de CBC negativo na região do Cone, entre as profundidades de 250 e 800 metros, o que indica uma conversão de energia potencial do campo turbulento para o campo médio, caracterizando uma condição de sobre-estabilidade nessas profundidades. Cabe ainda ressaltar o pico de CBC positivo na região de CF entre as profundidades de 300 e 500 metros, indicando uma forte conversão de EPM em EPT nessas profundidades.

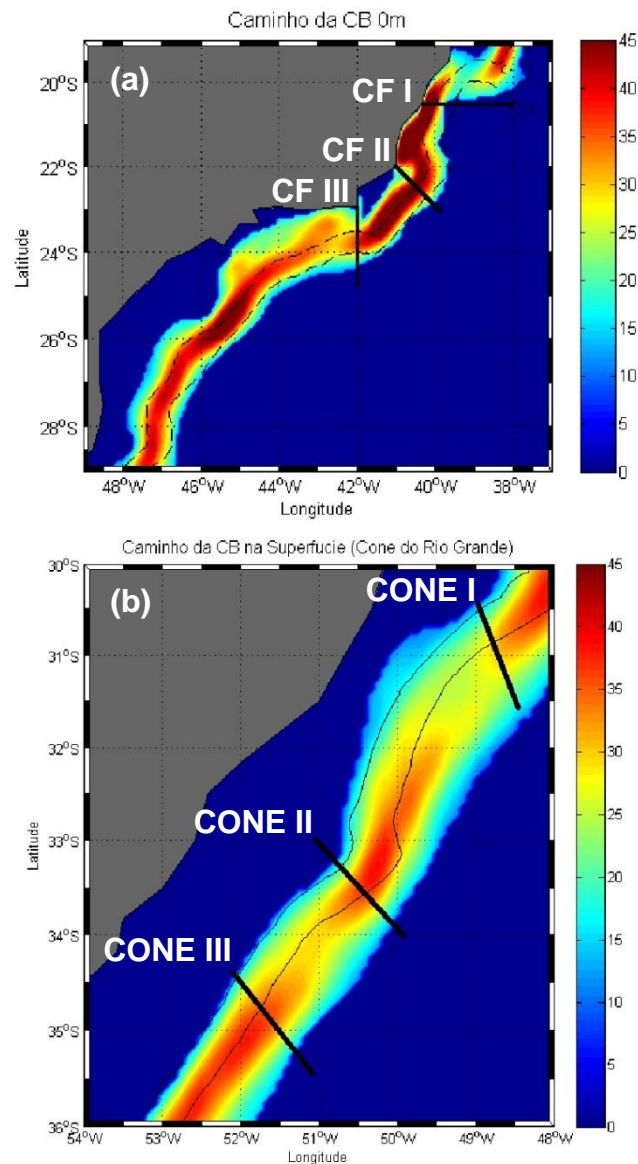


**Figura 49** - Perfil vertical de CBC e CBT para as regiões de Cabo Frio e Cone do Rio Grande. As unidades no eixo "x" estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ .

#### 4.4. Representação do Diagrama de Lorenz ao Longo de uma CCO

A última seção deste capítulo irá apresentar agora o Diagrama de Lorenz com o cálculo dos seus termos para três transectos na região de Cabo Frio, e três transectos na região do Cone do Rio Grande, conforme mostra a Figura 50. Os diagramas calculados neste transectos sempre representam apenas a área considerada como sendo o jato da CB, e onde o restante dos valores dos termos na coluna d'água não são considerados nos cálculos de montagem dos diagramas.

Além destes seis transectos, foram realizados mais dois diagramas, abrangendo todo jato da CB para cada região.



**Figura 50** - Campo de velocidade resultante média superficial nas regiões de Cabo Frio (a) e do Cone do Rio Grande (b). As unidades estão em cm/s. As linhas pretas grossas representam os transectos calculados.

Primeiramente iremos apresentar o Diagrama do transecto chamado de CF I, conforme Figura 50a. Além do cálculo dos diagramas, ainda realizamos perfis verticais, para uma análise dos estoques de energia e dos termos de conversão em toda a coluna d'água. A Figura 51 apresenta os perfis verticais destes termos para o transecto CF I. A linha preta grossa nas imagens representa o local onde passa o jato da CB no transecto. Cabe ressaltar novamente que os termos EPM, EPT e CBC

são calculados a partir da profundidade de 50 metros, e não da superfície, conforme já foi explicado anteriormente neste trabalho.

Neste transecto localizado mais ao norte podemos ver, conforme Figura 51, que o jato da CB encontra-se bem raso, apenas com cerca de 100 metros de profundidade e muito próximo da linha de costa. Os maiores valores do termo ECM estão localizados na área interna do jato, enquanto que os termos ECT e EPM possuem seus maiores valores na região mais *offshore* do transecto. O termo EPT possui um pico dentro da área do jato da CB e outro mais afastado da costa e um pouco mais profundo, na mesma região onde o termo CBC possui um alto valor positivo, o que pode explicar o porquê deste pico no estoque de EPT. Tanto o termo CBC quanto o termo CBT possuem valores negativos no interior do jato da CB, e positivos a esquerda deste, indicando uma conversão em um sentido no interior do jato, e no sentido contrário nas adjacências.

O Diagrama de Lorenz para este transecto é apresentado na Figura 52. Neste transecto como o jato da CB é muito raso, calculamos o diagrama apenas para a profundidade de 50 metros, já que em 200 metros não encontramos o jato da CB.

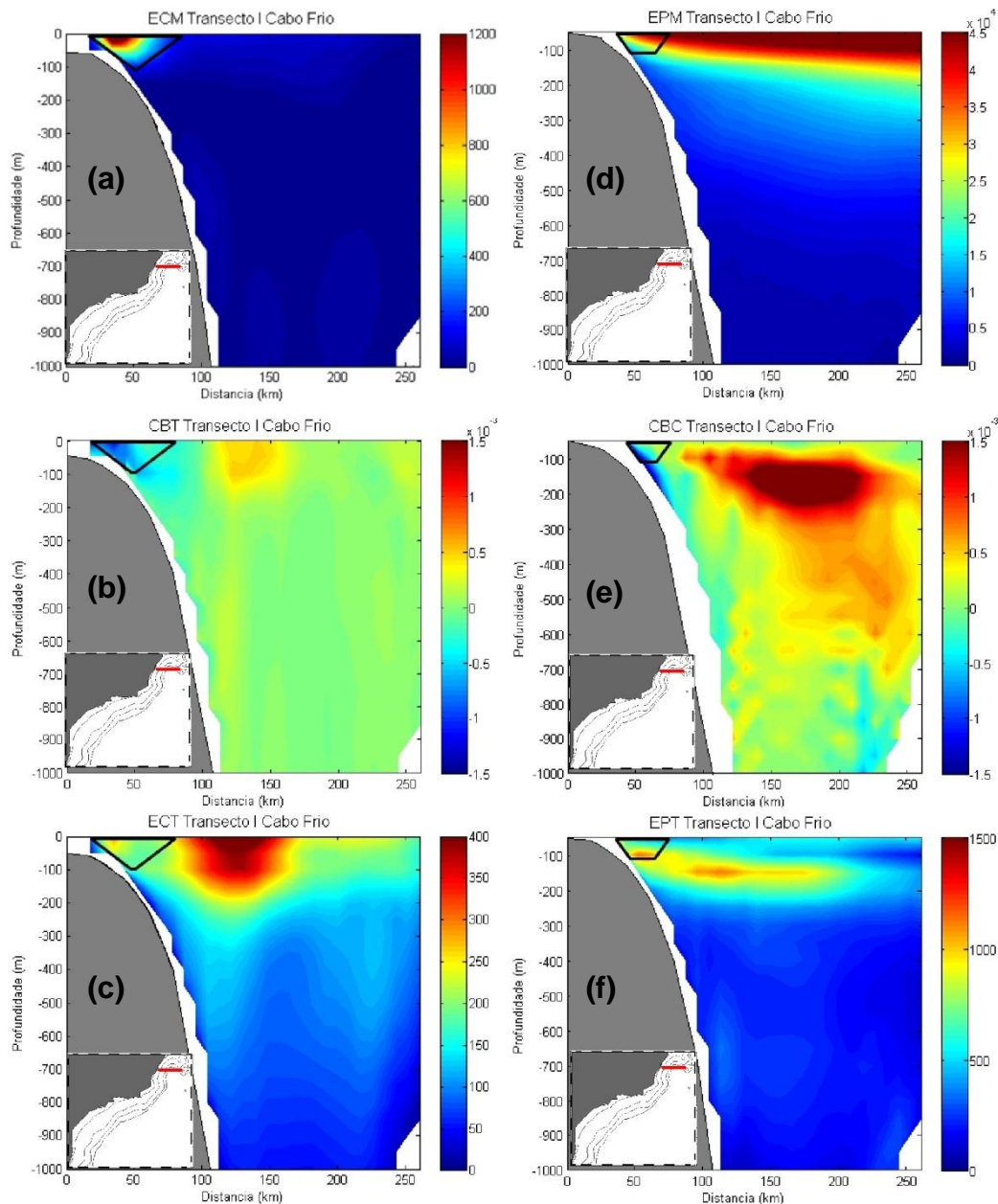
O sentido das setas dos termos CBT e CBC indica uma condição de sobre-estabilidade da CB neste transecto, onde ocorre a conversão de energia do campo turbulento para o campo médio. Ou seja, o campo médio é acelerado em função do decaimento de vórtices associados ao campo turbulento.

Outro termo que merece destaque é o termo AEPM\_EM, que demonstra que o estoque de EPM é bastante favorecido com o aporte de EPM pelo campo médio do escoamento.

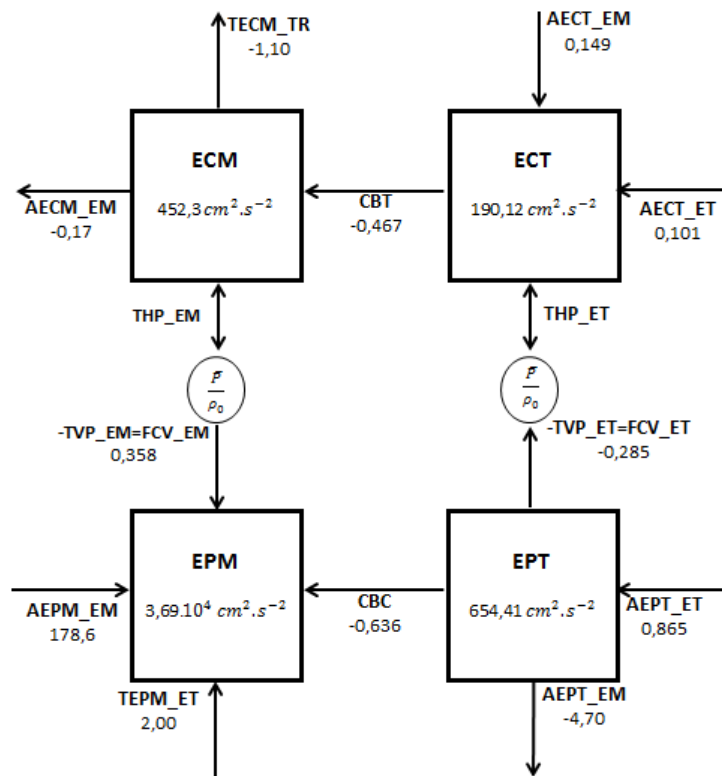
Os termos AECT\_EM e AECT\_ET funcionam como fontes de ECT, retirando energia do escoamento e somando ao estoque de ECT. Estes termos são, juntamente com o termo FCV\_ET, responsáveis pelo suprimento do estoque de ECT neste transecto e foram destacados pois, como veremos a seguir neste trabalho, apenas neste transecto eles funcionam como fonte de ECT, nos demais transectos observaremos que eles serão sumidouros de ECT. Cabe ainda destacar que o termo FCV\_ET foi calculado a partir do termo 5 na Equação 2.30 do balanço de EPT.

Os fluxos de calor, representados pelo termo  $TEPM\_ET$ , agem como fonte de EPM, retirando essa energia do campo turbulento do escoamento para fornecer ao estoque de EPM. Já o termo  $AEPT\_EM$  apresentou valores negativos, indicando que o campo médio de escoamento está retirando EPT do estoque.

Cabe ainda destacar que os termos de trabalho vertical e horizontal da pressão não foram calculados, tendo em vista que não consideramos as componentes ageostróficas do escoamento.



**Figura 51** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CF I. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $cm^2/s^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $cm^2/s^3$ . As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB.

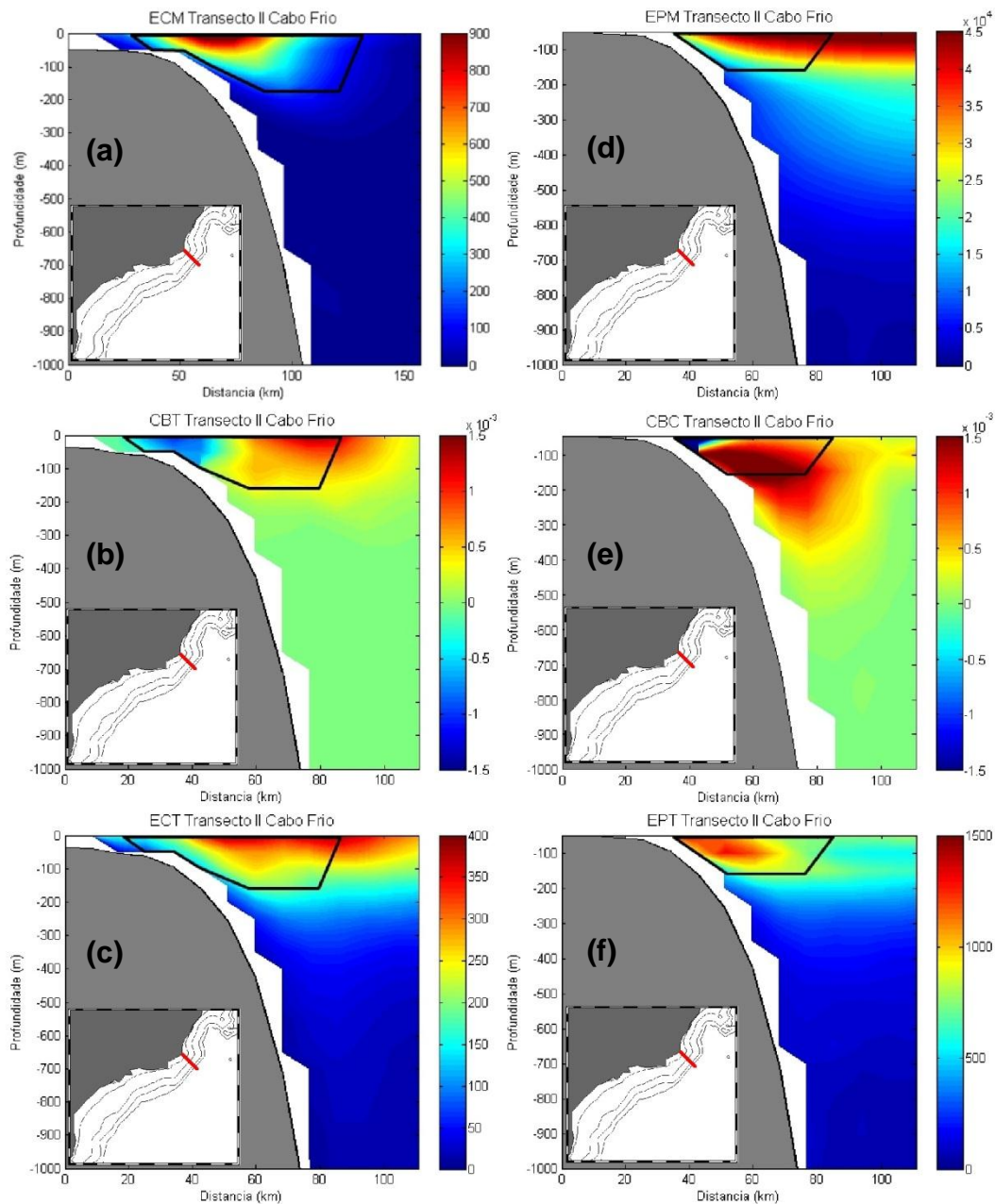


**Figura 52** - Diagrama de Lorenz para o transecto CF I. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados. Cada termo possui um valor, correspondente à profundidade de 50 metros.

A relação entre os estoques de EC e EP, neste transecto, corrobora com o trabalho de [Peixoto & Oort \(1992\)](#), que encontrou valores para a razão entre EC e EP de 0,013 para o oceano, e na saída do ROMS deste trabalho encontramos 0,012.

O próximo transecto analisado na região de Cabo Frio é o CF II. Podemos visualizar novamente que nesta região o jato da CB flui em superfície, ainda não atingindo maiores profundidades. Analisando a Figura 53, percebemos que os maiores valores dos termos ECM e EPT estão localizados na área interna do jato da CB, enquanto que os termos ECT e EPM possuem seus maiores valores na região mais *offshore* do transecto. Considerando que a corrente flui de norte para sul, significa que estes termos possuem seus valores máximos à esquerda do jato da CB.

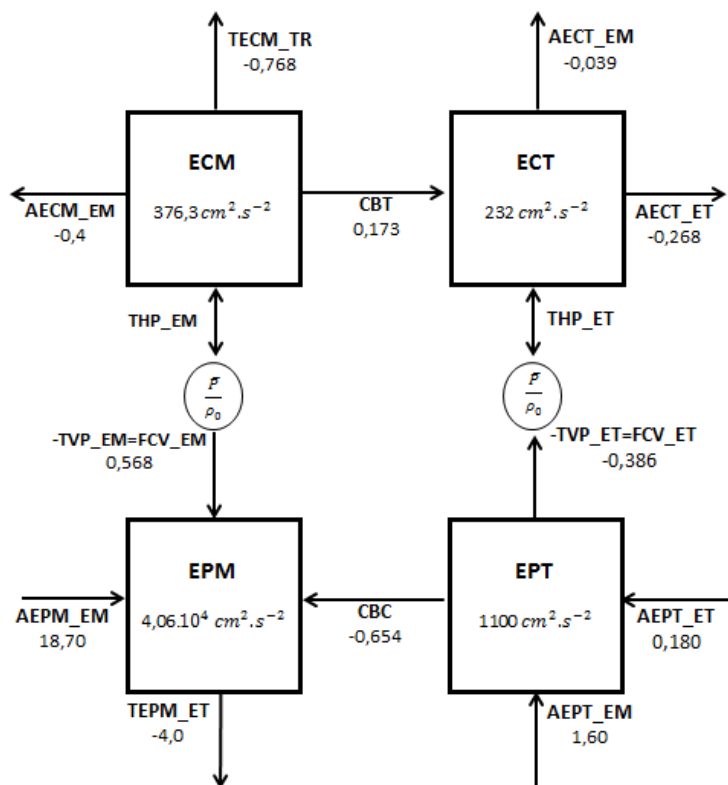
O termo CBT apresenta um padrão bem interessante neste transecto, com um máximo positivo na área mais rasa, e um máximo negativo na área mais *offshore*, ambos máximos localizados dentro da área do jato da CB. O termo CBC também apresenta padrão semelhante, porém o máximo negativo esta em uma área mais restrita que o máximo positivo.



**Figura 53** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CF II. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB.



Uma vez visualizados os perfis para alguns termos do DL no transecto CF II, iremos agora apresentar o Diagrama de Lorenz completo para este transecto, o que é mostrado na Figura 54. A figura ainda apresenta o DL apenas para 50 metros, tendo em vista que o jato da CB ainda não é bem definido em 200 metros nesse transecto.



**Figura 54** - Diagrama de Lorenz para o transecto CF II. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui um valor, correspondente à profundidade de 50 metros.

Analisando o diagrama, visualizamos os estoques de energia neste transecto, com destaque para o estoque de EPM.

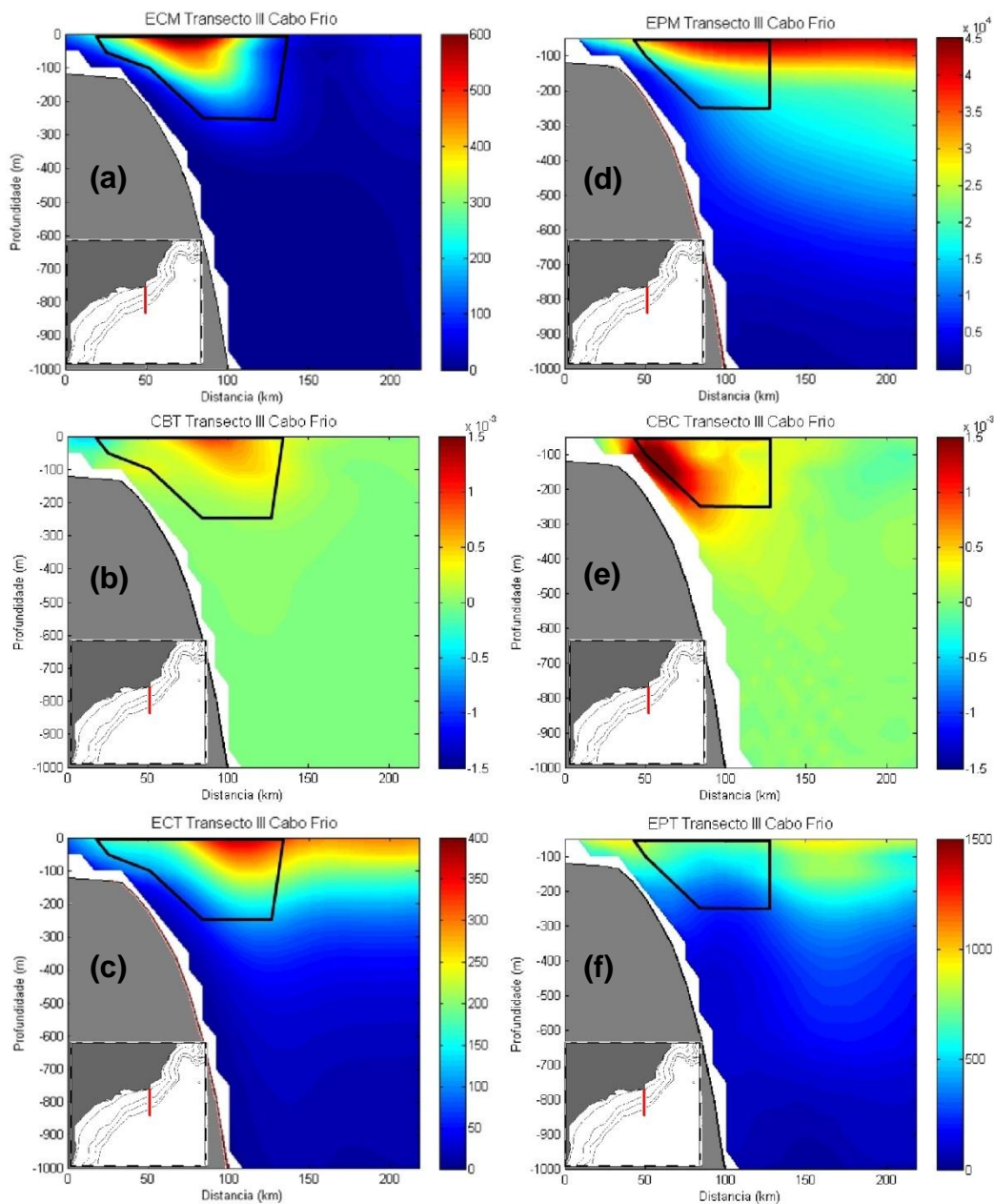
Podemos visualizar que a ECM está sendo convertida em ECT neste transecto, já o termo CBC está convertendo energia do campo turbulento para o campo médio.

Os termos AECT\_ET e AECT\_EM apresentam sinal negativo, indicando que o campo turbulento e o campo médio estão perdendo ECT para a vizinhança, que

está sendo carregada de forma advectiva. Assim como também ocorre um consumo de ECM pelo campo médio de escoamento e um transporte de ECM pelas tensões de Reynolds, conforme demonstram os termos  $AECM_{EM}$  e  $TECM_{TR}$ , respectivamente. Porém, o estoque de EPT apresenta duas fontes de energia: os termos  $AEPT_{ET}$  e  $AEPT_{EM}$ , que advectam uma quantidade de energia uma pelo campo turbulento outra pelo campo médio, neste transecto. O mesmo também acontece com o estoque de EPM, que recebe EPM advectada pelo campo médio do escoamento. Já os fluxos turbulentos de calor, representados pelo termo  $TEPM_{ET}$ , neste transecto, agem como sumidouro de EPM, redistribuindo essa energia para o campo turbulento do escoamento. Percebe-se ainda que o campo médio de velocidade está perdendo energia para o campo médio de massa (ver caixas ECM e EPM), ou seja, as isopicnais estão tendendo a se inclinar mais neste transecto, aumentando a EPM e diminuindo a ECM.

Comparando este transecto com o transecto IV de [Oliveira \(2008\)](#), calculado a partir de dados de boias de deriva em uma radial próxima ao transecto CF II deste trabalho, notamos que ambos apresentam a energia do campo médio sendo convertida para o campo turbulento (inclusive com a mesma ordem de grandeza).

O próximo transecto analisado na região de Cabo Frio é o CF III, localizado mais ao sul, em uma área onde o jato da CB muda abruptamente de direção. Analisando os perfis verticais dos termos da Figura 55, novamente notamos que os estoques de ECT e EPM possuem seus maiores valores à esquerda (*offshore*) do sentido do fluxo da CB, enquanto o estoque de ECM, conforme esperado, possui seus maiores valores dentro da área do jato da CB. O estoque de EPT não apresenta a mesma estrutura analisada na Figura 53, onde possuía seus máximos dentro da área do jato da CB. Aqui neste transecto, os valores máximos de EPT encontram-se nas duas bordas do jato da CB, assim como os valores máximos de CBT. Já o termo CBC apresenta, dentro do jato da CB apenas valores positivos, com um máximo entre a profundidade de 100 e 200 metros, indicando uma alta taxa de conversão de energia potencial média para turbulenta neste transecto.



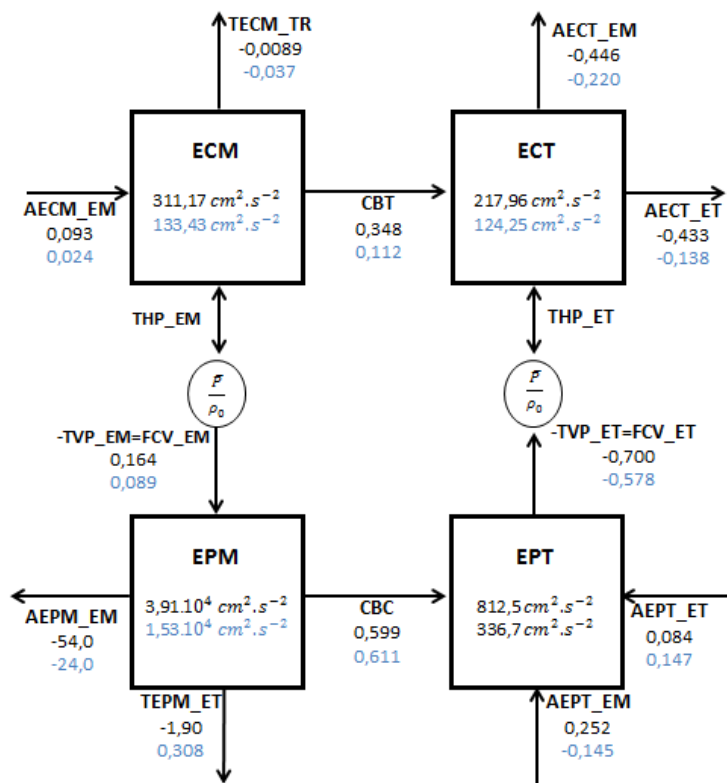
**Figura 55** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CF III. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB.

O Diagrama de Lorenz para este transecto (Figura 56) apresenta valores para as profundidades de 50 e 200 metros, indicando que neste transecto o jato da CB já se encontra mais definido. O DL neste transecto demonstra, assim como no transecto anterior, o sentido de conversão CBT e CBC do campo médio para o turbulento, em ambas as profundidades (50 e 200 metros). O termo FCV\_ET

novamente negativo indica a possível formação da instabilidade baroclínica, dando sequência ao termo CBC que sinaliza a conversão de EPM em EPT neste transecto. O maior estoque de energia neste transecto novamente é o de EPM, e o menor o de ECT. Todas as energias diminuem de magnitude com o aumento da profundidade.

Os termos advectivos sinalizados aqui como fontes ou sumidouros dos estoques de energia seguem o mesmo padrão do transecto anterior. Apenas o termo AEPM\_EM que não mais serve como fonte de EPM, mas agora retira EPM do estoque e redistribui para o campo médio do escoamento.

O termo FCV\_ET novamente negativo indica que neste transecto a CB ainda é baroclinicamente instável, podendo converter EPT em ECT.

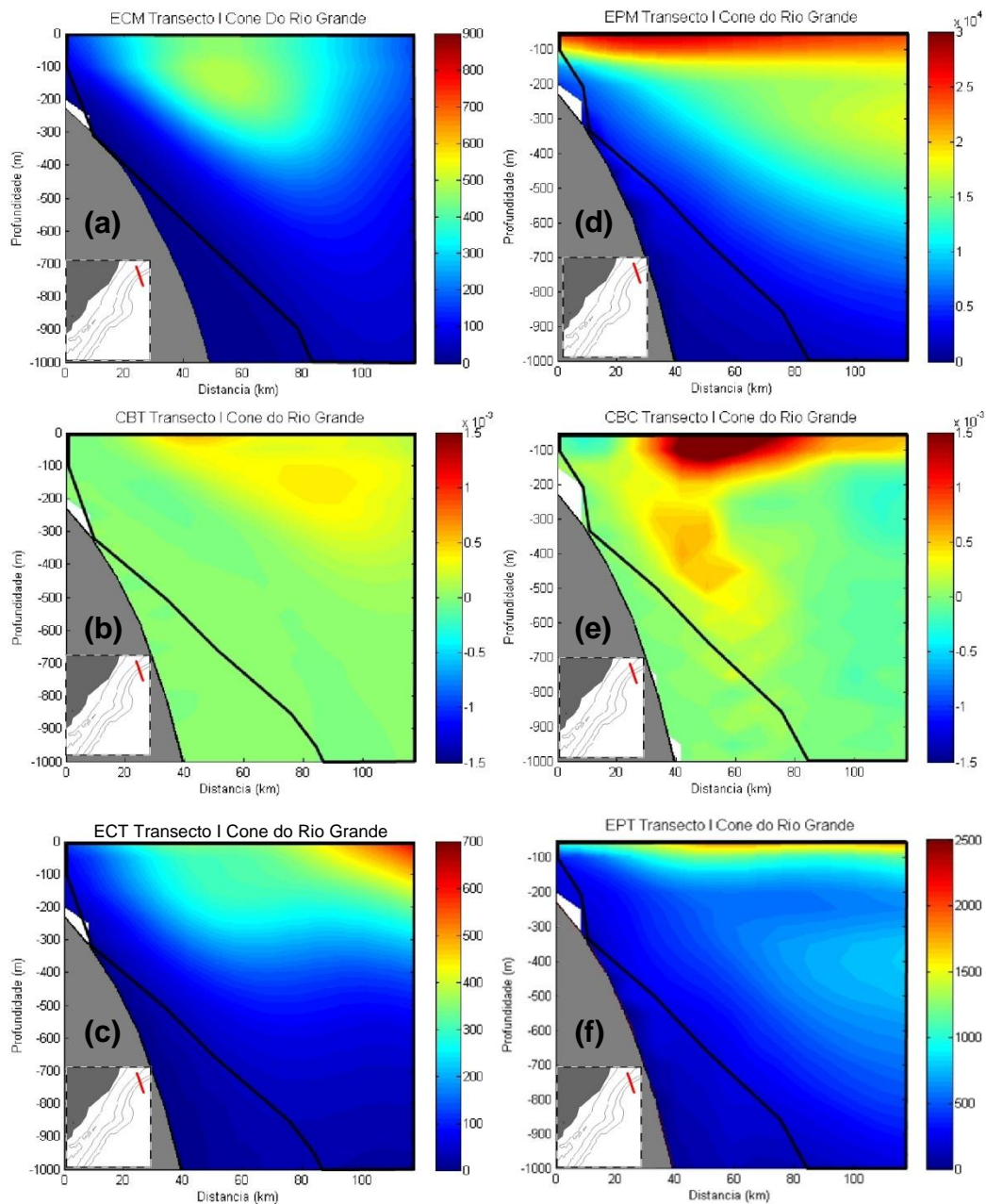


**Figura 56** - Diagrama de Lorenz para o transecto CF III. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui dois valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto) e 200 (azul) metros.

Após a análise dos transectos na região de Cabo Frio, iremos analisar os três transectos na região do Cone do Rio Grande. Nesta região, são apresentados

diagramas nas três profundidades de referência, já que o jato da CB possui profundidade máxima de aproximadamente 1000 metros.

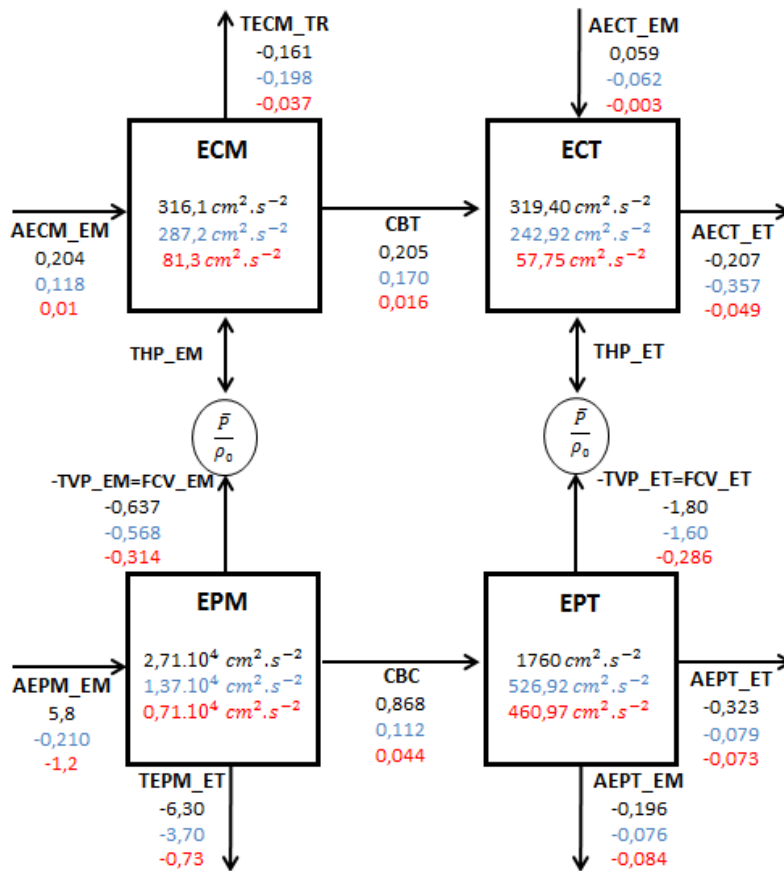
O primeiro transecto analisado, chamado de CONE I, se localiza mais ao norte, ainda antes do jato da CB ser influenciado pela topografia do Cone do Rio Grande. Podemos observar através dos perfis verticais da Figura 57 que o jato da CB está presente em quase toda a área do transecto.



**Figura 57** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CONE I. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB.

Os valores dos estoques de energia se concentram nas primeiras camadas da coluna d'água, diminuindo com o aumento da profundidade. Apenas o estoque de EPT apresenta um novo aumento na sua magnitude próximo à profundidade de 500 metros. Os termos de conversão de energia (CBT e CBC) são, na maior parte da coluna d'água, positivos; com destaque para o termo CBC com um alto valor em superfície.

O cálculo dos termos do Diagrama de Lorenz para as profundidades de referência neste transecto é apresentado na Figura 58.



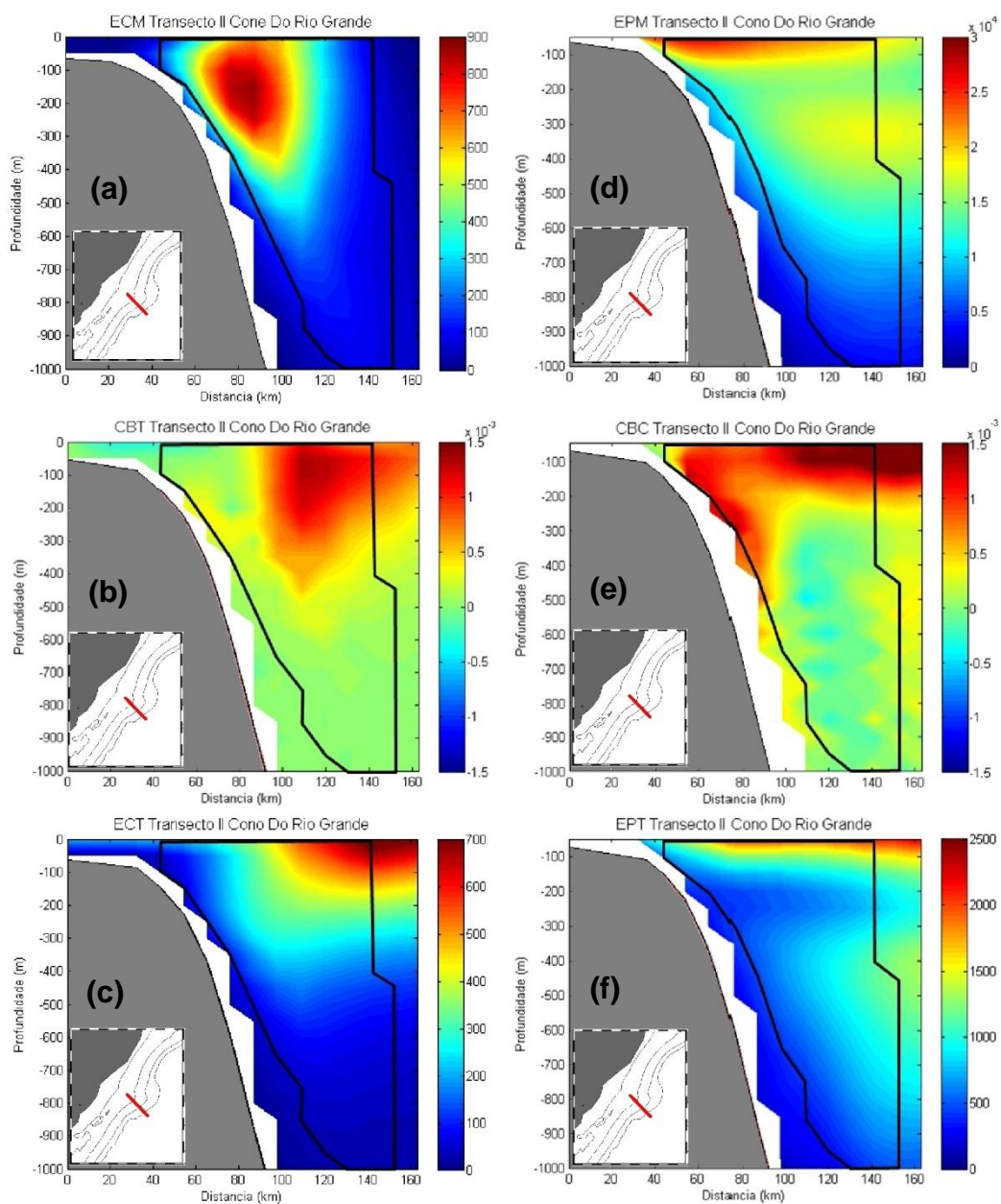
**Figura 58** - Diagrama de Lorenz para o transecto CONE I. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros.

Observamos novamente que o menor estoque é o de ECT, assim como nos transectos de Cabo Frio. Os termos de conversão demonstram o sentido principal

das conversões energéticas neste transecto: do campo médio para o turbulento. O termo CBC converte EPM para EPT via um fluxo de calor turbulento horizontal, seguido por um fluxo de calor turbulento vertical, como demonstra o termo FCV\_ET negativo, indicando o possível crescimento de uma IBC neste transecto. Essa sequência, que indica uma condição baroclinicamente instável, significa que provavelmente o centro de massa do fluido nesse transecto tende a baixar, tentando levar o sistema para uma condição de maior equilíbrio dinâmico. A conversão baroclínica é maior do que a barotrópica, e nenhuma sobre-estabilidade é indicada no diagrama. Podemos notar ainda um menor estoque de EPM, se compararmos com os transectos de CF.

Podemos destacar também que os termos de advecção das energias potencial turbulenta e cinética turbulenta para os campos médio e turbulento são negativos, indicando que neste transecto, ocorre uma redistribuição dessas energias para o campo de escoamento, funcionando assim, como sumidouros de energia neste transecto. Assim como os termos TECM\_TR e TEPM\_ET. Já os termos AECM\_EM e AEPM\_EM indicam que, na maioria da coluna d'água, o escoamento médio funciona como fonte de ECM e EPM, respectivamente, fornecendo energia para os estoques.

O segundo transecto analisado na região do Cone do Rio Grande, chamado de CONE II, localiza-se mais ao sul, quando comparado com o primeiro, e situa-se na área sobre o Cone. Podemos observar através dos perfis verticais da Figura 59, um estreitamento (com conseqüente aprofundamento) do jato da CB nesta área, seguido por um núcleo mais forte de ECM na profundidade de 200 metros. Os demais estoques de energia apresentam estruturas semelhantes ao primeiro transecto desta região, porém, com valores mais elevados. Os termos de conversão possuem maiores magnitudes, e o termo CBC apresenta valores negativos em maiores profundidades, indicando um possível processo de sobre-estabilidade. Ambos os termos de conversão apresentam estrutura semelhante, com valores positivos altos à esquerda do jato (que flui para sul), e negativos (no caso do termo CBT) à direita do jato. Este padrão dos termos de conversão de energia corrobora com as imagens dos estoques de energia, indicando que esta conversão está sendo importante para o padrão das estruturas dos estoques de energia.

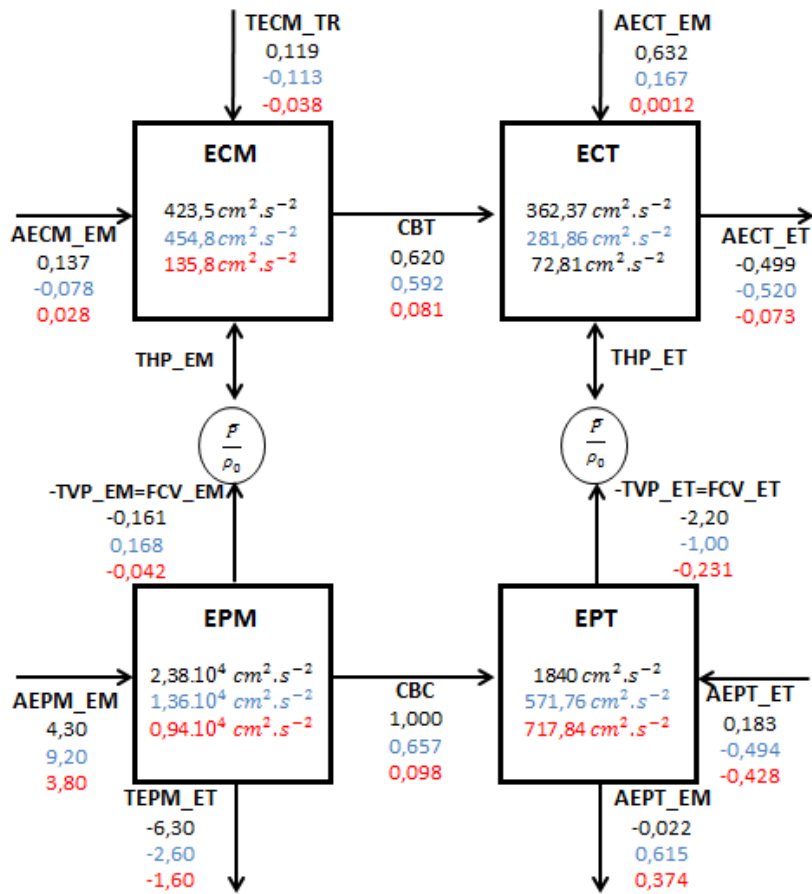


**Figura 59** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CONE II. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB.

Analisando o Diagrama de Lorenz para este transecto (Figura 60) podemos visualizar estes aspectos novamente. Os termos de conversão indicam a transferência de energia do campo médio para o turbulento com maior intensidade, seguido de uma maior intensidade também nos estoques das energias turbulentas, se comparados com o transecto anterior. Podemos perceber pelo sentido das setas



dos termos CBC e FCV\_ET que neste transecto também pode estar ocorrendo a evolução de uma instabilidade baroclínica. Novamente todos os estoques de energia possuem seus maiores valores na primeira profundidade.



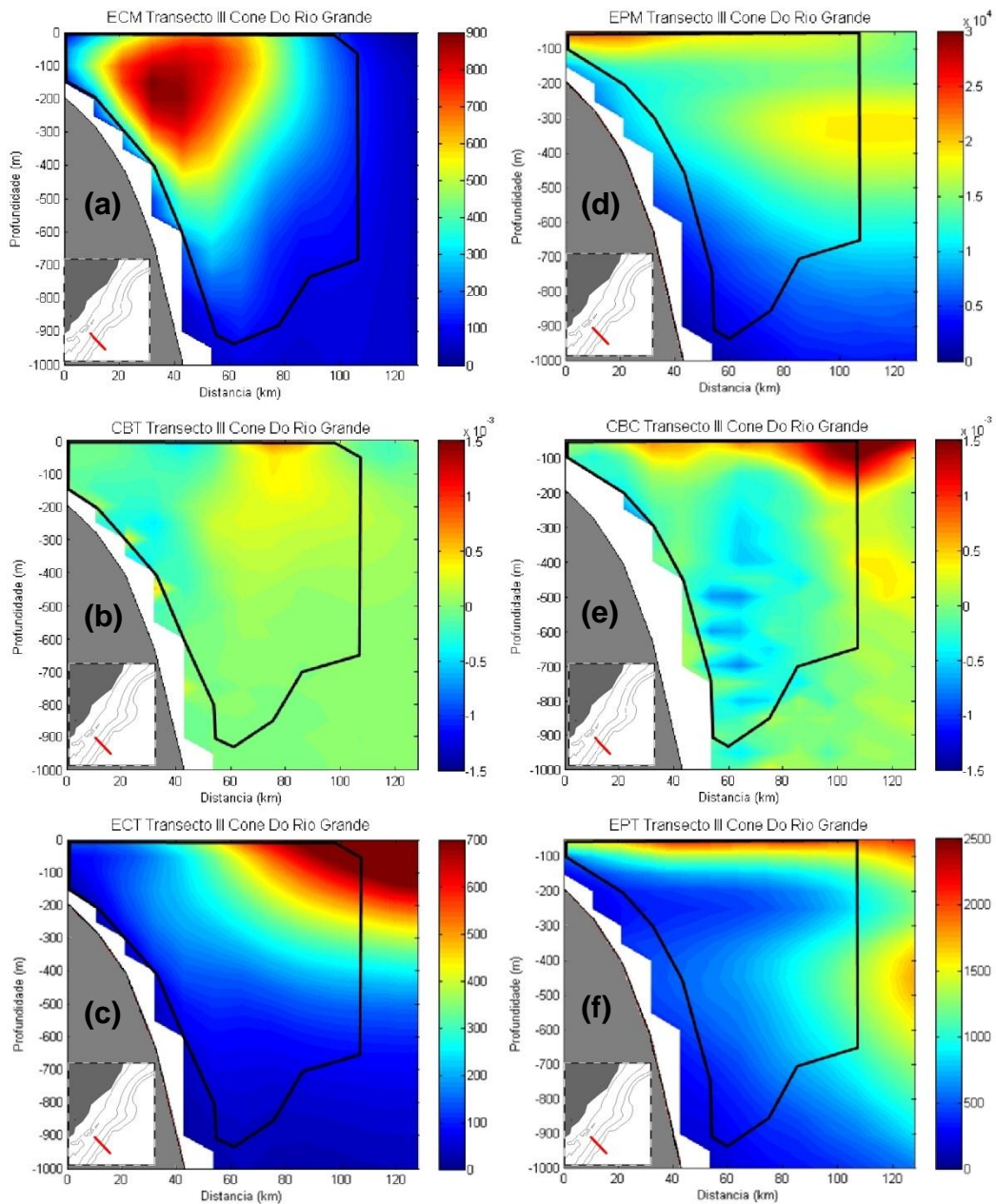
**Figura 60** - Diagrama de Lorenz para o transecto CONE II. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros.

Comparando com o transecto CONE I, percebemos uma mudança no sentido dos termos AECT\_EM e AEPT\_EM. Agora no transecto CONE II, diferentemente do transecto CONE I, o campo médio de escoamento fornece EPT e ECT para os seus respectivos estoques, e não mais retira essa energia, como acontecia no transecto CONE I. Esta diferença no sentido pode ser mais uma explicação para o aumento nos estoques de ECT e EPT em relação ao transecto CONE I.

Podemos comparar ainda este transecto com o transecto VIII realizado por [Oliveira \(2008\)](#) aproximadamente na mesma radial. Destacamos que tanto o sentido quanto a ordem de grandeza encontrado neste trabalho para o termo CBT corrobora com os encontrados por [Oliveira \(2008\)](#). Além disso, em ambos os trabalhos o termo FCV\_ET (inclusive apresentando mesma ordem de grandeza) indica uma condição baroclinicamente instável da CB neste transecto, com transferência de EPT para ECT.

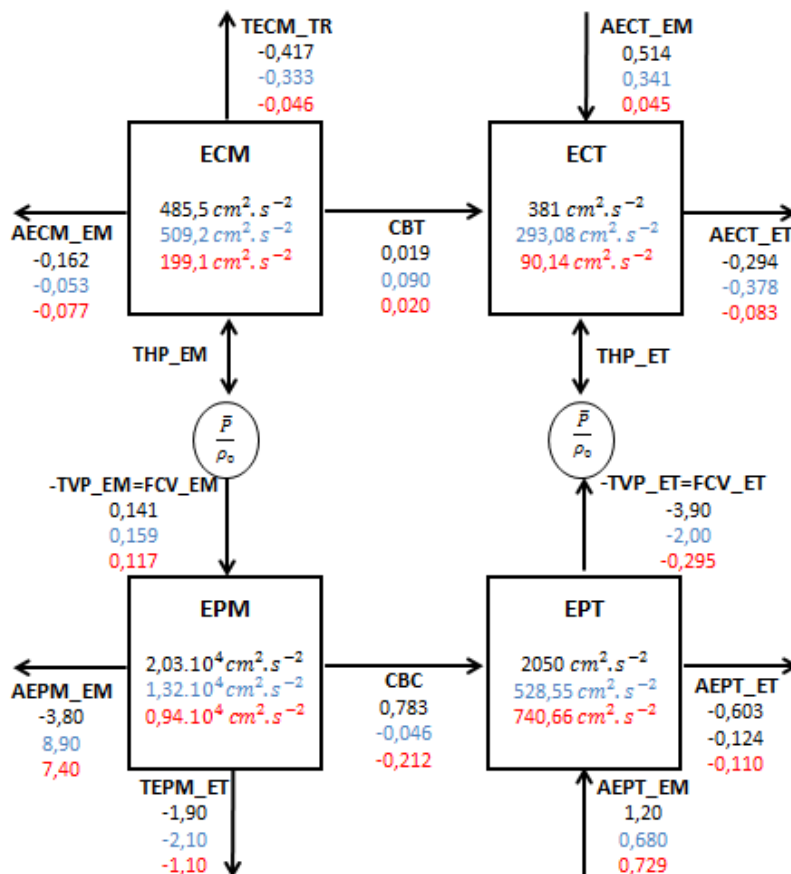
O ultimo transecto analisado neste trabalho está localizado ao sul do CRG, e serve para analisarmos como se comportará o jato da CB após a sua passagem pela topografia do Cone. Podemos perceber uma maior espessura horizontal do termo ECM, assim como uma intensificação negativa dos termos de conversão CBT e CBC (Figura 61).

Outra característica que se destaca é o aumento das energias potenciais nas profundidades médias, principalmente na borda oeste do jato da CB. O estoque de ECT continua apresentando sua estrutura característica, com seus maiores valores localizados à esquerda do jato da CB.



**Figura 61** - Perfil vertical dos estoques de energia e dos termos de conversão para o transecto CONE III. O transecto em questão é indicado no pequeno mapa em cada figura. As unidades nas imagens (a), (c), (d) e (f) estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$ , e nas imagens (b) e (e) em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$ . As profundidades nas figuras (d), (e) e (f) começam em 50 metros. As linhas pretas delimitam a área interna onde flui o jato da CB.

A Figura 62 apresenta o Diagrama de Lorenz para o ultimo transecto apresentado neste trabalho, chamado de CONE III.



**Figura 62** - Diagrama de Lorenz para o transecto CONE III. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros.

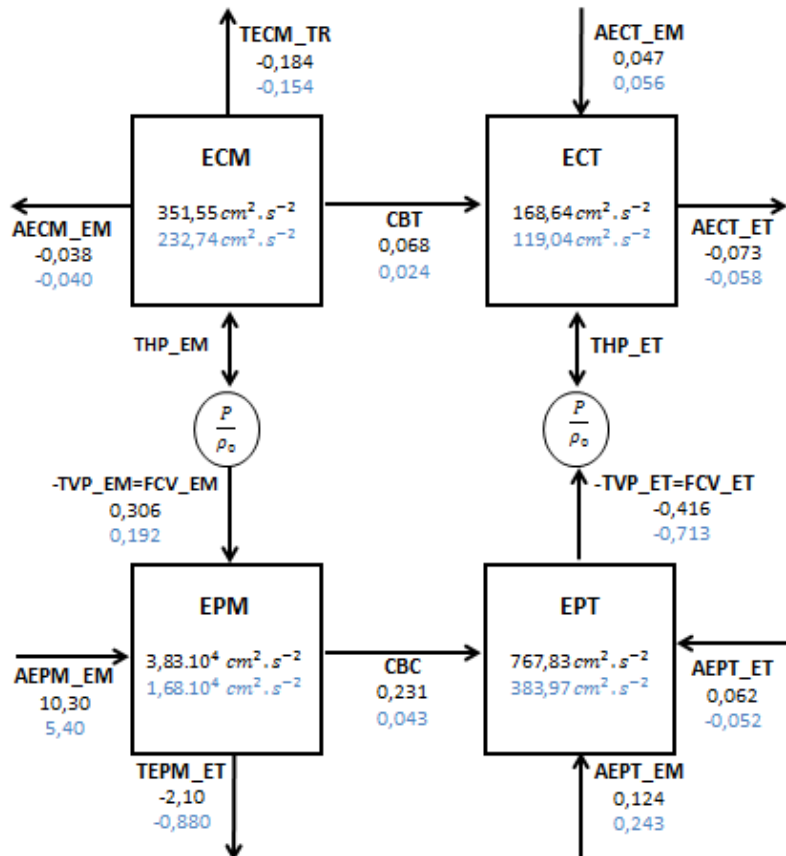
Comparando com os dois transectos anteriores da região do Cone, podemos perceber o aumento no estoque de ECM, ECT e EPT conforme a CB se desloca para sul, e uma diminuição no estoque de EPM. O termo de conversão baroclínica apresenta valores negativos nas maiores profundidades, diferentemente do termo CBT, que se apresentou positivo em todos os transectos nesta região. Assim como se pôde observar nos perfis verticais dos transectos CONE II e CONE III, o Diagrama evidencia um aumento no estoque de EPT na maior profundidade de referência (600 metros), sendo este o único estoque que voltou a aumentar com a profundidade.

Podemos destacar ainda que todos os demais termos mantiveram o mesmo sentido de transferência de energia do transecto anterior, CONE II, exceto pelo termo FCV\_EM, que desta vez funciona como fonte de energia potencial através de

fluxos de calor médios que são advectados pelo campo médio para o campo de EPM.

Após apresentados os perfis verticais e os DLs para os seis transectos analisados neste trabalho, iremos apresentar o Diagrama de Lorenz calculado para toda a área do jato da CB para cada uma das duas regiões de ênfase deste trabalho.

A Figura 63 apresenta o diagrama calculado para todo o jato da CB na região de Cabo Frio. Devemos destacar que o Diagrama, calculado para o jato da CB, não apresenta a profundidade de referência de 600 metros, pois nesta região o jato da CB quase não atinge esta profundidade, apenas numa pequena faixa mais ao sul. Outra característica a se destacar é a predominância de valores positivos nos termos de conversão, seguido por um sinal negativo no termo FCV\_ET, o que pode indicar a evolução de uma instabilidade baroclínica nesta região.



**Figura 63** - Diagrama de Lorenz do jato da CB para toda a região de Cabo Frio. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui dois valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto) e 200 (azul) metros.

Comparando os estoques de energias e os termos de conversão do Diagrama de Lorenz na Figura 63, que representa apenas valores do jato da CB, obtivemos em 50 metros de profundidade um estoque de ECM duas vezes maior do que o estoque de ECT, já o estoque de EPM foi cerca de 50 vezes maior do que o estoque de EPT. Calculando ainda a razão entre as conversões baroclínica e barotrópica, percebemos que a CBC é cerca de 4 vezes maior do que a CBT na região de Cabo Frio, ainda na profundidade de 50 metros.

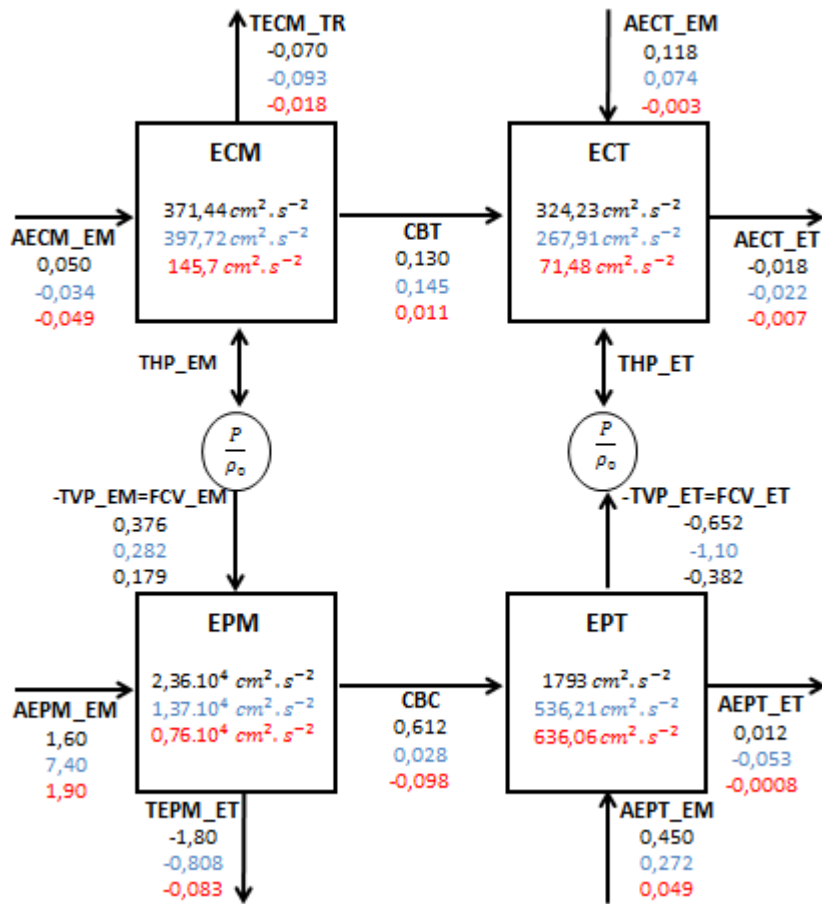
Calculando essas mesmas razões para a profundidade de 200 metros, observamos que a ECM mantém sua proporção para cerca de 2 vezes maior do que a ECT, seguida por uma diminuição na razão entre EPM e EPT, para aproximadamente 44. Assim como a proporção de EPM e EPT diminuiu, o termo de conversão baroclínica caiu de 4 para 2 vezes maior, na profundidade de 200 metros. Estes valores indicam que na profundidade de 200 metros as conversões de EP são mais fracas do que em superfície, e que as conversões de EC não perdem tanta magnitude até essa profundidade.

A Figura 64 apresenta o último diagrama calculado neste trabalho, representando o jato da CB na região do CRG. A partir do cálculo do Diagrama de Lorenz para a região do Cone, iremos novamente calcular as proporções entre os estoques de energia na região do jato da CB, e também entre os termos de conversão. Na profundidade de 50 metros, o estoque de ECM apresentou-se 1,2 vezes maior do que o estoque de ECT, e o estoque de EPM foi mais de 13 vezes maior do que o estoque de EPT. Já o termo CBC foi quase 5 vezes maior do que o termo CBT.

Já na profundidade de 200 metros, o estoque de ECM teve sua relação aumentada para cerca de 1,5 vezes maior do que o estoque de ECT, e a razão EPM/EPT também aumentou para cerca 25. Já o termo CBC teve sua razão com o termo CBT diminuída para pouco menos de 0,2. Notamos então que nesta profundidade, a conversão barotrópica é mais importante do que a conversão baroclínica.

Por ultimo calculamos essas razões para a profundidade de 600 metros, onde encontramos entre os estoques de ECM e ECT a razão de 2,0 e entre os estoques de EPM e EPT a razão de 12. E a razão entre o termo CBC e o termo CBT

aumentou novamente para quase 9, porém, apresentando sentido de conversão do campo médio para o turbulento invertidos.



**Figura 64** - Diagrama de Lorenz do jato da CB para toda a região do Cone do Rio Grande. As unidades dos termos que não estão apresentadas estão em  $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}^3$ . As setas indicam a direção principal de transferência de energia com base nos valores indicados apenas aos processos que estão ocorrendo na primeira profundidade (50 m). Cada termo possui três valores, correspondentes às profundidades de 50 (preto), 200 (azul) e 600 (vermelho) metros.

# CAPÍTULO 5

## DISCUSSÃO

Após apresentados os resultados, iremos agora discuti-los, a fim de analisar o potencial de utilização do Diagrama de Lorenz para a análise energética de determinada região. Para isso iremos analisar os resultados dos termos, e comparar com a energética conhecida das duas regiões de ênfase deste estudo, a região de Cabo Frio e a região do Cone do Rio Grande.

### 5.1.A Região de Cabo Frio

A região de Cabo Frio é conhecida por apresentar grande atividade de mesoescala, apresentando inclusive intensa liberação de vórtices oceânicos. Vórtices são feições oceânicas de mesoescala (para este trabalho) que são geradas, em geral<sup>1</sup>, pelo aumento da energia turbulenta de determinado escoamento, portanto, espera-se que esta região de Cabo Frio possua características turbulentas altas, principalmente nas principais regiões de formação de vórtices oceânicos.

A Figura 8 (página 54) apresentou, conforme estudado na literatura, as principais regiões de formação de vórtices oceânicos na região de Cabo Frio, e com base nela iremos discutir os resultados dos termos relacionados no Diagrama de Lorenz. O crescimento destas feições se dá mediante transferência de energia do campo médio para o campo turbulento, por isso espera-se que estes estoques apresentem alterações nessas regiões.

Podemos visualizar através das Figuras 19 e 22 (páginas 72 e 77, respectivamente), que as regiões marcadas na Figura 8 (página 54) como de maior incidência de liberação de vórtices são regiões onde o termo CBT possui picos positivos, indicando exatamente esta conversão do campo médio para o turbulento, e ainda podemos relacionar com uma diminuição no estoque de ECM em cima

---

<sup>1</sup> Outros mecanismos de geração de vórtices podem ocorrer sem estarem associados com aumentos de ECT, tais como a geração de vórtices para que haja conservação de momentum linear (e.g. [Pichevin & Nof, 1996](#)) e outros.

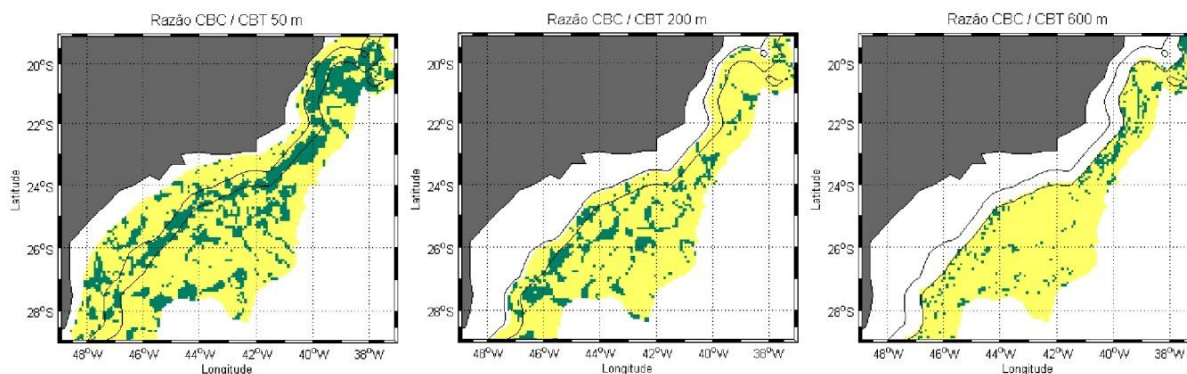


destes picos. A região dos bancos de Vitória, onde se forma o Vórtice de Vitória pode ser destacada como a região onde esta relação é mais evidente, apresentando altos valores de ECT, inclusive em uma estrutura circular parecida com a de um vórtice, e diminuição do estoque de ECM.

Além dos maiores valores da ECM entre as isóbatas de 200 e 1000 metros, podemos visualizar uma segunda região em que a ECM acentua-se, neste caso mais em direção *offshore*. Este segundo feixe de ECM está ligado ao maior feixe de ECT, em uma região onde os vórtices gerados mais ao norte (Figura 8, página 54) são comumente liberados (Campos et al., 1995), já que esta é uma região onde o jato da CB está liberando energia para o campo turbulento para tentar reestabelecer seu *path* próximo às isóbatas de 200 e 1000 metros.

As Figuras 25 e 29 (Páginas 80 e 85) mostram que o sentido das conversões se dá com alguns padrões estruturais. O termo CBT positivo, indicando uma conversão de ECM em ECT, é mais forte no lado *offshore* da corrente (com exceção de um pico próximo à costa na latitude de 22° S), enquanto que o termo negativo, indicando uma condição de sobre-estabilidade, ocorre principalmente entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. Já o termo CBC apresenta seus maiores picos positivos em regiões de bancos e de alta liberação de vórtices oceânicos, e possui sinal negativo, indicando uma condição de sobre-estabilidade, novamente entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros.

A Figura 65 apresenta a razão entre os termos CBC e CBT na região de CF para as três profundidades de referência (valores onde a profundidade do oceano excede 3000 metros foram excluídos, para destacar a região do jato da CB e áreas adjacentes, que ainda sofrem influência deste jato). Podemos observar que o termo CBC domina amplamente (representado nas figuras pela cor amarela) a região estudada na figura principalmente nas profundidades de 200 e 600 metros. Na profundidade de 50 metros podemos notar ainda o domínio do termo CBC na maioria da região, porém constatamos um padrão de domínio do termo CBT (representado na figura pela cor verde) ao longo do *path* da CB entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros.



**Figura 65** – Distribuição horizontal da razão entre os termos CBC e CBT na região de Cabo Frio. As linhas contínuas em preto representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. Em amarelo o termo CBC é maior, em verde o termo CBT é maior.

Analisando agora os termos relacionados com o estoque de energia potencial (EPM, CBC e EPT) podemos destacar os picos de CBC entre 20 e 23° S. A região do banco de Vitória (20° S) apresenta uma topografia bastante destacada, como pode ser visto pela representação das linhas topográficas na Figura 66. Portanto, espera-se que essa topografia influencie na curvatura das isopicnais, e por consequência, afete o cisalhamento vertical da corrente, que gera gradientes horizontais de temperatura, transferindo EPD para o campo turbulento. Este padrão pode ser claramente visualizado na Figura 66, próximo à latitude de 20° S, onde podemos observar um grande pico positivo no valor do termo CBC, indicando nesta região uma conversão de EPM para EPT, na profundidade de 200m. Esta estrutura é seguida por um aumento na EPT visualizado na imagem de EPT em 200 metros, e uma diminuição da EPM na imagem de EPM em 200 metros.

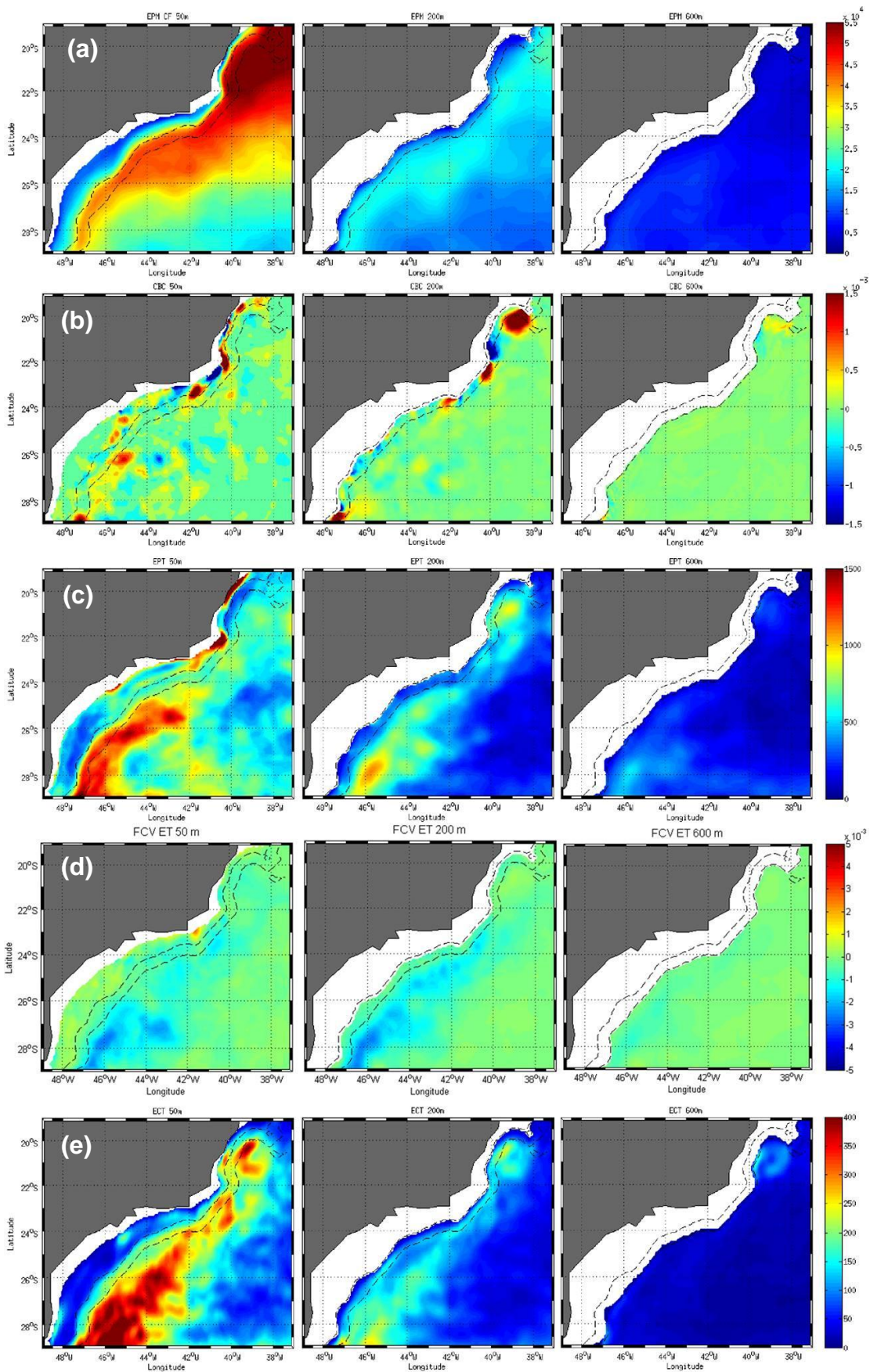
Podemos destacar ainda na latitude de 22° S, uma estrutura muito interessante do termo CBC. Em 50 metros este termo apresenta um pico positivo seguido de um negativo, enquanto que em 200 metros os picos possuem sinais contrários. Isso significa que a coluna d'água possui características diferentes com o aumento da profundidade. É importante levar em conta nessa interpretação a Figura 32 (página 88), que apresenta o *path* que a CB percorre em cada profundidade nesta região.

Portanto, podemos analisar agora que a CB está presente apenas até cerca de 100 metros nesta área, o que significa que o jato da CB é responsável pela

conversão de EPM em EPT em 50 metros até a linha de costa começar a mudar de direção em 22° S, quando a CB passa por um processo de sobre-estabilidade, e passa a converter EPT em EPM. Abaixo do jato da CB, ocorre o processo contrário, primeiro ocorre o processo de sobre-estabilidade, com conversão de EPT em EPM, e após a mudança na direção da linha de costa, ocorre a conversão de EPM em EPT. Esta região pode ser caracterizada então por uma grande atividade turbulenta inclusive no estoque de energia potencial.

Podemos ver ainda na Figura 66 que as imagens do estoque de EPT, principalmente em 50 metros, possuem estruturas diversificadas, com picos localizados em diferentes partes da área. Sabe-se ainda, que esta região é uma região onde ocorre em diversas áreas o fenômeno de ressurgência de águas frias e ricas em nutrientes. Este fenômeno pode estar ligado à alta magnitude do termo CBC na borda da plataforma continental, já que este termo está diretamente ligado à inclinação das isopicnais, que pode ocorrer devido ao afloramento de águas profundas nas camadas superiores.

A Figura 66 apresenta ainda imagens do termo FCV\_ET. Este termo foi calculado nestas imagens a partir da equação do balanço de EPT, portanto, valores negativos indicam transferência de EPT para ECT, o que seria uma condição para a evolução da instabilidade baroclínica. Podemos identificar então algumas áreas principais onde a conversão baroclínica é seguida pelo sinal negativo no termo FCV\_ET. Destacamos nas imagens deste termo em 50 metros: a região pouco abaixo da latitude de 26° S, nas proximidades da linha batimétrica de 1000 metros, e a região dos bancos de Vitória; e nas imagens deste termo em 200 metros, destacamos a região de 24° S e 42° W, como principais regiões onde pode estar evoluindo uma IBC. O padrão de distribuição horizontal apresentado no termo FCV\_ET, com altos valores positivos em direção *offshore* da linha batimétrica de 1000 metros, corroboram com o trabalho de [Kang & Curchitser \(2015\)](#).



**Figura 66** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), CBC (b), EPT (c), FCV\_ET (d) e ECT (e) nas profundidades de referência para a região de Cabo Frio. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$  para (a), (c) e (e), e em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$  para (b) e (d).

Está análise dos termos do Diagrama na região nos permite caracterizar indícios dos processos dinâmicos que ocorrem nesta área. Tendo em vista que o cálculo do Diagrama de Lorenz que produz estes termos, podemos então afirmar que o Diagrama de Lorenz reproduz a dinâmica local. A Figura 53 (página 111), do transecto CF II, nos permite visualizar por que o estoque de ECT é maior em direção *offshore*. Podemos visualizar pelo perfil de CBT, que ocorre uma grande conversão de ECM em ECT à esquerda do jato da CB, caracterizando assim a estrutura do estoque de ECT aumentando sentido *offshore*, como já foi demonstrado por [Kang & Curchitser \(2015\)](#). Essa diferença entre um lado do jato e o outro não pode ser visualizada apenas com o cálculo do diagrama, porém, o cálculo do diagrama irá permitir a visualização da predominância do sentido de conversão da energia, que neste caso é de ECM para ECT, conforme mostra o esquema do Diagrama de Lorenz para este transecto (Figura 54, página 112).

As Figuras 52, 54, 56 e 63 (páginas: 110, 112, 115 e 124, respectivamente) que apresentam quatro diagramas para esta região nos permitem visualizar esta mesma interpretação. Especialmente as figuras dos transectos (52, 54 e 56, páginas 110, 112 e 115, respectivamente), onde os valores dos termos expressam essas estruturas. O Diagrama do transecto CF II (Figura 54, página 112), por exemplo, nos mostra a variação do sinal do termo CBC em relação ao CBT, característica muito singular e destacada nesta região. Os termos de advecção das energias, além dos termos TEPM\_ET e TECM\_TR, demonstram pequenas taxas de transferência de energia para os estoques, funcionando como fontes ou sumidouros de energia para o campo de escoamento. Estes termos necessitam de muito cuidado em seus cálculos e são fortemente influenciados pelo campo de escoamento escolhido.

Entre estes termos, podemos destacar a advecção de EPM pelo campo médio (AEPM\_EM), que possui os maiores valores em todos os Diagramas de Lorenz calculados em CF. Seu sinal positivo nos transectos CF I e CF II indica que a EPM está sendo advectada consideravelmente pelo campo médio do escoamento e, por conseguinte, sendo responsável por uma parcela de aumento no estoque de EPM. No transecto CF III, este termo possui novamente altos valores, porém desta vez negativo, indicando que o estoque de EPM está sendo redistribuído pelo campo médio do escoamento, diminuindo assim, o valor do seu estoque.

O Diagrama de Lorenz calculado no transecto CF III apresenta uma estrutura interessante. Podemos perceber que nas caixas de ECT e EPM, todos os termos de advecção das energias estão servindo como sumidouro dessas energias para o campo de escoamento. Ou seja, os estoques dessas energias estão diminuindo, além dos fatores de conversão, pela advecção dessas energias para o campo de escoamento médio, e também para o campo de escoamento turbulento. Apenas a caixa de EPT está recebendo energia turbulenta por advecção do campo de escoamento.

Essa estrutura relaciona-se com a dinâmica da região, pois neste transecto o jato da CB está tentando se estabilizar com a mudança abrupta na direção da linha de costa, portanto, espera-se uma transferência de energia do campo médio para o turbulento, tanto por meio de conversões barotrópicas e baroclínicas, quanto pela advecção destas energias para o campo de escoamento. E a redistribuição da ECT para o campo de escoamento pode ser explicada devido à liberação de pequenos “eddies” pela corrente, ainda na tentativa de estabilizar o fluxo do jato da CB.

Os termos das caixas de energia cinética dependem não só do campo de escoamento, mas também da escala horizontal do modelo. Este fator pode ser responsável pela diferença nos valores destes termos, que são muito pequenos, portanto uma pequena diferença nestes parâmetros de entrada no cálculo pode gerar diferenças até de sinal (sentido do fluxo de energia) no termo.

Os termos das caixas de energia potencial, além destes fatores citados para a energia cinética, ainda são influenciados pela escolha do campo básico, já que dependem de variáveis relacionadas com o campo de temperatura. Por isso, a comparação entre trabalhos deve ser feita de maneira cuidadosa, respeitando as escalas horizontais e verticais, e a escolha do campo básico. Porém, isso não significa que o Diagrama seja uma ferramenta ruim para a análise da dinâmica, tendo sido demonstrado aqui que ele ajudou a explicar a dinâmica da região de Cabo Frio.

## 5.2. A Região do Cone do Rio Grande

Esta região encontra-se mais ao sul, e está mais próxima do final do *path* percorrido pelo jato da CB. A escolha dos transectos nesta região se deu para termos um cenário antes, um em cima e outro depois do cone. Algumas comparações serão feitas com o trabalho de [Nardi \(2013\)](#), porém alguns fatores devem ser levados em conta para esta comparação. Os termos de energia potencial não podem ser quantitativamente comparados, já que a escolha do campo básico é de suma importância, e este é totalmente diferente nos dois trabalhos. E por consequência isto afeta também os termos advectivos, responsáveis por apresentarem fontes ou sumidouros de energia, assim como o termo de conversão baroclínica.

Por isso, se compararmos este trabalho com o de [Nardi \(2013\)](#), iremos encontrar valores bem diferentes tanto nos estoques de energia potencial (média e turbulenta), quanto nos valores dos demais termos (relacionados com a EP). Entretanto, podemos destacar qualitativamente comparando os dois trabalhos que, em ambos, os estoques de EPT, ECT e ECM aumentaram do transecto mais ao norte para o mais ao sul, enquanto que o estoque de EPM diminui neste mesmo sentido. Esse resultado é interessante, pois comprova que mesmo com a influência da escolha do campo básico, das diferentes épocas do ano em que os modelos foram rodados, e de escalas espaciais diferentes, as características principais da região permaneceram as mesmas, inclusive com a predominância da conversão de energia do campo médio para o turbulento na grande maioria das profundidades de todos transectos. Estes resultados confirmam assim novamente a capacidade do Diagrama de Lorenz em representar a dinâmica local.

Os aumentos nos estoques de ECM, ECT e EPT conforme a corrente avança em seu *path* já foram demonstrados previamente na literatura (e.g. [Von Storch et al., 2012](#); [Kang & Curchitser, 2015](#)) e indicam que mesmo com a presença do Cone nesta região, as características principais do escoamento alteram-se apenas localmente, e depois tendem a voltar ao seu padrão. Já a diminuição do estoque de EPM, também com o avanço da corrente em seu *path*, está diretamente ligada à escolha do campo básico, não sofrendo influência direta do campo de escoamento. O campo de escoamento irá influenciar no estoque de EPM através dos termos advectivos.

As Figuras 20 e 23 (páginas 74 e 78, respectivamente) servem de análise para os estoques de energia cinética média e turbulenta, em comparação aos valores do termo CBT. Podemos então analisar a influência do CRG no termo CBT, que tem sua magnitude ampliada exatamente na região do Cone, com consequente diminuição do estoque de ECM e aumento no estoque de ECT. De acordo com [Kang & Curchitser \(2015\)](#), a turbulência age acelerando o campo médio em cima do banco e mais ao longo do caminho do escoamento, enquanto que logo após o banco a turbulência age liberando energia do campo médio. Essa característica também foi descrita no estudo observacional de [Dewar & Bane \(1985\)](#).

Comparando este estudo realizado na região do Charleston Bump com a região do CRG, podemos perceber pela Figura 26 (página 81), que o campo turbulento acelera o campo médio logo que a corrente encontra o banco (neste caso, o Cone), conforme pode ser visto pelo sinal negativo do termo CBT entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros na latitude de 22° S, seguido de um aumento no estoque de ECM; e uma nova CBT negativa mais ao longo do caminho do escoamento entre as linhas batimétrica de 200 e 1000 metros entre as latitudes de 34 e 35° S, novamente seguido por um aumento na ECM. O termo CBT, na região do CRG, assim como no estudo do Charleston Bump, apresentou-se predominantemente negativo nas menores profundidades e positivo nas maiores. Essa conversão de ECM em ECT pode ser visualizada nos Diagramas de Lorenz apresentados nas Figuras 58, 60 e 62 (páginas 117, 120 e 123, respectivamente), evidenciando ainda o aumento no estoque de ECT para sul, e a diminuição na intensidade do termo CBT no transecto mais ao sul (CONE III).

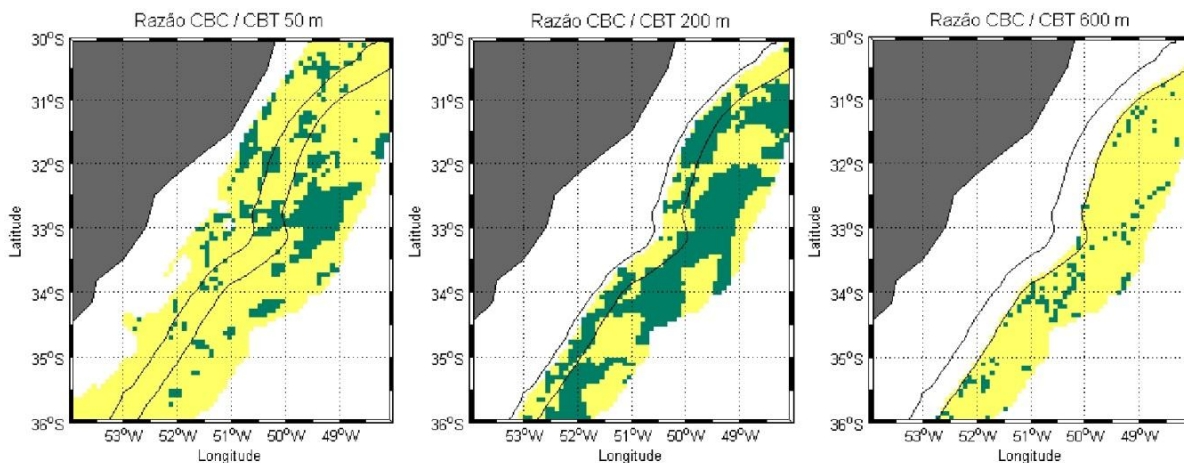
A ECM em superfície apresenta uma estrutura diferente da estrutura na região de CF. No Cone, ela encontra-se mais dispersa em 50 metros, porém, volta a estreitar-se com o aumento da profundidade. Isto pode ser explicado pelo fato do jato da CB, nessa região, ser mais estreito com o aumento da profundidade. E o aumento da profundidade leva a uma posição mais próxima do seu núcleo (150-200 metros).

Já a ECT apresenta um padrão dispersivo nas três profundidades de referência, apenas com a diminuição de sua magnitude com o aumento da profundidade.



A partir das Figuras 26 e 31 (páginas 81 e 87, respectivamente) podemos observar os padrões dos termos de conversão na coluna d'água. O termo CBT apresentou uma distribuição positiva no lado *offshore* da corrente, e negativa (indicando uma condição de sobre-estabilidade) no lado mais raso da corrente, principalmente entre as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. Cabe ressaltar um pico negativo bem no início da anomalia batimétrica do Cone e mais ao longo da corrente, e um pico positivo logo que a corrente ultrapassa a batimetria do Cone. Já o termo CBC possui valores mais altos do que o termo CBT, e do que o próprio termo CBC na região de CF. O padrão positivo em *offshore* e negativo em *inshore* também é encontrado no termo CBC, além de notarmos que este termo aumenta sua intensidade, em média, à medida que avança para oceano aberto (corroborando com [Kang & Curchitser \(2015\)](#)).

A Figura 67 apresenta a razão entre os termos CBC e CBT para a região do CRG para as três profundidades de referência (valores onde a profundidade do oceano excede 3000 metros foram excluídos, para destacar a região do jato da CB e áreas adjacentes, que ainda sofrem influência deste jato). Observamos a partir desta, que o termo CBC domina (representado pela cor amarela nas imagens) a região de estudo amplamente nas profundidades de 50 e 600 metros, enquanto que na profundidade de 200 metros, o termo CBT possui papel dominante nas magnitudes das conversões (representado pela cor verde nas imagens). Destaca-se com isso, que a feição do Cone do Rio Grande possui influência maior nas conversões barotrópicas, que envolvem transferências de energias entre o campo médio e o campo turbulento do balanço de energia cinética, do que no balanço de EP.



**Figura 67** – Distribuição horizontal da razão entre os termos CBC e CBT na região do Cone do Rio Grande. As linhas contínuas em preto representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. Em amarelo o termo CBC é maior, em verde o termo CBT é maior.

Os estoques de energia potencial podem ser analisados na Figura 68. Podemos aqui perceber melhor a relação entre os estoques e o termo CBC. Na profundidade de 50 metros, a maior parte da lâmina d'água apresenta valores positivos no termo CBC, o que representa uma conversão de EPM em EPT, que pode ser visualizada também com a diminuição aparente do estoque de EPM e com a grande área, a partir da isóbata de 200 metros em direção *offshore*, onde o estoque de EPT tem sua magnitude elevada. O maior pico de EPT nesta profundidade, localizado bem ao sul da imagem, está relacionado com o pico de EPT mais ao sul, próximo à região de intensa atividade turbulenta da CBM. Como o estoque de EPT está relacionado com a variância da temperatura, a tese de doutorado de [Oliveira \(2008\)](#) corrobora com esta característica, quando mostra no seu cálculo da variância da temperatura para esta região, os maiores valores deste fator na região da CBM.

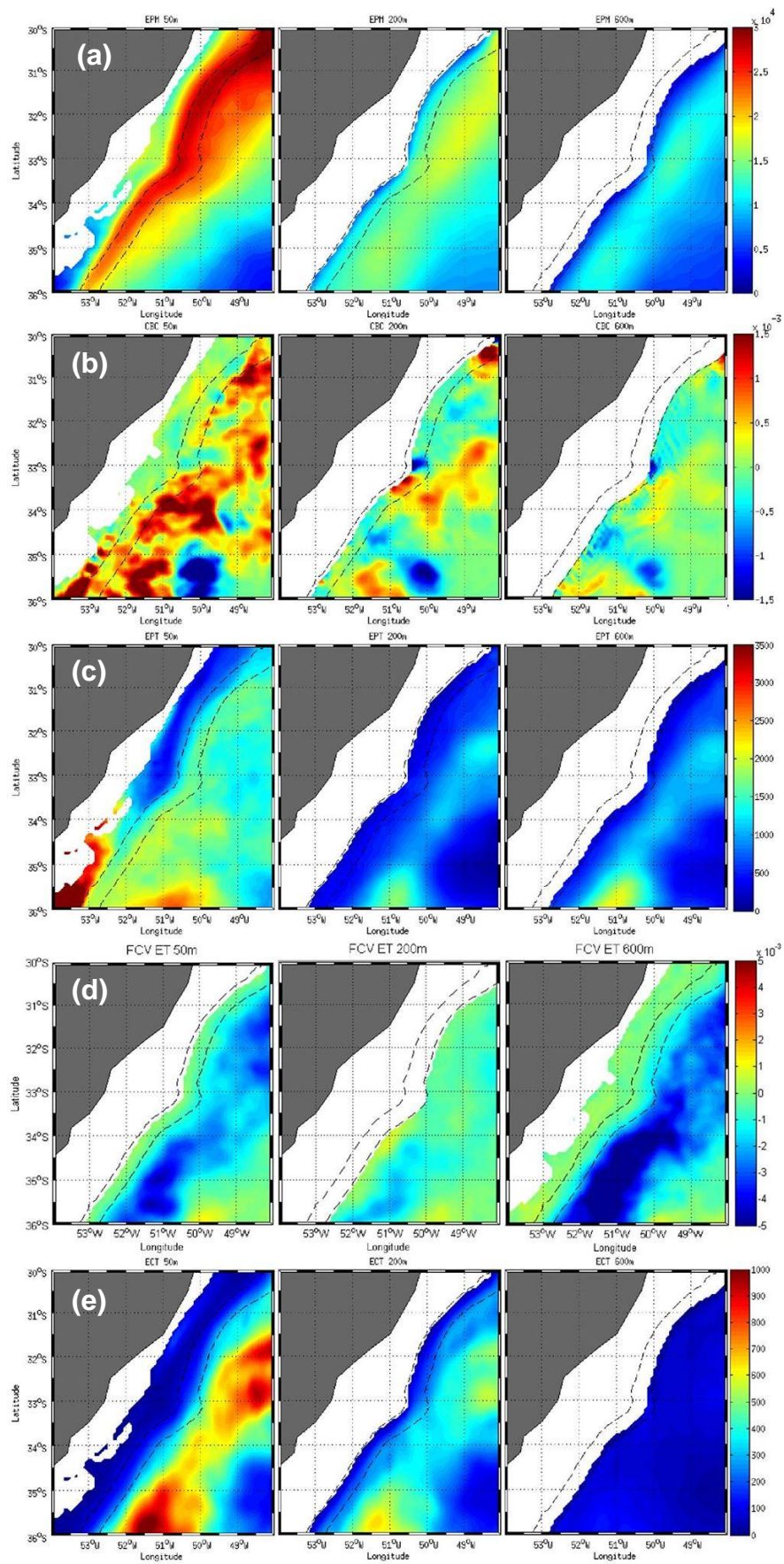
Podemos perceber também a forte influência do Cone não só na conversão de ECM em ECT, devido ao cisalhamento horizontal do campo médio de velocidade, mas também verticalmente no campo de escoamento e no campo de massa, através da CBC seguida da transferência do estoque de EPT para ECT, conforme mostra os valores negativos encontrados nos cálculos do termo FCV\_ET. Essa sequência de fatores pode indicar a evolução de uma instabilidade baroclínica nesta região,

bastante intensificada pela presença do CRG, evidenciada pelos altos valores negativos de FCV\_ET após a passagem da CB pelo Cone.

Novamente percebemos quando analisamos apenas as Figuras dos Diagramas dos transectos para esta região (Figuras 58, 60 e 62, páginas 117, 120 e 123, respectivamente), que estas características podem ser visualizadas e então quantificadas, para um melhor resultado em resposta à dinâmica da região.

As Figuras 48 e 49 (páginas 105 e 106, respectivamente) evidenciam um aumento no estoque de EPT e a mudança no sinal do termo CBC com um aumento da profundidade, e ambas as características também podem ser visualizadas nos Diagramas dos transectos desta região, especialmente no transecto CONE III. A Figura 42 (página 99) mostra o pico de EPT nas profundidades intermediárias a partir da área do Cone, e a Figura 44 (página 101) apresenta a evolução do termo CBC na mesma região. Este aumento de EPT em sub-superfície é demonstrado no estudo de [Roullet et al. \(2014\)](#), e é interpretado como a assinatura de fontes intensificadores de atividade de mesoescala nestas profundidades.

Estas figuras explicam o que indica o Diagrama de Lorenz para os transectos CONE II e CONE III. O aumento no estoque de EPT se dá devido ao forte pico de CBC mais ao norte nesta região, este pico é responsável pelo começo da conversão de EPM em EPT. Estes valores de EPT são atenuados com a evolução do jato da CB para o sul, como demonstra os valores negativos de CBC na Figura 44 (página 101), até um pico negativo na região central do perfil, que aumenta o estoque de EPM, mas logo em seguida têm-se outro pico positivo de CBC, novamente aumentando o estoque de EPT. Esta região com dois picos de sinais contrários em sequência é a região influenciada pela topografia do Cone. Após a passagem do Cone o termo CBC volta a ser negativo nas camadas intermediárias do jato da CB, até apresentar outro pico positivo mais ao sul, novamente aumentando o estoque de EPT.



**Figura 68** - Distribuição horizontal dos termos EPM (a), CBC (b), EPT (c), FCV\_ET (d) e ECT (e) nas profundidades de referência para a região do Cone do Rio Grande. As linhas tracejadas representam as linhas batimétricas de 200 e 1000 metros. As unidades de medida estão em  $\text{cm}^2/\text{s}^2$  para (a), (c) e (e), e em  $\text{cm}^2/\text{s}^3$  para (b) e (d).

# CAPÍTULO 6

## CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados para os termos do Diagrama de Lorenz para as regiões de ênfase (Figura 7, página 53). Os dados e diagramas apresentados foram utilizados para a interpretação da dinâmica local e, posteriormente, comparados com a dinâmica já estabelecida na literatura pretérita, quando disponível. Diagramas de Lorenz para cada região, agora separadas em transectos, para uma análise mais minuciosa, também foram apresentados.

### 6.1. Quanto à Aplicabilidade do Diagrama de Lorenz

As principais conclusões que podemos chegar a partir dos resultados obtidos neste trabalho quanto à aplicabilidade do DL são:

- O Diagrama de Lorenz é uma boa ferramenta para o estudo da energética de determinada região.
- A correta escolha da posição dos transectos, a serem analisados pelo DL, é de fundamental importância, já que estes irão permitir a visualização da dinâmica local. Calcular Diagramas de transectos em regiões afastadas de áreas com forte atividade de mesoescala pode subestimar o resultado da energética local. É importante então, a realização de mais de um transecto ao longo da região que se deseja estudar. Torna-se desejável então um conhecimento pretérito da dinâmica da região, a qual será investigada energeticamente pelo DL.
- A escolha do campo básico irá influenciar diretamente no cálculo dos termos relacionados à energia potencial (e.g. [Von Storch et al., 2012](#); [Kang & Curchitser, 2015](#)).

- A criação de perfis verticais e horizontais dos termos do Diagrama permite uma maior visualização e, por conseguinte, uma maior caracterização da estrutura energética local.

## 6.2. Quanto aos Aspectos Energéticos

As principais conclusões obtidas a partir deste trabalho, quanto aos aspectos energéticos da Corrente do Brasil, são:

- Todos os estoques de energia possuem seus maiores valores em superfície, e perdem magnitude com o aumento da profundidade; e também aumentam de magnitude à medida que a corrente flui para sul (com exceção do estoque de EPM).
- O termo ECT apresenta maiores valores em direção *offshore*.
- O estoque de ECM no jato da CB é maior do que o estoque de ECT.
- O termo CBC possui maior magnitude do que o termo CBT; é negativo antes do CRG e positivo após a passagem pelo CRG; e mais intenso em oceano aberto (corroborando com [Kang & Curchitser, 2015](#)).
- O termo CBT é, em média, negativo entre as isóbatas de 200 e 1000 metros, e positivo em direção *offshore*. Indicando que processos de instabilidade tendem a ocorrer em direção *offshore*, e processos de sobre-estabilidade tendem a ocorrer no lado mais raso da corrente.
- Os maiores picos de CBC e CBT estão relacionados a alterações na batimetria ou na direção da linha de costa, e com regiões de alta incidência de liberação de vórtices oceânicos.
- A razão EC e EP apresentou um valor de 0,015 no transecto CF II (corroborando com [Peixoto & Oort \(1992\)](#) que encontraram um valor de 0,013).
- O termo FCV\_ET aumenta após a linha batimétrica de 1000 metros (corroborando com [Kang & Curchitser, 2015](#)), e apresentou-se negativo

em todos os transectos realizados, indicando locais onde podem estar ocorrendo processos de instabilidade baroclínica.

- O estoque de EPT apresenta distribuição horizontal semelhante à do estoque de ECT, além de apresentar um novo aumento de magnitude por volta da profundidade de 500 metros.
- A Corrente do Brasil aumenta em espessura à medida que flui para sul (profundidade menor do que 500 metros até 26°S, depois ganha espessura até passar de 1000 metros em 31°S).

Sugestão de trabalhos futuros:

- Analisar a relação entre o sentido de inclinação das isopicnais com o valor do sinal do termo de conversão baroclínica no mesmo local.
- Criação de uma sequência de rotinas para a análise energética.
- Avaliação da influência da escolha do campo básico na análise energética.

## CAPÍTULO 7

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azevedo, J.L.L. et al. (2008), *Os Processos de Conversão de Energia nos Oceanos: uma Revisão do Diagrama de Lorenz*, Revista Brasileira de Geofísica, 26(2), 153-172.

Assireu, A.T. et al. (2003), *Surface Circulation and Kinetic Energy in the SW Atlantic Obtained by Drifters*, Continental Shelf Research, 23(2), 145-157.

Bane, J.M. et al. (1981), *Synoptic Observations of the Three-Dimensional Structure and Propagation of Gulf Stream Meanders along the Carolina Continental Margin*, Journal of Geophysical Research, 86, 6411-6425.

Bane, J.M. (1983), *Initial Observations of the Subsurface Structure and Short-term Variability of Seaward Deflection of the Gulf Stream off Charleston, South Carolina*, Journal of Geophysical Research, 88(C8), 4673 p.

Belo, W.C. (2011), *A Recirculação Interna do Giro Subtropical do Atlântico Sul e a Circulação Oceânica na Região do Polo Pré-sal da Bacia de Santos*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 382 p.

Bishop, S. T. et al. (2013), *Divergent Eddy Heat Fluxes in the Kuroshio Extension at 144° - 148° E. Part I: Mean Structure*, Journal of Physical Oceanography, 43(8), 1533-1550.

Bowen, M.M. et al. (2005), *Variability and Forcing of the East Australian Current*, Journal of Geophysical Research, 110, C03019.

Brooks, D.A. & Bane, J.M. (1978), *Gulf Stream Deflection by a Bottom Feature off Charleston, South Carolina*, Science (New York, N. Y.), 201(4362), 1225-1226.

Brooks, I.H. & Niiler, P.P. (1977), *Energetics of the Florida Current*, Journal of Marine Research, 35(1), 163-191.



Calado, L. (2001), *Dinâmica da Formação dos Meandros e Vórtices da Corrente do Brasil ao Largo do Sudeste Brasileiro*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 112 p.

Calado, L. (2006), *Dinâmica da Interação da Atividade de Meso-escala da Corrente do Brasil com o Fenômeno da Ressurgência Costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, RJ*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 159 p.

Campos, E.J. et al. (1995), *Water Mass Structure and Geostrophic Circulation in the South Brazil Bight – Summer of 1991*, Journal of Geophysical Research, 100(C9), 18537-18550.

Campos, E.J.D. (2006), *Equatorward Translation of the Vitoria Eddy in a Numerical Simulation*, Geophysical Research Letters, 33, L22607.

Cerrone, B.N. (2010), *Estatísticas da Circulação do Oceano Atlântico Sudoeste a partir de dados Lagrangeanos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 61 p.

Chelton, D.B. et al. (1990), *Geosat Altimeter Observations of the Surface Circulation of the Southern Ocean*, Journal of Geophysical Research, 95(C10), 17877-17903.

Cirano, M. et al. (2006), *A Circulação Oceânica de Larga-escala na Região Oeste do Atlântico Sul com Base no Modelo de Circulação Global OCCAM*, Revista Brasileira de Geofísica, 24(2), 1-59.

Cornillon, P. (1986), *The Effect of the New England Seamounts on Gulf Stream Meandering as Observed from Satellite IR Imagery*, Journal of Geophysical Research, 16, 386-289.

Cronin, M. & Watts, D.R. (1996), *Eddy-Mean Flow Interaction in the Gulf Stream at 68° W. Part I: Eddy Energetics*, Journal of Physical Oceanography, 26(10), 2107-2132.

Cushman-Roisin, B. (1994), *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*, Ed. Prentice Hall, 320 p.

Dewar, W.K. & Bane, J.M. (1989), *Gulf Stream Dynamics, Part II: Eddy Energetics 73° W*, Journal of Physical Oceanography, 19, 1574-1586.

Dias, F.B. (2013), *Dinâmica Físico-biológica da Ressurgência Costeira na Margem Continental Oeste do Atlântico Sul*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 127 p.

Ducet, N. et al. (2000), *Global High-resolution Mapping of Ocean Circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and -2*, Journal of Geophysical Research, 105(C8), 19477-19489.

Ducet, N. & P.-Y.L. Traon (2001), *A Comparison of Surface Eddy Kinetic Energy and Reynolds Stresses in the Gulf Stream and the Kuroshio Current Systems from Merged TOPEX/Poseidon and ERS-1/2 Altimetric Data*, Journal of Geophysical Research, 106(C8), 16603-16622.

Emery, W.J. & Thomson, R.E. (2001), *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, Elsevier, 638 p.

Evans, D.L. et al. (1983), *A Note on the Transport of the Brazil Current*, Journal of Physical Oceanography, American Meteorological Society, 13(9), 1732-1783.

Evans, D.L. & Signorini, S.S. (1985), *Vertical Structure of the Brazil Current*, Nature, London, 315, 48-50.

Feron, R.C.V. (1995), *The Southern Ocean Western Boundary Currents: Comparison of Fine Resolution Antarctic Model Results with Geosat Altimeter Data*, Journal of Geophysical Research, 100(C3), 4959-4975.

Ferrari, R. & Wunsch, C. (2009), *Ocean Circulation Kinetic Energy: Reservoirs, Sources, and Sinks*, Annual Review of Fluid Mechanics, 41, 253-282.

Flier, G.R. (1978), *Models of Vertical Structure and Calibration of Two-layer Models*, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2, 341-381.

Fofonoff, N.P. & Hall, M.M. (1983), *Estimates of Mass, Momentum and Kinetic Energy Fluxes of the Gulf Stream*, Journal of Physical Oceanography, 13, 1868-1877.

Fonteles, C.S. (2012), *Sobre a Variabilidade da Energia Cinética Turbulenta (EKE) nas Correntes de Contorno Oeste dos Giros Subtropicais do Hemisfério Sul*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 87 p.

Gaeta, S.A. et al. (1999), *The Vitoria Eddy and its Relation to the Phytoplankton Biomass and Primary Productivity During the Austral Fall of 1995*, *Archive of Fishery and Marine Research*, 47(2/3), 253-270.

Garfield, N. (1990), *The Brazil Current at Subtropical Latitudes*, Tese de Doutorado, University of Rhode Island, 121 p.

Gill, A. (1982), *Atmosphere Ocean Dynamics*, International Geophysics Series, Academic Press, 30, 662 p.

Gordon, A.L. & Greengrove, C.L. (1986), *Geostrophic Circulation of the Brazil-Falkland Confluence*. *Deep Sea Research Part A*, *Oceanographic Research Papers*, 33(5), 573-585.

Gordon, A.L. et al. (1987), *Stratification and Circulation at the Agulhas Retroflection*, *Deep-Sea Research*, 34(4), 565-599.

Gordon, A.L. (1989), *Brazil-Malvinas Confluence*, *Deep-Sea Research*, 36(3), 359-384.

Greatbatch, R.J. et al. (2010a), *Transport Driven by Eddy Momentum Fluxes in the Gulf Stream Extension Region*, *Geophysical Research Letters*, 37, L24401.

Greatbatch, R.J. et al. (2010b), *Ocean Eddy Momentum Fluxes at the Latitudes of the Gulf Stream and the Kuroshio Extensions as Revealed by Satellite Data*, *Ocean Dynamics*, 60, 617-628.

Halkin, D. & Rossby, T. (1985), *The Structure and Transport of the Gulf Stream at 73° W*, *Journal of Physical Oceanography*, 15, 1439-1452.

Holland, W.R. (1978), *The role of Mesoscale Eddies in the General Circulation of the Ocean-numerical Experiments Using a Wind-driven Quasi-geostrophic Model*, *Journal of Physical Oceanography*, 8, 363-392.

Holton, J. (1992), *An Introduction to Dynamic Meteorology*, International Geophysics Series, Academic Press, 48, 511 p.

- Hulbert, H.E., et al. (2008), *Steering of Upper Ocean Currents and Fronts by the Topographically Constrained Abyssal Circulation*, *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 45(3-4), 102-134.
- Illari, L. & Marshall, J.C. (1983), *On the Interpretation of Eddy Fluxes During a Blocking Episode*, *Journal of Atmospheric Sciences*, 40, 2232-2242.
- Kang, D. & Curchitser, E.N. (2015), *Energetics of Eddy-Mean Flow Interactions in the Gulf Stream Region*, *Journal of Physical Oceanography*, 45, 103-120.
- Kundu, P. & Cohen, I. (1990), *Fluid Mechanics*, Academic Press, 730 p.
- LeBlond, P.H. & Mysak, L.A. (1978), *Waves in the Ocean*, Elsevier Oceanography Series, Ed. Elsevier, 20, 620 p.
- Lee, M.-M. et al. (2007), *Eddy Advective and Diffusive Transports of Heat and Salt in the Southern ocean*, *Journal of Physical Research*, 37, 1376-1393.
- Lee, T. & Cornillon, P. (1996), *Propagation of Gulf Stream Meanders Between 74° W and 70° W*, *Journal of Physical Oceanography*, 26, 205-224.
- Legeais, J. -F. et al. (2013), *Lagrangian Observations in the Intermediate Western Boundary Current of the South Atlantic*, *Deep-Sea Research*, 85, 109-126.
- Li, L. et al. (2007), *Lorenz Energy Cycle of the Global Atmosphere Based on Re-analyses Datasets*, *Geophysical Research Letters*, 34, L16813.
- Lorenz, E.N. (1955), *Available Potential Energy and Maintenance of the General Circulation*, *Tellus*, 7, 157-167.
- Maltrud, M.E. & McClean, J.L. (2005), *An Eddy Resolving Global 1/10° Ocean Simulation*, *Ocean Modell*, 8, 31-54.
- Maltrud, M.E. et al. (2010), *Boundary Impulse Response Functions in a Century-long Global Eddy Ocean Simulation*, *Environmental Fluid Mechanics*, 10(1-2), 275-295.
- Marshall, J. & Shutts, G. (1981), *A Note on Rotational and Divergent Eddy Fluxes*, *Journal of Physical Oceanography*, 11, 1677-1680.

Mascarenhas, A.S. et al. (1971), *A Study of the Oceanographic Conditions in the Region of Cabo Frio*, J.D. Costlow Jr., Ed. *Fertility of the Sea*, Gordon and Breach, 1, 238-308.

Masumoto, Y. et al. (2004), *A Fifty-year Eddy-resolving Simulation of the World Ocean-Preliminary Outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator)*, *Journal of the Earth Simulator*, 1, 35-56.

Mata, M.M. et al. (2000), *East Australian Current Volume Transports at 30° S: Estimates from the World Ocean Circulation Experiment Hydrographic Sections PR11/P6 and the PCM3 Current Meter Array*, *Journal of Geophysical Research*, 105(C12), 28509-28526.

Morrow, R. et al. (2010), *Eddy Response to Southern Ocean Climate Modes*, *Journal of Geophysical Research*, 115, C10030.

Müller, T.J. et al. (1998), *Direct Measurements of the Western Boundary Currents Between 20° S and 28° S*, *Journal of Geophysical Research*, 103(C3), 5429-5543.

Munk, W. (2003), *50 Years of Ocean Discovery: National Science Foundation 1950-2000*, capítulo *Achievements in Physical Oceanography*, National Academy Press, 44-50.

Nardi, E. (2013), *Influência do Cone do Rio Grande na Formação de Atividade de Mesoescala na Corrente do Brasil*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 77 p.

Neto, D.F.U. & Silveira, I.C.A. (2004), *Estrutura Dinâmica das Contracorrentes Equatoriais do Oceano Atlântico ao longo de 44W*, *Revista Brasileira de Geofísica*, 21(2), 145-161.

Oliveira, L.R. (2008), *Energética do Atlântico Sudoeste a partir de Observações Lagrangeanas e de Simulações do Parallel Ocean Climate Model*, Tese de Doutorado, 227 p.

Oliveira, L.R. et al. (2009), *Brazil Current Surface Circulation and Energetics Observed from Drifting Buoys*, *Journal of Geophysical Research*, 114, C10006.

- Olson, D.B. et al. (1983), *Gulf Stream Frontal Statistics from Florida Straits to Cape Hatteras Derived from Satellite and Historical Data*, Journal of Geophysical Research, 88(C8), 4569-4577.
- Olson, D.B. et al. (1988), *Temporal Variations in the Separation of Brazil and Malvinas Currents*, Deep-Sea Research, 35(12), 1971-1990.
- Oort, A.H. et al. (1989), *New Estimates of the Available Potential Energy in the World Ocean*, Journal of Geophysical Research, 94, 3187-3200.
- Oort, A.H. et al. (1994), *Estimates of the Energy Cycle of the Oceans*, Journal of Geophysical Research, 99, 7665-7688.
- Orlansky, I. & Cox, M.D. (1973), *Baroclinic Instability in the Ocean Currents*, Geophysical Fluid Dynamics, 4, 297-332.
- Pedlosky, J. (1987), *Geophysical Fluid Dynamics*, 2. Ed., New York: Springer Verlag, 710 p.
- Peixoto, J.P. & Oort, A.H. (1992), *Physics of Climate*, AIP Press, 520 p.
- Pereira, M.D. et al. (2009), *Caracterização de Feições Oceanográficas na Plataforma de Santa Catarina através de Imagens Orbitais*, Revista Brasileira de Geofísica, 27(1), 81-93.
- Peterson, R. & Stramma, L (1991), *Upper-level Circulation in the South Atlantic Ocean*, Progress in Oceanography, 26(1), 1-73.
- Pichevin, T. & Nof, D. (1996), *The Eddy Cannon*, Deep-Sea Research, 43(9), 1475-1507.
- Quartly, G.D. & Srokosz, M.A. (1993), *Seasonal Variations in the Region of the Agulhas Retroflexion: Studies with Geosat and FRAM*, Journal of Physical Oceanography, 23(9), 2107-2124.
- Ridgway, K.R. & Dunn, J.R. (2003), *Mesoscale Structure of the Mean East Australian Current System and its Relationship with Topography*, Progress in Oceanography, 56, 189-222.

- Rhines, P.B. (1977), *The Dynamics of Unsteady Currents*, The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Sea, Chapter 7, E. D. Goldberg, Ed. Wiley, 1048 p.
- Rocha, C.B. et al. (2014), *Vertical Structure, Energetics and Dynamics of the Brazil Current System at 22° S – 28° S*, Journal of Geophysical Research, 119(1), 52-69.
- Roulet, G. et al. (2014), *Global Interior Eddy Available Potential Energy Diagnosed from Argo Floats*, Geophysical Research Letters, 41, 1651-1656.
- Rosby, T. (1987), *On the Energetics of the Gulf Stream at 73° W*, Journal Marine Research, 45, 59-82.
- Sasaki, H. et al. (2004), *A Series of Eddy-resolving Ocean Simulations in the World Ocean: OFES (OGCM for the Earth Simulator) Project*, Proc OCEANS '04, Kobe, Japan, IEEE, 1535-1541.
- Sato, R.M. (2014), *O Meandramento Ciclônico da Corrente do Brasil ao largo do Cabo de Santa Marta (~28,5° S)*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 107 p.
- Schmid, C. et al. (1995), *The Vitória Eddy and Its Relation to the Brazil Current*, Journal of Physical Oceanography, 25, 2532-2346.
- Schmitz, W.J.Jr. (1996), *On The Eddy Field in the Agulhas Retroflexion, with some global considerations*, Journal of Geophysical Research, 101(C7), 16259-16271.
- Shchepetkin, A.F. & McWilliams, J.C. (2005), *The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): a Split-explicit, Free-surface, Topography-following-coordinate Oceanic Model*, Ocean Modelling, 9(4), 347-404.
- Shmitz, W.J. & Niiler, P.P. (1969), *A Note on the Kinetic Energy Exchange Between Fluctuations and Mean Flow in the Surface Layer of the Florida Current*, Tellus, 21, 814-819.
- Signorini, S.R. (1978), *On the Circulation and the Volume Transport of the Brazil Current Between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay*, Deep-Sea, Research, 25, 481-490.

- Signorini, S.R. et al. (1989), *Corrente do Brasil: Estrutura Térmica entre 19° e 25° S e Circulação Geostrófica*, Bolm. Inst. Oceanogr., São Paulo, 37(1), 33-49.
- Silveira, I.C.A. et al. (2000a), *A Corrente do Brasil ao largo da Costa Leste Brasileira*, Revista Brasileira de Oceanografia, 48(2), 171-183.
- Silveira, I.C.A. et al. (2000b), *Dynamics of the North Brazil Current Retroflexion from the Western Tropical Atlantic Experiment Observations*, Journal of Geophysical Research, 105(C12), 28559-28583.
- Silveira, I.C.A. et al. (2004), *On the Baroclinic Structure of the Brazil Current-intermediate Western Boundary Current System at 22° - 23° S*, Geophysical Research Letters, 31, L14308.
- Silveira, I.C.A. et al. (2008), *Is the Meander Growth in the Brazil Current System off Southeast Brazil due to Baroclinic Instability?*, Dynamics of Atmospheres and Oceans, 45, 187-207.
- Soares, S.M. (2005), *Vórtices Frontais da Corrente do Brasil ao Largo da Plataforma Continental Sul Brasileira*, Monografia (Bacharelado em Oceanografia), Universidade Federal do Rio Grande, 80 p.
- Souza, J.F.A. et al. (2011), *Uma Revisão sobre a Turbulência e sua Modelagem*, Revista Brasileira de Geofísica, 29(1), 21-41.
- Stammer, D. et al. (2006), *Temporal Changes in Ocean Eddy Transports*, Journal Of Physical Oceanography, 36, 543-550.
- Stommel, H. (1985), *The Abyssal Circulation*, Deep-Sea Research, 5, 80-82.
- Stramma, L. & England, M. (1999), *On the Water Masses and Mean Circulation of the South Atlantic Ocean*, Journal of Geophysical Research, 104, 20863-20883.
- Thoppil, P.G. et al. (2011), *Energetics of a Global Ocean Circulation Model Compared to Observations*, Geophysical Research Letters, 38, L15607.
- Tracey, C.E. & Watts, D.R. (1986), *On Gulf Stream Meander Characteristics Near Cape Hatteras*, Journal of Geophysical Research, 91, 7587-7602.



- Von Schwind, J.J. (1980), *Geophysical Fluid Dynamics for Oceanographers*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 307 p.
- Von Storch, J.-S. et al. (2012), *An Estimate of the Lorenz Energy Cycle for the World Ocean based on the 1/10° STORM/NCEP Simulation*, *Journal of Physical Oceanography*, 42, 2185-2205.
- Waterman, S. & Jayne, S.R. (2011), *Eddy-Mean Flow Interactions in the Along-Stream Development of a Western Boundary Current Jet: An Idealized Model Study*, *Journal of Physical Oceanography*, 41, 682-707.
- Watts, D.R. & Johns, W.E. (1982), *Gulf Stream Meanders: Observations on Propagation and Growth*, *Journal of Geophysical Research*, 87, 9467-9476.
- Webster, F. (1961), *The Effect of Meanders on the Kinetic Energy Balance of the Gulf Stream*, *Tellus*, 13, 392-401.
- Webster, F. (1965), *Measurements of Eddy Fluxes of Momentum in the Surface Layer of the Gulf Stream*, *Tellus*, 17, 239-245.
- Wilkin, J.L. & Morrow, R.A. (1994), *Eddy Kinetic Energy and Momentum Flux in the Southern Ocean: Comparison of a Global Eddy – Resolving Model with Altimeter, Drifter, and Current-Meter data*, *Journal of Geophysical Research*, 99(C4), 7903-7916.
- Wyrtki, K. et al. (1976), *Eddy Energy in the Oceans*, *Journal of Geophysical Research*, 81(15), 2641-2646.
- Xie, L. et al. (2007), *Effect of Bathymetric Curvature on Gulf Stream Instability in the Vicinity of the Charleston Bump*, *Journal of Physical Oceanography*, 37, 452-475.
- Zhai, X. & Greatbatch, R.J. (2006), *Inferring the Eddy-induced Diffusivity for Heat in the Surface Mixed Layer Using Satellite Data*, *Geophysical Research Letters*, 33, L24607.