Francisco José da Silva Dias

**Circulação e massas de água na plataforma
continental leste do Ceará: modelagem
numérica e observações.**

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de
Pós-Graduação do Instituto Oceanográfico da Uni-
versidade de São Paulo, para obtenção do grau de
Doutor em Ciências, área de Oceanografia Física.

Orientador:

Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho

Co-orientador:

Prof. Dr. Luiz Drude de Lacerda

São Paulo

2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**Circulação e massas de água na plataforma continental leste do
Ceará: modelagem numérica e observações.**

Francisco José da Silva Dias

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de Pós-Graduação do Instituto
Oceanográfico da Universidade de São Paulo, para obtenção do grau de Doutor em
Ciências, área de Oceanografia Física.

Julgada em 00/00/2011/.

Prof. Dr. Belmiro Mendes de Castro Filho (Orientador)	Conceito
Prof. Dr.	Conceito
Prof. Dr.	Conceito
Prof. Dr.	Conceito
Prof. Dr.	Conceito

*“A imaginação é mais importante que a ciência,
porque a ciência é limitada,
ao passo que a imaginação abrange
o mundo inteiro.”*

Albert Einstein

Aos meus pais, **Jose Eleomar Vieira Dias** e **Maria Clarice da Silva Dias** pelo apoio e amor incondicional.

A minha amada esposa **Cristiane de Oliveira Dias** pelo apoio, amor incondicional e pelas palavras de conforto nos momentos mais difíceis da realização desta tese fazendo-me seguir em frente, acreditando que resiliência é fundamental. Fique certa de que, em grande parte desta tese você é co-autora.

Dedico

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	vii
Abstract	ix
Lista de Figuras	xxx
Lista de Tabelas	xxxii
1 Introdução	1
1.1 Plataforma Continental do Ceará.	1
1.2 Estuário do Rio Jaguaribe.	4
1.3 Regime de Chuvas e Ventos.	8
1.4 Processos Físicos na Plataforma Continental do Ceará e no Estuário do Rio Jaguaribe.	12
2 Hipóteses e Objetivos	18
2.1 Objetivo Geral.	19
3 Dados e Métodos	21
3.1 Aquisição dos Dados.	21
3.1.1 Plataforma Continental Média e Externa.	21
3.1.2 Plataforma Continental Interna.	25
3.1.3 Campo de Vento.	26
3.1.4 Estuário do Rio Jaguaribe.	27
3.2 Metodologia	28

3.2.1	Estrutura termohalina e massas de água.	28
3.2.2	Campo de Ventos.	41
3.2.3	Correntes na Plataforma Continental e Estuário do Rio Jaguaribe.	43
3.2.4	Interações Continente Oceano.	51
3.2.5	Experimentos Numéricos.	57
4	Resultados	66
4.1	Estrutura termohalina e massas de água.	66
4.1.1	Propriedades Termohalinas: estação de chuva.	66
4.1.2	Propriedades Termohalinas: estação de seca.	91
4.1.3	Diagramas T-S.	117
4.1.4	Massas de Água.	123
4.1.5	Frentes.	140
4.2	Correntes: Observações.	143
4.2.1	Forçante Meteorológica: Vento.	143
4.2.2	Campo de Correntes.	150
4.2.3	Tensão de Cisalhamento do Vento X Correntes.	206
4.3	Correntes geradas pelo vento - ROMS.	212
4.3.1	Variação da Energia Cinética.	212
4.3.2	Variação Espacial do Campo de Correntes e Elevação do Nível do Mar forçados por vento Uniforme.	213
4.4	Correntes de Maré.	234
4.5	Interações Continente-Oceano.	239
4.5.1	Vazões nas Estações de Chuva e Seca.	239
4.5.2	Volumes de Água, Prisma de Maré e Taxas de Descarga nas Es- tações de Chuva e Seca.	241
4.5.3	Hidrodinâmica e Classificação do Estuário nas Estações de Chuva e Seca.	243
4.5.4	Número de Richardson Estuarino e por Camada nas Estações de Chuva e Seca.	248
4.5.5	Transporte de Sal nas Estações de Chuva e Seca.	249

4.5.6	Transporte de Material Particulado em Suspensão nas Estações de Chuva e Seca.	251
5	Discussões.	259
5.1	As Regiões da Plataforma Continental.	259
5.2	Correntes.	266
5.2.1	Plataforma Continental.	266
5.2.2	Estuário do Rio Jaguaribe.	275
5.3	Interações Continente-Oceano	277
6	Conclusões	282
	Referências Bibliográficas	284

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado força nos momentos mais difíceis da confecção desta tese, renovando meu ânimo a cada obstáculo encontrado no caminho.

A minha esposa, **Cristiane de Oliveira Dias** pelos momentos em que a realização deste trabalho emprestou de nosso convívio familiar e por ter acreditado que este sonho poderia se tornar realidade, a ponto de interromper alguns de seus projetos pessoais.

Aos meus pais **Jose Eleomar Vieira Dias** e **Maria Clarice da Silva Dias** pelo apoio incondicional.

Ao meu orientador e amigo Prof. **Dr. Belmiro Mendes de Castro**, por ter acreditado na proposta de trabalho que originou esta tese de Doutorado e por me passar os conhecimentos necessários a realização desta. Agradeço também pelas inúmeras oportunidades e portas abertas no Instituto Oceanográfico da USP.

Ao meu amigo e co-orientador Prof. **Dr. Luiz Drude de Lacerda** por acreditar na realização desta tese e pelo apoio as publicações e trabalhos de campo, que hoje me fazem um cientista melhor, além de todas as oportunidades oferecidas ao longo de minha carreira acadêmica.

Ao amigo Prof. **Dr. Luiz Bruner de Miranda** pela disposição e constante disponibilidade de tempo em passar o conhecimento adquirido ao longo de sua brilhante carreira científica.

Ao amigo Prof. **Dr. Ilson Carlos Almeida da Silveira** pela disponibilidade e conhecimento compartilhado ao longo das disciplinas. Agradeço também pelas oportunidades abertas, pelos conselhos e aprendizado nas diversas reuniões das comissões Coordenadora de Programa da Oc. Física e Comissão de Pós-Graduação, e enquanto Coordenador da Pós-Graduação do Instituto Oceanográfico da USP.

Ao amigo Prof. **Dr. Paulo Simionatto Polito** sempre disponível a compartilhar con-

hecimento, e pelos conselhos e aprendizado nas diversas reuniões das comissões Coordenadora de Programa da Oc. Física e Comissão de Pós-Graduação, e enquanto Coordenador da Pós-Graduação em Oc. Física do Instituto Oceanográfico da USP.

A amiga Prof. **Dra. Rozane Valente Marins** pelo apoio irrestrito durante à realização dos Cruzeiros Oceanográficos e por acreditar na realização desta tese de doutorado, se preocupando com a carreira de cada um de seus ex-alunos.

Ao amigo Prof. **Dr. Marcelo Dottori** pelo conhecimento compartilhado e inúmeras conversas sobre o tema desta tese.

Aos amigos do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIO/IO/USP), **Luiz Viana Nonato, Francisco Vicentini Neto e Wilson Natal** pelo apoio na organização e execução dos cruzeiros oceanográficos realizados na plataforma continental do estado do Ceará no âmbito do INCT-TMCOcean. Sem vocês o trabalho teria sido inexecutável.

Aos amigos do Laboratório de Dinâmica Oceânica (LADO/IO/USP), **Rafael G. Soutelino, César B. Rocha, Thiago Podadera, Leilane Passos, Leandro Ponsoni, Fernando Marin**, pelo conhecimento compartilhado, disponibilidade, extrema paciência e amizade ao longo destes quatro anos de minha estadia no IO/USP.

Aos amigos do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira (LHICo/IO/USP), **José Roberto, Helvio Gregório, Vitor Izumi, Daniel Ruffato, Luis Felipe Santos, Sandro Paixão, Piero Mazzini, Olavo Marques** pelo conhecimento compartilhado, disponibilidade e amizade ao longo deste trabalho de tese no IO/USP.

Ao amigo do Laboratório de Simulação e Previsão Numérica Hidrodinâmica (LabSIP/IO/USP) **Thiago Marques Coelho**, pelo conhecimento compartilhado, disponibilidade e extrema paciência ao longo destes quatro anos de trabalho no IO/USP.

Aos amigos do Laboratório de Oceanografia por Satélite (LOS/IO/USP), **Márcio Borges, Fabrício Oliveira, Lucas Laurindo, Márcio Yamashita, Sebastian Krieger, Wandrey Watanabe**, pela amizade, conhecimento compartilhado e disponibilidade.

Aos amigos do Laboratório de Oceanografia Física, Clima e Criosfera, **Marcos Tonelli e Elisandra Hille** pela amizade nestes quatro anos de trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Modelagem Numérica Oceânica (Labmon/IO/USP), **Rafael Gonçalves e Fabiola Amorim**, pelo conhecimento compartilhado ao longo deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Biogeoquímica Costeira (LBC/LABOMAR/UFC), **José Edvar, Breno Gustavo, Louize Fonseca e Talita Maia**, pelo apoio na organização e execução dos cruzeiros oceanográficos na plataforma continental e estuário do Rio Jaguaribe.

Aos amigos do Laboratório de Nutrientes, Micronutrientes e Traços do Mar (Lab-nut/IO/USP), **Samara Eschrique, Vitor Chiozzini, Leonardo Kuniyoshi e Livia Coelho**, pelo apoio na organização e execução dos cruzeiros oceanográficos na plataforma continental e estuário do Rio Jaguaribe.

Aos amigos do Laboratório de Dinâmica Costeira (LDC/LABOMAR/UFC), **Luiz J. C. Bezerra e Mario Godoy**, pela ajuda nos trabalhos de campo e processamento dos dados de batimetria e confecção dos mapas da área em estudo.

Ao amigo **Miguel Savio** do LABOMAR, pela ajuda na organização dos cruzeiros oceanográficos na plataforma do Ceará.

A tripulação do navio oceanográfico professor Martins Filho do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR).

A todos os professores do IO/USP pelos ensinamentos ao longos dos cursos ministrados.

Aos funcionários do IO/USP pelo excelente trabalho realizado e pelos inúmeros auxílios ao longo deste trabalho.

Resumo

A Plataforma Continental do Estado do Ceará (PCCE) foi dividida em: Plataforma Continental Externa (PCE), Plataforma Continental Média (PCM) e Plataforma Continental Interna (PCI). Os critérios físicos adotados levaram em consideração intrusões mais ou menos intensas de água tropical (AT) transportada pela Corrente Norte do Brasil (CNB) em direção à costa; a intensificação dos gradientes de salinidade superficial; e a mistura entre diferentes massas de água. Durante a estação de chuva, observamos que na região da PCE a massa de Água Tropical (AT) ficou aprisionada em níveis verticais maiores que 60 m, enquanto que na PCI observamos a formação de uma pluma estuarina que ocupou os dois primeiros metros da coluna de água e provocou o rebaixamento do topo da massa de água costeira (AC), chegando a 6 km da linha de costa. A variação espaço-temporal das correntes na frequência submaregráfica mostram que a tensão de cisalhamento do vento (TCV) foi o principal agente na transferência de momentum para as águas da PCCE, gerando uma corrente de deriva polarizada para NW, paralela à direção das isóbatas, em resposta ao empilhamento de água na costa. Este comportamento, associado a espessura da camada de Ekman muito maior que a profundidade local, mostra que a dinâmica do primeiro modo de oscilação (barotópico) é dominante, gerando correntes na direção do vento forçante, como resposta à sua ação. O modo barotópico também foi dominante nas correntes de maré, com as componentes semi-diurnas (M_2 e S_2) caracterizando-se como as mais energéticas. A orientação normal das elipses de maré associada ao sentido horário de rotação, foram responsáveis pelas maiores velocidades de corrente na frequência maregráfica. Os resultados obtidos com o modelo numérico mostram a resposta barotrópica das águas da PC a um vento estacionário com correntes para NW. Os maiores valores das corrente e elevação do nível do mar ocorreram na região

mais próxima à costa. As correntes de maré e a orientação das elipses de maré obtidas com a modelagem corroboram o o comportamento dos dados observacionais. Para o estuário do Rio Jaguaribe (CE), o período de grandes descargas fluviais resultou em fluxos unidirecionais transportando volumes de $97 \times 10^6 \text{ m}^3$, advectando os processos de mistura para a região da PCI. Entretanto, na estação seca, a minimização dos fluxos fluviais resultou na maior atuação da maré na região, controlando a posição espacial da zona de máxima turbidez. Nesta época do ano o estuário foi classificado de acordo com parâmetros de estratificação e circulação como do tipo 2a, parcialmente misturado.

Palavras Chave: Correntes, massas de água, Plataforma Continental, Rio Jaguaribe, Modelagem Numérica.

Abstract

The Continental Shelf of Ceará State was divided in: External (ECS), Middle (MCS) and Inner (ICS) Continental Shelf. The physical criteria of classification considered intrusions of Tropical Water (TW) transported onshore by the North Brazil Current (NBC); intensification of surface saline gradient; and mixing of different water masses. During the rainy season, the TW was retained the ECS at levels higher than 60 m, while an estuarine plume formation was observed in the PCI, occupying the two first meters of the water column, sinking top of the coastal water mass (CW) to 6 km off coast. The space-time variation of the currents in the subtidal frequency shows that wind stress was the main agent in the momentum transfer to continental shelf waters, generating a current to NW, parallel to the direction of the isobaths, in response to the stacking of water on the coast. This behavior associated to the thickness of the Ekman layer much larger than local depth, shows the dominance of the barotropic dynamic, generating currents in the wind direction, as response to its action. The barotropic mode was also dominant in the tidal currents, with semi-diurnals components (M_2 e S_2) characterized as the most energetic. The normal orientation of tidal ellipses, associated to clockwise rotation, were responsible for the highest current velocities in tidal frequency in MCS. Numerical model results show a barotropic response of waters to a stationary wind, with currents to NW, and highest values of currents and sea level occurring closer the coast. Tidal currents and tidal ellipses orientation obtained by numerical model support the observations. In relation to Jaguaribe River estuary, the period of great river input led to unidirectional flows, which transport volumes of $97 \times 10^6 \text{ m}^3$, advecting the mixing process to the ICS region. However, during the dry season, river input decrease resulted in a larger tide influence in the region, controlling the spatial position of the mixing zone. For this time, the estuary was classified according to the parameters

of estratification and circulation as a 2a type, partially mix.

Key Words: Currents, water mass, continental shelf, Jaguaribe River, numerical model.

Lista de Figuras

1.1	Plataforma Continental do Estado do Ceará. Batimetria em metros.	2
1.2	Características batimétricas da PCCE. Batimetria em metros.	3
1.3	Vórtice de Macau ao largo da PCCE. Cortesia de Marin (2009).	3
1.4	Estuário do Rio Jaguaribe (CE).	4
1.5	Área de influência da bacia de drenagem do rio Jaguaribe (CE).	5
1.6	Morfologia de fundo para o estuário do estuário do Rio Jaguaribe (CE), para o ano de 2004.	7
1.7	Vazões medidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) para à bacia de drenagem do Rio Jaguaribe.	7
1.8	Precipitações médias históricas para a região do baixo Jaguaribe. Observa-se de janeiro a junho a estação chuvosa, com o máximo pluviométrico em Abril. No segundo semestre tem-se a estação seca, onde setembro é o mês mais seco. .	9
1.9	Variação sazonal da tensão de cisalhamento do vento para os meses de Junho (A) e Outubro (B) de 2009.	10
1.10	Amplitude, em cm, da constituinte M2 da maré mapeada por Castro (1996) a partir de dados de altimetria de satélite.	15
1.11	Fase em relação a Greenwich, em graus, da constituinte M2 da maré mapeada por Castro (1996) a partir de dados de altimetria de satélite	15
3.1	Plataforma Continental externa e média ao largo do rio Jaguaribe (CE). Os pontos em vermelho representam as estações hidrográficas realizadas nos dois cruzeiros oceanográficos. O fundeio está representado pelo quadrado vermelho.	22
3.2	Aquisição de dados de velocidade com o auxílio do ADCP rebocado na popa da embarcação na Plataforma Continental ao largo do rio Jaguaribe (CE). . . .	24

3.3	Carapaça anti-arrasto utilizada para fundeio do ADCP, sendo preparada para o lançamento na Plataforma Continental Média, ao largo do estuário do rio Jaguaribe (CE).	25
3.4	Plataforma Continental Interna ao largo do rio Jaguaribe (CE). Os pontos em vermelho representam a malha amostral realizadas nos dois cruzeiros oceanográficos.	26
3.5	Estuário do rio Jaguaribe (CE). As linhas em branco representam as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC.	28
3.6	Perfil de temperatura realizado na plataforma continental externa, referente aos primeiros 60 m de profundidade, exemplificando o equi-espacamento vertical (binado) e filtragem dos dados por janela móvel.	30
3.7	Perfil de temperatura na plataforma continental interna, referente aos primeiros 10 m de profundidade, exemplificando o equi-espacamento vertical (binado) e filtragem dos dados por janela móvel.	31
3.8	Grade ortogonal utilizada para a interpolação dos campos horizontais de salinidade, temperatura, densidade e massas de água na plataforma continental média e externa.	32
3.9	Grade ortogonal utilizada para a interpolação dos campos horizontais de salinidade, temperatura, densidade e massas de água na plataforma continental interna.	32
3.10	Correlação amostral para os dados hidrográficos na plataforma continental média e externa, conforme ajuste não linear para a equação 3.8. O comprimento de correlação (l_c) foi de 17 km e a variância do erro amostral aleatório $\epsilon^2 = 0,09$	35
3.11	Correlação amostral para os dados hidrográficos na plataforma continental interna, conforme ajuste não linear para a equação 3.8. O comprimento de correlação (l_c) foi de 1,1 km e a variância do erro amostral aleatório $\epsilon^2 = 0,009$	35
3.12	Perfis hidrográficos de temperatura, salinidade e densidade obtidos no estuário do Rio Jaguaribe, exemplificando o equi-espacamento vertical (binagem) e filtragem dos dados. A figura da esquerda para temperatura, em °C, e da direita para salinidade. As linhas em preto representam os dados brutos e as linhas em vermelho representam os dados filtrados.	40

3.13	Exemplo de correlação para os dados de TSD (temperatura, salinidade, densidade), utilizando o ajuste não linear, com um comprimento de correlação $l_c = 62,5$ m, e uma variância do erro amostral aleatório $\varepsilon^2 = 0,02$, para o estuário do Rio Jaguaribe.	41
3.14	Grade ortogonal utilizada na PCCE para a obtenção dos campos de vento sobre a PCCE, utilizando os dados do QuikSCAT.	42
3.15	Comparação qualitativa entre os dados de ADCP brutos (painel superior) e após a remoção dos dados espúrios, do gradeamento horizontal e aplicação da A.O (painel inferior).	45
3.16	Exemplo da utilização do filtro digital como passa baixa, e a diferença entre o sinal total e as oscilações submaregráficas.	50
3.17	Representação da espacialização de áreas de representatividade de cada estação de amostragem e MPS de acordo com diagramas de Voronoi, para o estuário do rio Jaguaribe.	55
3.18	Representação esquemática do modelo em caixa utilizado para o estuário do rio Jaguaribe, no cálculo dos balanços líquido e de materiais. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é de aproximadamente 25 km, com uma profundidade média de 4 m.	56
3.19	Resolução dos níveis verticais do sistema de coordenadas S. $\theta_s = 7$ e $\theta_b = 0.1$. θ_s controla a concentração das camadas S, em superfície. θ_b controla a concentração das camadas S, no fundo.	59
3.20	Grade para realização dos experimentos numéricos.	59
3.21	Topografia da grade do modelo, em metros.	60
4.1	Distribuição horizontal de temperatura superficial (A) e para os níveis de 10 m (B), 20 m (C), 30 m (D), 50 m (E) e fundo (F), para PCE e PCM, durante a estação chuvosa.	67
4.2	Distribuição horizontal de temperatura superficial (A) e para os níveis de 10 m (B), 20 m (C), 30 m (D), 50 m (E) e fundo (F), para PCE e PCM, durante a estação chuvosa.	68

4.3	Distribuição horizontal de temperatura superficial (figura superior esquerda), à meia água (figura superior direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de chuva na PCI.	70
4.4	Distribuição horizontal da salinidade superficial (figura superior esquerda), à meia água (figura superior direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de chuva na PCI.	71
4.5	Variação diurna de temperatura, nas interfaces ZR/ZM (Superior) e ZM/ZC (inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva.	72
4.6	Variação diurna de salinidade, nas interfaces ZR/ZM (figura, superior) e ZM/ZC (figura, inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva. .	73
4.7	A - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	75
4.7	Continuação. B - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	76
4.8	A - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	77
4.8	Continuação. B - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	78
4.9	A - Distribuição vertical de densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	79
4.9	Continuação. B - Distribuição vertical de densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	80
4.10	A - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	82
4.10	B - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	83
4.11	A - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	84
4.11	B - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	85

4.12 A - Distribuição vertical de densidade convencional na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	86
4.12 B - Distribuição vertical de densidade convencional na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	87
4.13 Variação vertical de temperatura (°C) nas interfaces ZR/ZM (A) ZM/ZC (B) para a estação de chuva.	89
4.14 Variação vertical de salinidade nas interfaces ZR/ZM (A) ZM/ZC (B) para a estação de chuva.	90
4.15 Distribuição horizontal de temperatura superficial (A) e para as profundidades de 10 m (B), 20 m (C), 30 m (D), 50 m (E) e fundo (F), para PCE e PCM, durante a estação de seca.	92
4.16 Distribuição horizontal de salinidade superficial (A) e para as profundidades de 10 m (B), 20 m (C), 30 m (D), 50 m (E) e fundo (F), para PCE e PCM, durante a estação de seca.	93
4.17 Distribuição horizontal de temperatura superficial (figura superior, esquerda), à meia água (figura superior, direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de seca.	95
4.18 Distribuição horizontal de salinidade superficial (figura superior, esquerda), à meia água (figura superior, direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de seca.	96
4.19 Variação diurna de temperatura, nas interfaces ZR/ZM (figura, superior) e ZM/ZC (figura, inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de seca.	98
4.20 Variação diurna de salinidade, nas interfaces ZR/ZM (figura, superior) e ZM/ZC (figura, inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de seca. . .	99
4.21 A - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	101
4.21 Continuação. B - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	102
4.22 A - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	103

4.22	Continuação. B - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	104
4.23	A - Distribuição vertical da densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	105
4.23	Continuação. B - Distribuição vertical da densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	106
4.24	A - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	109
4.24	B - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	110
4.25	A - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	111
4.25	B - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	112
4.26	A - Distribuição vertical da densidade convencional na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).	113
4.26	B - Distribuição vertical da densidade convencional na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).	114
4.27	Variação vertical de temperatura (°C) nas interfaces ZR/ZM (A, superior) e ZM/ZC (B, inferior) para a estação de seca.	115
4.28	Variação vertical de salinidade nas interfaces ZR/ZM (A, superior) e ZM/ZC (B, inferior) para a estação de seca.	116
4.29	Diagrama T-S espalhado para a PCE, PCM e PCI durante a estação de chuva de 2009. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).	117
4.30	Diagrama T-S espalhado para o estuário do Rio Jaguaribe durante a estação de chuva de 2009, para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).	118
4.31	Diagrama T-S volumétrico para a PCE, PCM e PCI durante a estação de chuva de 2009.	119
4.32	Diagrama T-S espalhado para a PCE, PCM e PCI durante a estação seca de 2009. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).	120

4.33	Diagrama T-S espalhado para o estuário do Rio Jaguaribe durante a estação seca de 2009. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).	121
4.34	Diagrama T-S volumétrico para a PCE, PCM e PCI durante a estação seca de 2009.	122
4.35	Percentuais de massas de água na superfície (superior, esquerdo), 10 m (superior, central), 20 m (superior, direito), 30 m (inferior esquerdo), 50 m (inferior central) e no fundo (inferior direito), para a estação de chuva na PCE e PCM. . .	125
4.36	Percentuais de massas de água superficial (superior, esquerdo), à meia água (superior, direito) e fundo (inferior), durante a estação de chuva na PCI.	126
4.37	A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).	127
4.37	Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).	128
4.38	A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).	129
4.38	Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).	130
4.39	Distribuição vertical dos percentuais de massas de água para o estuário do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM, A (07:00 hs), B (12:00 hs), C (19:00 hs), e ZM/ZC, D (07:00 hs), E (12:00 hs), F (19:00 hs), para a estação de chuva. . . .	131
4.40	Percentuais de massas de água na superfície (superior, esquerdo), 10 m (superior, central), 20 m (superior, direito), 30 m (inferior, esquerdo), 50 m (inferior, central) e no fundo (inferior, direito), para a estação de seca na PCE e PCM. . .	133
4.41	Percentuais de massas de água superficial (superior, esquerdo), à meia água (superior, direito) e fundo (inferior), durante a estação de seca na PCI.	134
4.42	A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).	135

4.42	Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).	136
4.43	A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).	137
4.43	Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).	138
4.44	Distribuição vertical dos percentuais de massas de água para o estuário do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM, A (07:00 hs), B (12:00 hs), C (19:00 hs), e ZM/ZC, D (07:00 hs), E (12:00 hs), F (19:00 hs), para a estação de seca.	139
4.45	Distribuição espacial, ao longo das radiais, da temperatura média entre a maior profundidade amostrada em cada estação hidrográfica e os 10 primeiros metros acima para PCE e PCM na estação de chuva (A) e na estação de seca (B).	141
4.46	Distribuição espacial, ao longo das radiais, da salinidade média entre a superfície e 15 metros abaixo na plataforma continental e 3 metros abaixo na região da pluma. A - PC na estação de chuva. B - PC na estação de seca. C - PCI na estação de chuva. D - PCI na estação de seca.	142
4.47	Tensão de cisalhamento do vento (dyn.cm^2) obtida a partir dos dados do QuikSCAT durante a estação de chuva. A - Dia 09/06/2009. B - Dia 15/06/2009. C - 19/06/2009. D - 23/06/2009.	144
4.48	Tensão de cisalhamento do vento (dyn.cm^2) obtida a partir dos dados do QuikSCAT durante a estação de seca. A - Dia 09/10/2009. B - Dia 15/10/2009. C - 19/10/2009. D - 23/10/2009.	146

4.49	Variação total do vento nas estações de chuva (painel superior, esquerdo) e seca (painel superior, direito). Variação do vento na frequência sinótica nas estações de chuva (painel intermediário, esquerdo) e seca (painel intermediário, direito). Variação do vento na frequência diurna nas estações de chuva (painel inferior, esquerdo) e seca (painel inferior, direito). A variação de cores representa a intensidade dos ventos (m s^{-1}); a seta representa a direção (em graus) e intensidade do vento médio (m s^{-1}); a linha em preto representa a direção média das isóbatas.	148
4.50	Espectro de energia para a TCV nas estações de chuva (painel superior) e seca (painel inferior) para o ano de 2009.	149
4.50 A	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCE e PCM, para a estação de chuva de 2009, em superfície (painel superior) e meia água (painel inferior).	151
4.50 B	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCE e PCM, para a estação de chuva de 2009, no fundo.	152
4.51 A	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCI, para a estação de chuva de 2009, em superfície.	152
4.51 B	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCI, para a estação de chuva de 2009, a meia água (painel superior) e fundo (painel inferior).	153
4.52 A	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCE e PCM, para a estação de seca de 2009, em superfície.	155
4.52 B	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCE e PCM, para a estação de seca de 2009, a meia água (painel superior) e no fundo (painel inferior).	156
4.53 A	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCI, para a estação de seca de 2009, em superfície (painel superior) e a meia água (painel inferior).	157
4.53 B	- Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCI, para a estação de seca de 2009, no fundo.	158
4.54	Mapeamento horizontal da função de corrente ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e da velocidade não-divergente (m s^{-1}) para a estação de chuva de 2009. As figuras da parte superior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCE e PCM. As Figuras da parte inferior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCI.	160

4.55	Mapeamento horizontal da função de corrente ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e da velocidade não-divergente (m s^{-1}) para a estação de seca de 2009. As figuras da parte superior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCE e PCM. As Figuras da parte inferior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCI.	162
4.56	Diagrama de dispersão das correntes na PCCE, durante a estação chuvosa de 2009, em superfície (painel superior esquerdo), a meia água (painel superior direito) e fundo (painel inferior). A linha vermelha representa a direção média das isóbatas; a linha verde a direção de máxima variância dos dados. A barra de cores representa as intensidades das correntes (m s^{-1}). A seta laranja indica a direção e magnitude média da corrente.	167
4.57	Diagrama de dispersão das correntes na PCCE, durante a estação seca de 2009, em superfície (painel superior esquerdo), a meia água (painel superior direito) e fundo (painel inferior). A linha vermelha representa a direção média das isóbatas; a linha verde a direção de máxima variância dos dados. A barra de cores representa as intensidades das correntes (m s^{-1}). A seta laranja indica a direção e magnitude média da corrente.	168
4.58	Distribuição temporal da tensão de cisalhamento do vento na banda submaregráfica (primeiro painel) e dos vetores de velocidade de corrente na banda submaregráfica, em superfície (segundo painel), a meia água (terceiro painel) e no fundo (quarto painel) na estação chuvosa de 2009. Observe que a tensão de cisalhamento do vento e as correntes seguem a convenção oceanográfica (para onde vão).	170
4.59	Distribuição temporal da tensão de cisalhamento do vento na banda submaregráfica (primeiro painel) e dos vetores de velocidade de corrente na banda submaregráfica, em superfície (segundo painel), a meia água (terceiro painel) e no fundo (quarto painel) na estação seca de 2009. Observe que a tensão de cisalhamento do vento e as correntes seguem a convenção oceanográfica (para onde vão).	171
4.60	Média do vetor velocidade do vento (vermelho) e dos vetores de velocidade de corrente, em superfície (laranja), a meia água (verde) e no fundo (azul), na estação de chuva de 2009. Dados filtrados na banda submaregráfica.	173

4.61	Diagrama vetorial progressivo para a corrente filtrada, na banda submaregráfica, estação de chuva de 2009. O círculo é o início da trajetória e o (*) é o fim da mesma. Figura superior: superfície; do meio: a meia água; inferior: fundo. . . .	173
4.62	Média do vetor velocidade do vento (vermelho) e dos vetores de velocidade de corrente, em superfície (laranja), a meia água (verde) e no fundo (azul), na estação de seca de 2009. Dados filtrados na banda submaregráfica.	174
4.63	Diagrama vetorial progressivo para a corrente filtrada, na banda submaregráfica, estação de seca de 2009. O círculo é o início da trajetória e o (*) é o fim da mesma. Figura superior: superfície; do meio: a meia água; inferior: fundo. . . .	175
4.64	Correlações entre as componentes de velocidade paralelas e normais, na banda submaregráfica, para a estação de chuva, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.	176
4.65	Correlações entre as componentes de velocidade paralelas e normais à batimetria para a estação de seca, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.	177
4.66	Funções empíricas ortogonais para as correntes na banda submaregráfica, para a estação de chuva de 2009. A orientação dos vetores são relativas e não estão necessariamente ligadas à uma orientação geográfica. Quanto mais escura a seta, maior a profundidade.	178
4.67	Reconstrução da componente principal das séries de tempo das correntes e do vento, na banda submaregráfica, direção paralela às isóbatas, para as profundidades de superfície, meia água e fundo. Todas as séries são normalizadas pelos desvios padrões das médias. O nível de significância considerado foi de 95%. . .	179
4.68	Funções empíricas ortogonais para as correntes na banda submaregráfica, para a estação de seca de 2009. A orientação dos vetores são relativas e não estão necessariamente ligadas à uma orientação geográfica. Quanto mais escura a seta, maior a profundidade.	180
4.69	Reconstrução da componente principal das séries de tempo das correntes e do vento, na banda submaregráfica, direção paralela às isóbatas, para as profundidades de superfície, meia água e fundo. Todas as séries são normalizadas pelos desvios padrões das médias. O nível de significância considerado foi de 95%. . .	181

4.70	Espectros de energia das correntes nas direções paralela e normal à direção média da isobatimétrica, na banda submaregráfica, em superfície, a meia água e no fundo, na estação de chuva de 2009. Componente paralela (linha tracejada); Componente normal (linha cheia). Corrente próxima à superfície - superior direita; corrente à meia água - superior esquerda; corrente próximo ao fundo - inferior.	182
4.71	Espectros de energia das correntes e da TCV nas direções paralela e normal a direção média das isobatimétricas, em superfície, meia água e fundo, na estação de seca de 2009. <i>Along Shelf</i> é a componente paralela; <i>Cross Shelf</i> é a componente normal.	183
4.72	Série original da altura da maré (painel superior), previsão da maré (painel intermediário) e resíduo da maré (painel inferior), para o período de 13 de junho a 14 de outubro de 2009, obtidas através do uso de um marégrafo de fundo acoplado ao ADCP fundeado na PCCE. Os valores estão em m.	184
4.73	Amplitude média dos constituintes da maré para um nível de significância de 95%, no período de 13 de junho a 14 de outubro de 2009, através do uso de um marégrafo de fundo acoplado ao ADCP fundeado na PCCE. Os valores estão em m.	185
4.74	Série da corrente de maré verticalmente integrada (filtradas na banda maregráfica), resultante das observações, correntes de maré prevista e resíduo da corrente de maré (figura superior) em (m s^{-1}), amplitude média dos constituintes das correntes de maré para um nível de significância de 95% em m s^{-1} (segunda figura de cima para baixo), fase das correntes de maré em graus (terceira figura de cima para baixo) e espectro de energia para a componente de velocidade perpendicular à isobatimétrica, verticalmente integrada, em $\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{cpd}^{-1}$, para o período de chuva de 2009.	186
4.75	Série de tempo das correntes de maré em superfície (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de chuva de 2009.	187

4.76	Série de tempo das correntes de maré junto ao fundo (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de chuva de 2009.	188
4.77	Elipses das correntes de maré em superfície, na estação de chuva. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.	190
4.78	Elipses das correntes de maré próximas ao fundo, na estação de chuva. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.	191
4.79	Série da corrente de maré verticalmente integrada (filtradas na banda maregráfica), resultante das observações, correntes de maré prevista e resíduo da corrente de maré (figura superior) em (m s^{-1}), amplitude média dos constituintes das correntes de maré para um nível de significância de 95% em m s^{-1} (segunda figura de cima para baixo), fase das correntes de maré em graus (terceira figura de cima para baixo) e espectro de energia para a componente de velocidade perpendicular à isobatimétrica, verticalmente integrada, em $\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{cpd}^{-1}$, para o período de seca de 2009.	193
4.80	Série de tempo das correntes de maré em superfície (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de seca de 2009.	194
4.81	Série de tempo das correntes de maré junto ao fundo (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de seca de 2009.	195
4.82	Elipses das correntes de maré em superfície, na estação de seca. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.	197
4.83	Elipses das correntes de maré próximos ao fundo, na estação de seca. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.	198
4.84	Perfis de velocidade longitudinais ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de chuva de 2009.	201

4.85	Perfil médios de velocidade estacionária ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de chuva de 2009. u_a é o valor médio estacionário da componente longitudinal da velocidade; $\langle u(Z) \rangle$ é o perfil médio temporal na profundidade adimensionalizada.	202
4.86	Perfis de velocidade longitudinais ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de seca de 2009.	203
4.87	Perfil médios de velocidade estacionária ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de seca de 2009. u_a é o valor médio estacionário da componente longitudinal da velocidade; $\langle u(Z) \rangle$ é o perfil médio temporal na profundidade adimensionalizada	205
4.88	Correlações entre as componentes de velocidade das correntes, na banda submaregráfica, e tensão de cisalhamento do vento na estação de chuva, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%. A Figura superior indica a correlação entre a TCV e correntes na direção paralela. A Figura inferior indica a correlação entre a TCV e correntes na direção perpendicular.	206
4.89	Correlações entre as componentes u e v do vetor velocidade e tensão de cisalhamento do vento paralelas e normais à batimetria para a estação de chuva, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.	207
4.90	Correlações entre as componentes de velocidade e tensão de cisalhamento do vento paralelas e normais à batimetria para a estação de seca, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.	209
4.91	Correlações cruzadas entre as componentes u e v do vetor velocidade e tensão de cisalhamento do vento paralelas e normais à batimetria para a estação de seca, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.	210

4.92	Espectro de coerência ao quadrado e fase entre as componentes paralelas da TCV e das correntes, em superfície (superior), a meia água (intermediário) e fundo (inferior), na estação de chuva de 2009.	211
4.93	Coerência ao quadrado e fase da TCV com as correntes na direção paralela a direção média das isobatimétricas, em superfície, meia água e fundo, na estação de seca de 2009. <i>Along Shelf</i> é a componente paralela.	212
4.94	Variação da energia cinética média por unidade de massa ao longo de 30 dias de experimento, para as estações de chuva (linha cheia) e seca (linha tracejada).	213
4.113A	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 3$ hs.	215
4.113B	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 6$ hs.	216
4.113C	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 12$ hs.	217
4.113D	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 24$ hs.	218
4.113E	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 48$ hs.	219
4.113F	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 168$ hs.	220
4.114	Evolução temporal da altura do nível do mar (η) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de chuva. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).	221
4.115	Evolução temporal da componente da velocidade normal à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de chuva. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).	222

4.116	Evolução temporal da componente da velocidade paralela à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de chuva. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).	223
4.117A	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 3$ hs.	225
4.117B	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 6$ hs.	226
4.117C	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 12$ hs.	227
4.117D	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 24$ hs.	228
4.117E	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 48$ hs.	229
4.117F	- Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 168$ hs.	230
4.118	Evolução temporal da altura do nível do mar (η) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de seca. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).	231
4.119	Evolução temporal da componente da velocidade normal à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de seca. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).	232

4.120	Evolução temporal da componente da velocidade paralela à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de seca. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).	233
4.121	Amplitude (m) representadas pelas cores, e fase em Greenwich (graus), representadas pelas isolinhas, das componentes semi-diurna da maré. a - M_2 esquerda; b - S_2 direita.	235
4.122	Amplitude (m) representadas pelas cores, e fase em Greenwich (graus), representadas pelas isolinhas, das componentes diurna da maré. a - K_1 esquerda; b - O_1 direita.	236
4.123	Elipses da corrente de maré para a PCCE. a - M_2 esquerda; b - S_2 direita.	237
4.124	Elipses da corrente de maré para a PCCE. a - O_1 esquerda; b - K_1 direita.	238
4.125	Variação das vazões no sistema estuarino do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM (cinza escuro) e ZM/ZC (cinza claro), durante a estação de chuva de 2009. . . .	239
4.126	Variação das vazões no sistema estuarino do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM (cinza escuro) e ZM/ZC (cinza claro), durante a estação de seca de 2009.	240
4.127	Balanco líquido das vazões ($m^3 s^{-1}$) nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC no estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva e seca de 2009. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m. Os números são as vazões medidas.	241
4.128	Prisma de maré nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC no estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva e seca de 2009. Prisma de maré (m^3) e as taxas de descarga (FT) em horas. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m. Os valores numéricos se referem ao volume de água, e os números associados a FT, se referem a taxa de descarga. .	243
4.129	Variação temporal da velocidade [$\bar{u}(t)$] média na coluna de água (linha pontilhada) e da profundidade [$h(t)$] (linha cheia). Os dois painéis superiores referem-se às interfaces ZR/ZM (superior esquerdo) e ZM/ZC (superior direito) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se às interfaces ZR/ZM (inferior esquerdo) e ZM/ZC (inferior direito) na estação de seca.	244

4.130	Variação temporal da salinidade $[S(t)]$ média na coluna de água (linha pontilhada) e da profundidade $[h(t)]$ (linha cheia). Os dois painéis superiores referem-se as interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se as interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de seca.	245
4.131	Variação temporal da salinidade de natureza barotrópica $[S(t)]$ média na coluna de água e da profundidade $[h(t)]$. Os dois painéis superiores referem-se as interfaces ZR/ZM (superior esquerda) e ZM/ZC (superior direita) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se as interfaces ZR/ZM (inferior esquerda) e ZM/ZC (inferior direita) na estação de seca.	246
4.132	Classificação do estuário do Rio Jaguaribe para o ano de 2009. Stratification parameter é o parâmetro de estratificação e circulation parameter é o parâmetro de circulação.	247
4.133	Variação temporal do número de Richardson por camada. As linhas tracejadas delimitam: $Ri_L > 20$ mostra uma condição de alta estabilidade (linha superior); $2 < Ri_L < 20$ as condições são de fraca estabilidade vertical; e $Ri_L < 2$ mostram uma instabilidade vertical (linha inferior). Os dois painéis superiores referem-se as interfaces ZR/ZM (superior esquerdo) e ZM/ZC (superior direito) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se as interfaces ZR/ZM (inferior esquerdo) e ZM/ZC (inferior direito) na estação de seca. . . .	249
4.134	Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correntes de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); corrente residual (6) e correlação tríplice (7). Os histogramas (9) e (10) correspondem ao cálculo do transporte resultante da equação 3.38 e a soma de suas componentes. Os dois painéis superiores referem-se às interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se às interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de seca.	250
4.135	Transporte do material particulado em suspensão (MPS), em $mg\ l^{-1}$, no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante a estação de chuva de 2009. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''\ W / 4^{\circ}32'20''\ S$) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''\ W / 4^{\circ}27'00''\ S$).	253

4.136	Transporte do material particulado em suspensão (MPS), em mg l^{-1} , no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante evento de maré vazante, para a estação de seca de 2009. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''$ W / $4^{\circ}32'20''$ S) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''$ W / $4^{\circ}27'00''$ S).	254
4.137	Transporte do material particulado em suspensão (MPS), em mg l^{-1} , no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante evento de maré vazante, para a estação de seca de 2009. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''$ W / $4^{\circ}32'20''$ S) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''$ W / $4^{\circ}27'00''$ S).	255
4.138	Balanço das concentrações de MPS (mg l^{-1}) no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante as estações de chuva e seca de 2009. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m. Os valores numéricos se referem as concentrações de MPS, os valores entre parênteses são as médias dessas concentrações.	256
4.139	Descargas de MPS (ton ano^{-1}) no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante as estações de chuva e seca de 2009. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m.	257
4.140	Variação morfológica de fundo do estuário do Rio Jaguaribe entre os anos de 2004 (à esquerda) e 2009 (à direita), períodos de grandes descargas fluviais para o sistema estuarino do Rio Jaguaribe. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''$ W / $4^{\circ}32'20''$ S) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''$ W / $4^{\circ}27'00''$ S). Os valores numéricos referen-se as descargas de MPS, e os valores entre parênteses são os valores médios.	258
5.1	Mapa de velocidade de correntes observadas para o nível de 100 m, ao longo da isóbata de 1000 m. Podemos notar a presença do Vórtice de Macau, localizado entre Fortaleza e Natal. Figura gentilmente cedida por Marin (2009).	261
5.2	Representação esquemática das regiões da Plataforma Continental Leste do Ceará durante a estação de chuva (superior) e seca (inferior). FHS significa frente halina superficial; FTF significa frente térmica de fundo; PCI, PCM e PCE as regiões interna, média e externa da plataforma continental, respectivamente. As profundidades estão expressas em m e as distâncias horizontais em km.	265

5.3	Comparação entre as correntes de maré observada e modelada, durante 10 dias do mês de junho, para a posição 4° 5' S e 37° 35' W, na profundidade aproximada de 30 m.	274
-----	--	-----

Lista de Tabelas

3.1	Datas da realização dos cruzeiros oceanográficos na plataforma continental leste do estado do Ceará e estuário do rio Jaguaribe. PC é a plataforma continental; ZR é a zona de maré do rio; ZM é a zona de mistura estuarina e ZC é a zona costeira.	22
3.2	Áreas representativas de cada estação hidrográfica.	37
4.1	Índices termohalinos utilizados nos cálculos dos percentuais de massa de água na plataforma continental e estuário do Rio Jaguaribe.	123
4.2	Primeiros momentos estatísticos para a variação temporal do campo de vento, para as estações de chuva e seca de 2009. Min é o valor mínimo e Max o valor máximo.	147
4.3	Primeiros momentos estatísticos para a distribuição horizontal do campo de correntes na PCE , PCM e PCI na estação de chuva. <i>u</i> e <i>v</i> , referem-se às componentes normal e paralela à batimetria local, respectivamente. Prof é a profundidade; Min é o valor mínimo e Max o valor máximo, ambas em m s^{-1} . Amp e Var são as amplitudes (s^{-1}) e a variância ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão a média (m s^{-1}).	154
4.4	Primeiros momentos estatísticos para a distribuição horizontal do campo de correntes na PCE , PCM e PCI na estação de seca. <i>u</i> e <i>v</i> , referem-se às componentes normal e paralela à batimetria local, respectivamente. Prof é a profundidade; Min é o valor mínimo e Max o valor máximo, ambas em m s^{-1} . Amp e Var são as amplitudes (s^{-1}) e a variância ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão a média (m s^{-1}).	159

4.5	Primeiros momentos estatísticos para as séries correntográficas, total, submaregráfica e maregráfica na estação de chuva. U e V, referem-se às componentes normal e paralela à batimetrias local, respectivamente. $\mathbf{u}_t$ e $\mathbf{v}_t$ referem-se as variações totais, $\mathbf{u}_s$ e $\mathbf{v}_s$ à variabilidade submaregráfica e $\mathbf{u}_m$ e $\mathbf{v}_m$ à variabilidade maregráfica. Prof é a profundidade; Min é o valor mínimo e Max o valor máximo em m s^{-1} . Amp e Var são as amplitudes (m s^{-1}) e a variância ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão da média em m s^{-1}	163
4.6	Primeiros momentos estatísticos para as séries correntográficas, total, submaregráfica e maregráfica na estação de seca. U e V, referem-se às componentes normal e paralela à batimetrias local, respectivamente. $\mathbf{u}_t$ e $\mathbf{v}_t$ referem-se as variações totais, $\mathbf{u}_s$ e $\mathbf{v}_s$ à variabilidade submaregráfica e $\mathbf{u}_m$ e $\mathbf{v}_m$ à variabilidade maregráfica. Prof é a profundidade; Min é o valor mínimo e Max o valor máximo em m s^{-1} . Amp e Var são as amplitudes (m s^{-1}) e a variância ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão da média em m s^{-1}	166
4.7	Constituintes harmônicas para as correntes de maré, para o período de chuva, com um nível de confiança de 95%. E. Maior é o eixo maior da elipse; E. Menor é o eixo menor da elipse; E é a elipsidade, que é a razão entre E. Menor/E. Maior; Fase em graus em relação ao meridiano de Greenwich, e SNR é a amplitude (m s^{-1}).	192
4.8	Constituintes harmônicas para as correntes de maré, para o período de seca, com um nível de confiança de 95%. E. Maior é o eixo maior da elipse; E. Menor é o eixo menor da elipse; E é a elipsidade, que é a razão entre E. Menor/E. Maior; Fase em graus em relação ao meridiano de Greenwich, e SNR é a amplitude (m s^{-1}).	199
5.1	Valores médios do campo de corrente observada e modelada (m s^{-1}) para a PCCE.	271
5.2	Amplitudes (m) e fase em Greenwich ($^{\circ}$) observada e modelada, durante as estações de chuva e seca de 2009.	273

Capítulo 1

Introdução

1.1 Plataforma Continental do Ceará.

A plataforma continental brasileira estende-se por mais de 8000 km de costa, possuindo largura máxima de 300 km na região amazônica e mínima de 10 km na latitude de 13° S. A quebra da plataforma dá-se em profundidade mínima de 40 m e máxima de 180 m (Zembruski, 1979). Em geral, a Plataforma Continental Nordeste (PCNE) apresenta largura entre 40 e 50 km ao largo de Salvador, e de 75 a 80 km ao largo de Fortaleza. As profundidades são, geralmente, inferiores a 50 m, enquanto que na borda da plataforma a profundidade chega a 70 m, atingindo rapidamente 2000 m na base do talude continental (Silva e Alvarenga, 1994).

A Plataforma Continental do Ceará (PCCE) localiza-se na Margem Equatorial Atlântica, comumente chamada de Costa Semi-Árida, entre 37° e 41° 20' de longitude oeste e 2° e 5° de latitude sul, no Estado do Ceará (Figura 1.1) com profundidades variando entre 10 e 100 m. A declividade média fica em torno de 2m/km e, o relevo é caracterizado pela presença de fundos relativamente planos, alternada com partes onduladas e feições irregulares de recifes de algas.

Características da PCCE são: largura reduzida, pequena profundidade e formas de relevo de influência tectônica e vulcânica, refletindo as condições climáticas e geológicas da área emersa adjacente. Associada à fraca contribuição terrígena e aliada ao clima tropical, observa-se na plataforma média e externa importante sedimentação de carbonatos biogênicos.

Figura 1.1: Plataforma Continental do Estado do Ceará. Batimetria em metros.

A constância dos ventos alísios de sudeste associada ao clima semi-árido cujas drenagens são pouco expressivas e, a aproximação da Corrente Norte do Brasil (CNB), deram forma ao litoral da PCCE. Na Figura 1.2 observam-se algumas elevações no assoalho oceânico, já descritas anteriormente por Silva e Alvarenga (1994): a altura 39° W e $2^{\circ} - 2^{\circ} 30' S$, o talude é interrompido pelo terraço do Ceará. Observam-se ainda várias elevações crustais entre $2^{\circ} 50'$ e $4^{\circ} 30' S$, normalmente associadas ao vulcanismo ocorrido na região (Zembruski, 1979).

O padrão de circulação em meso-escala, observado por (Marin, 2009) ao largo da PCCE durante a Operação Nordeste II, mostra a formação de uma estrutura anti-ciclônica frontal (Figura 1.3), que muito provavelmente é uma resposta da corrente de limite oeste à mudança abrupta na orientação da costa. O autor chama essa estrutura de Vórtice de Macau (V.M).

Figura 1.2: Características batimétricas da PCCE. Batimetria em metros.

Figura 1.3: Vórtice de Macau ao largo da PCCE. Cortesia de Marin (2009).

1.2 Estuário do Rio Jaguaribe.

O estuário do rio Jaguaribe (CE) (Figura 1.4) tem seu limite inferior no município de Fortim e o limite superior no município de Itaiçaba. A partir da capital do estado, Fortaleza, tem-se uma distância aproximada de 160 km, em relação ao município de Aracati, maior cidade da região.

Figura 1.4: Estuário do Rio Jaguaribe (CE).

Dias (2005) e Dias et al. (2005) classificaram o estuário em três regiões, utilizando os parâmetros de circulação, estratificação e quantidade de material em suspensão de acordo com Miranda et al. (2002) em: Zona de Maré do Rio (ZR), Zona de Mistura Estuarina (ZM) e a terceira região foi, classificada como Zona Costeira (ZC).

A rede hidrográfica da bacia de drenagem do rio Jaguaribe (Figura 1.5) é o reflexo direto da sazonalidade climática da região. Os rios e riachos, secundários à bacia, são intermitentes, fluindo somente durante o período chuvoso. O nível máximo das águas é atingido nos meses de fevereiro a abril, coincidindo com o período de maior pluviosidade para a região (Verissimo et al., 1996). O eixo da bacia do rio Jaguaribe apresenta direção geral SW-NE, sendo a mais extensa e importante da região, ocupando cerca de 47% do estado do Ceará, onde recebe numerosos afluentes vindos do sul e do oeste, constituindo assim um extenso conjunto fluvial (SRH, 1991).

Figura 1.5: Área de influência da bacia de drenagem do rio Jaguaribe (CE).

O rio Jaguaribe foi perenizado com as águas do Açude Orós e, mais recentemente, com a construção do Reservatório do Castanhão, minimizando os problemas causados pelo regime irregular das chuvas para o estado. Com o prolongamento do período de estiagem na década de noventa, o governo do estado adotou como medida mitigadora a construção de um canal, iniciado na cidade de Itaiçaba (Figura 1.4), que normalizaria o abastecimento de água potável na capital, Fortaleza e Região Metropolitana, que tinha uma demanda muito grande para pouca disponibilidade deste bem mineral à época.

Devido ao padrão detrítico da drenagem (Figura 1.5) e à intermitência da maio-

ria dos afluentes e tributários associado ao padrão sazonal observado para a região, período de seca e chuva bem definidos, a região estuarina do rio Jaguaribe é a que reporta todas as condições impostas à bacia de drenagem, formando nesta área um verdadeiro mosaico das condições ambientais e do registro das atividades desenvolvidas em toda a bacia de drenagem.

Devido a um menor aporte fluvial e consequente intensificação na penetração da onda de maré, associado a um menor aporte de sedimentos oriundos da bacia de drenagem para o canal estuarino, a morfologia de fundo (Figura 1.6) da região da desembocadura do estuário tem mudado constantemente. As profundidades não ultrapassam 4 e 5 m nas margens esquerda e direita, respectivamente (Bezerra et al., 2011).

Analizando a série histórica das vazões calculadas para a bacia do Jaguaribe cedidas pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2006) é possível observar claramente redução dos valores. Inicialmente, observa-se que o período compreendido entre os anos de 1978 a 1989 apresentou vazão máxima na ordem de $2250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para o ano de 1985 (Figura 1.7).

Após este primeiro período, observa-se que entre os anos de 1990 a 2006 as vazões foram consideravelmente menores, com média de $24,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e picos na ordem de $251,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, referentes ao ano de 1996. Estes resultados demonstram que para o período compreendido entre 1990 e 2006 os valores máximos de vazões, no qual a bacia do Jaguaribe exportou para o sistema estuarino foram aproximadamente 10 vezes menores quando comparados aos valores máximos obtidos para os anos compreendidos entre 1978 e 1989.

A mudança ocorrida nas vazões hídricas do rio Jaguaribe nos últimos 20 anos (1987-2007) deu-se devida à crescente demanda por água para abastecimento das populações ribeirinhas. Para aumentar a disponibilidade hídrica foram construídos vários açudes (reservatórios) de pequeno, médio e grande porte ao longo de toda a bacia de drenagem do Jaguaribe (SRH, 1991). Uma das consequências diretas ocasionadas pelo efeito crescente da açudagem em toda a bacia de drenagem do rio Jaguaribe foi a normalização e a redução da média das descargas fluviais para o sistema estuarino, alterando diretamente os múltiplos usos da água e, provavelmente, os ecossistemas locais.

Figura 1.6: Morfologia de fundo para o estuário do estuário do Rio Jaguaribe (CE), para o ano de 2004.

Figura 1.7: Vazões medidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) para a bacia de drenagem do Rio Jaguaribe.

As descargas fluviais históricas, oriundas da bacia de drenagem do rio Jaguaribe para o sistema estuarino (ANA, 2006) não fundamentaram as estimativas das descargas modeladas por Campos et al. (2000) e Krol et al. (2006), onde relatam que as vazões totais podem variar entre 0 e $7000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, em um intervalo de poucos meses.

Dias (2007) verificou que, as vazões hídricas totais observadas entre setembro de 2005 e junho de 2006 mostraram domínio das vazões de enchente nos meses de setembro de 2005 e fevereiro de 2006, quando provavelmente ocorreu efeito dissipativo da onda de maré nas planícies de inundação do rio Jaguaribe, também observado nas flutuações das marés atuantes na região. Em junho de 2006 o autor observou domínio das vazões de vazante. Ainda em seu estudo Dias (2007) observou que, o volume de água total variou de acordo com o tipo de maré e que o volume de água doce no sistema chegou a 95% do volume total, caracterizando o domínio fluvial neste período. No período de seca, o volume de água total foi 44% maior que o volume observado para o mês de fevereiro de 2006, sendo este fato relacionado à maré de sizígia observada em setembro. Entretanto, o volume de água doce nos dois períodos foram praticamente iguais, variando entre 11,7% e 14,7% para setembro e fevereiro, respectivamente. O tempo de descarga (*Flushing Time*), foi de 2 horas no período de seca e de 12 horas no período de chuva.

1.3 Regime de Chuvas e Ventos.

A Região Costeira do Ceará apresenta acentuadas variações sazonais em seus fatores climáticos, caracterizadas, principalmente, pelos regimes de chuvas e seca que são dominadas por ventos alísios de leste que determinam dois períodos ou “estações” marcantes ao longo do ano (Campos, 2003).

O clima semi-árido é característico para todo o nordeste brasileiro, marcado por intensa sazonalidade que compreende dois períodos bem definidos: um chuvoso que vai de dezembro a maio, podendo se prolongar até meados de julho e tendo o mês de abril as maiores precipitações (balanço hídrico positivo), e outro de estiagem (seca, balanço hídrico negativo) variando entre os meses de junho a novembro, onde setembro para o sertão nordestino é o mês com menor índice pluviométrico, como observado na Figura

1.8.

Figura 1.8: Precipitações médias históricas para a região do baixo Jaguaribe. Observa-se de janeiro a junho a estação chuvosa, com o máximo pluviométrico em Abril. No segundo semestre tem-se a estação seca, onde setembro é o mês mais seco.

Outra característica do clima regional é a diferença da pluviosidade da zona litorânea e a registrada a pouco mais de 30 km, adentrando ao continente, a partir da foz do rio Jaguaribe. Observa-se, por exemplo, que em Fortim tem-se uma precipitação anual em torno de 1500 mm; em Aracati, ao longo das décadas, choveu em média 900 mm por ano, enquanto que em Itaiçaba esta precipitação caiu para 730 mm em média, caracterizando assim um clima semi-árido (Verissimo et al., 1996).

A marcha sazonal das chuvas é controlada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que no período do verão austral apresenta ventos alísios NE (Figura 1.9 A), que trazem massas de ar ocasionando as chuvas no nordeste brasileiro, (popularmente conhecida como *Inverno*), correspondendo ao período entre os meses de dezembro e maio. Para o segundo semestre do ano a ZCIT enfraquece, associada aos ventos alísios SE (Figura 1.9 B) geram o período de estiagem popularmente conhecido como verão (Funceme, 2010).

Figura 1.9: Variação sazonal da tensão de cisalhamento do vento para os meses de Junho (A) e Outubro (B) de 2009.

Existe uma periodicidade média de 30 anos entre eventos de grandes deflúvios, segundo modelos de variações climáticas do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) (Nobre, 2003). Em estudo realizado no estuário do rio Jaguaribe, Dias et al. (2005) observaram um evento desta magnitude, com nível médio das águas do rio superior a três vezes o volume observado em anos com precipitações normais, e com volume de chuvas nos primeiros meses do ano chegando a ordem de duas vezes os valores médios históricos observados.

O regime térmico da região é caracterizado por temperaturas pouco amenas, com valores médios superiores a 26 °C. Segundo dados da Funceme (2004) para as regiões litorâneas e pré-litorâneas no mês de julho, são registradas as menores médias anuais, que atingem 26,1 °C. No bimestre novembro-dezembro, as temperaturas médias giram em torno de 27,4 °C, que demonstra a pouca amplitude térmica da região (Verissimo et al., 1996; Campos, 2003). Os meses de junho, julho e agosto apresentam menores temperaturas, enquanto que as maiores ocorrem nos meses de outubro/fevereiro. A temperatura estável, aliada à baixa amplitude térmica, provoca na região elevadas taxas de evapotranspiração e, conseqüentemente, aumento da perda de culturas (Maia, 1993; Campos, 2003).

Silva et al. (2010) em uma análise de dados de vento para Fortaleza, entre os anos de 2003 a 2009, observaram que as médias mensais para os meses de janeiro a junho ficaram entre 3 e 4 m s⁻¹, enquanto que nos meses do segundo semestre a média variou entre 4,6 e 5,5 m s⁻¹. Os autores ressaltam que a velocidade média mensal horária do vento à superfície para os anos de 2003 a 2009 evidencia o ciclo diário do vento, com valores maiores no período diurno e menores no período noturno e início da manhã.

Teixeira (2008) também identifica a presença do ciclo diário na precipitação, associado ao sistema de brisas e sistemas de grande escala, influenciando no aumento da frequência de eventos de chuva entre a madrugada e o início da manhã, e diminuição no período da tarde, em qualquer época do ano.

1.4 Processos Físicos na Plataforma Continental do Ceará e no Estuário do Rio Jaguaribe.

As correntes sobre a plataforma continental e as oscilações do nível do mar associadas a elas são manifestações da resposta das águas a diferentes forçantes. Em geral, estas forçantes atuam diretamente na plataforma continental, como os ventos e as variações espaciais de densidade, ou se comunicam desde o talude através da quebra da plataforma, tais como: marés e gradientes de pressão.

As escalas espaço-temporais dos movimentos que atuam na plataforma continental variam de microscópicas a centenas de quilômetros e de segundos até anos, respectivamente. Os processos com escala temporal que variam de semidiurna (12h) a sazonal (um ano) têm importância fundamental nos processos que controlam o aporte e o transporte de materiais, e de substâncias dissolvidas e particuladas, de fontes naturais e antrópicas por toda a plataforma continental (Castro et al., 2006).

A Plataforma Continental Nordeste (PCNE) do Brasil, é caracterizada pela presença de areias quartzíticas facilmente observadas por imagens de satélites até 40 m de profundidade (Vianna et al., 1991; Vianna et al., 1993; Santos, 1999) e por ser uma plataforma de pequenas profundidades, com valores que variam em 50 m entre 50-100 km de distância da costa.

Nas últimas décadas, a região oceânica equatorial vem sendo alvo de diversos estudos internacionais, no âmbito da oceanografia e meteorologia, devido à sua importância no clima, transporte e circulação de propriedades. Na década de 60, pesquisas realizadas pelos projetos EQUALANT I e GATE (Leudmann, 1967; Metcalf e Stalcup, 1967; Metcalf, 1968; Leudmann e Pereira, 1976; Cochrane, 1983) estudaram a circulação e o padrão das correntes na região nordeste. Os autores observaram a presença de uma corrente fluindo para NW, com velocidades que variaram entre 23 e 35 cm s^{-1} .

A circulação de larga escala na região ao largo da Plataforma Continental do Nordeste Brasileiro é caracterizada pela presença da CNB, transportando em superfície Água Tropical (AT), e nas camadas mais abaixo Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e Água Intermediária Antártica (AIA), apresentando velocidades médias que variam en-

tre 50 e 80 cm s⁻¹ (Silveira, 1990). O autor também observou que, as correntes de deriva de Ekman e os transportes de volume e calor, associados à tensão de cisalhamento do vento (TCV) apresentaram padrão sazonal intimamente relacionado à dinâmica da ZCIT. O autor enfatiza, ainda, que o transporte de Ekman de -13,7 Sv no sentido sul é compensado pelo transporte da CNB 12-13 Sv no sentido norte.

Signorini e Miranda (1983) analisaram as correntes medidas em fundeio ao largo de Fortaleza (03° 06' S, 38° 49,5' W) na isóbata de 40 m, em três níveis distintos (8, 16 e 36 m da superfície) por um período de 36 dias. Neste estudo, os autores analisaram as correntes nas frequências submaregráfica e maregráfica com o intuito de entender o comportamento da circulação na região gerada pelo vento e por maré. O padrão de ventos para o período do fundeio apresentou maior variância no período diurno, refletindo a presença de brisas diurnas com amplitudes de 2-3 m s⁻¹. No entanto, os autores ressaltaram que mesmo em latitudes em que o período inercial é menor que o período diurno, as brisas diurnas não têm efeito significativo em correntes costeiras geradas pelo vento. Ainda em seu estudo, observaram que as velocidades decompostas na direção normal as isóbatas variaram na banda maregráfica e que no período de 26 a 31 de março de 1983 houveram os maiores picos de velocidade (0,3-0,4 m s⁻¹), correspondendo ao período de maré de sizígia. A corrente costeira paralela às isóbatas variou de 0,16 m s⁻¹ na superfície a 0,15 m s⁻¹ em meia água. Próximo ao fundo, as velocidades decaíram a 0,06 m s⁻¹. Ainda em seu estudo, Signorini e Miranda (1983) mostram que existe mais energia cinética média sendo transferida ao fluído do que a perturbação de energia cinética.

As variações do nível do mar causadas pelas marés, representam a resposta do oceano às forçantes gravitacionais astronômicas e, a essas variações, se sobrepõem aquelas forçadas pelas componentes locais ou remotas do vento. Em regiões em que a PC tem largura média, como ao largo do Rio Jaguaribe (CE), as oscilações do nível do mar e as correntes na banda maregráfica podem apresentar-se como co-oscilações do oceano profundo. Isto é, a maior parte da energia fica com as ondas excitadas na região costeira pelas oscilações globais de oceano profundo, sendo a comunicação estabelecida através do talude e da quebra da PC (Castro, 1996). Assim como observado no restante da PC brasileira, a constituinte M2 da maré na PCCE é a dominante

nas oscilações maregráficas do nível do mar, seguida pelas constituintes S2, K1 e O1. Segundo Castro (1996) as amplitudes são máximas (0,9 m) na região do talude norte-nordeste do Brasil (Figura 1.10), diminuindo em direção ao sul. Podemos observar na Figura 1.11 que a onda de M2 se propaga de leste para oeste na plataforma continental nordeste e norte.

Uma característica marcante da dinâmica que controla as regiões costeiras é a resposta de suas águas a ventos superficiais com escalas temporais sazonal e sinóticas. Dependendo da relação entre a topografia e a largura da região, a intensidade, direção e a persistência da tensão de cisalhamento do vento, as correntes geradas por estas forçantes podem ser mais ou menos energéticas. Em geral, na PC este tipo de corrente ocorre paralelamente às isóbatas, mantendo o balanço geostrófico na direção normal à costa (Castro, 1996).

Quanto ao regime de ventos, a PCNE pode ser caracterizada, climatologicamente, por um regime de vento de leste os alísios. A intensidade desses ventos aumenta do verão para o inverno e a direção do vento médio é de 110° (Riehl, 1965). Podem ocorrer variações sazonais devido à interação entre o fluxo médio e o sistema de ventos locais (Kousky, 1980). Na escala de tempo sinótica, a variação do vento na PC do Ceará pode estar associada à penetração de frentes frias, como observado por Kousky (1979). O autor observou, ainda, a existência de uma significativa mudança temporal na direção dos ventos, passando de leste para sul, sendo esta constatação utilizada como indicadora da penetração de sistemas frontais na região.

Buscando uma melhor compreensão destes processos, em um estudo realizado na PCCE, Soares e Castro (1996) utilizaram um modelo numérico para estudar a resposta das águas da PC à forçante do vento estacionária e transiente. Neste estudo, os autores observaram que a tensão de cisalhamento do vento desempenhava um papel importante na circulação da PC. Adicionalmente, o cenário experimental gerado pelo modelo numérico mostra que as elevações e correntes tendem a ser mais intensas nas proximidades da costa, decaindo exponencialmente ao se distanciar desta, de acordo com a trajetória do jato costeiro (Csanady, 1982).

Figura 1.10: Amplitude, em cm, da constituinte M2 da maré mapeada por Castro (1996) a partir de dados de altimetria de satélite.

Figura 1.11: Fase em relação a Greenwich, em graus, da constituinte M2 da maré mapeada por Castro (1996) a partir de dados de altimetria de satélite

Um dos maiores levantamentos realizados na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) brasileira foi o projeto REVIZEE, que tinha como um de seus objetivos estudar as condições ambientais que provocavam variações espaciais e sazonais dos estoques pesqueiros como um todo. No levantamento realizado no nordeste foi observado na PC que a distribuição vertical das temperaturas nos primeiros 50 metros de profundidade era praticamente homogênea, com exceção da porção nordeste da PC, na qual a estrutura térmica vertical diminui nos primeiros 50 metros de profundidade, com mínimo de 25 °C, no inverno e na primavera, indicando uma diminuição da profundidade da camada de mistura. Para profundidades da ordem de 100 m, as isolinhas de temperatura apresentaram distribuição quase meridional, com valores decrescendo de oeste para leste. Devido à variação sazonal, observam-se valores crescentes a partir do outono, com máximo na primavera, decrescendo a partir de então, com mínimo no outono (mínimo de 16 °C) (Silva e Alvarenga, 1994).

A distribuição vertical da salinidade na região apresenta pouca variação sazonal, com ligeiro aumento na primavera (máximo de 36.2), decrescendo a partir dos 100 m de profundidade. Na região sul da PCNE, a salinidade aumenta de norte para sul apresentando pouca variação sazonal e, aumentando gradativamente até 100 m de profundidade (máximo de 37) (Silva e Alvarenga (1994)).

O estuário do rio Jaguaribe, localizado no estado do Ceará, vem sendo alvo nos últimos anos de diversos estudos multidisciplinares, que buscam a criação de cenários que expliquem ou auxiliem na compreensão da dinâmica deste importante ecossistema costeiro do estado do Ceará. Em alguns destes estudos, (Lacerda e Marins, 2002; Marins et al., 2003; Marins e Dias, 2003; Dias, 2005; Dias et al., 2005; Marins e Lacerda, 2007; Dias et al., 2007; Dias et al., 2008; Dias et al., 2009), observaram que nos anos em que o volume de chuvas para região foi superior à média histórica, o volume de água do rio chegou a ser de duas a três vezes maior que o volume médio observado em anos de precipitações pluviométricas normais (onde 85% do volume de água total é considerada doce), com vazões superiores a $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Suas águas são caracterizadas por temperaturas elevadas, acompanhadas de baixas salinidades, com valores de pH variando entre 6-8, que caracterizam águas naturais. Nestes eventos extremos, de grande pluviosidade, a concentração de material particulado em suspensão (MPS)

pode chegar a 608 mg l^{-1} e a descarga deste material pode chegar a 389 kg s^{-1} , associado a uma taxa de descarga (TD) de 12 horas.

Em um outro cenário avaliado por (Marins e Dias, 2003; Dias, 2005; Dias et al., 2005; Dias et al., 2007; Dias et al., 2008), os autores mostram que em anos cuja oscilação pluviométrica fica dentro da média regional, o sistema estuarino no período de maior aporte fluvial foi caracterizado com 95% de água doce, do volume hídrico total, associado a águas de baixas salinidades (1,2 a 1,8) prismas de maré negativos e elevadas TD, que atingem 12 horas. As vazões hídricas totais chegam a $183 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ocorrendo um aumento das descargas de MPS oriundos da bacia de drenagem para o sistema estuarino ($2,5 \times 10^5 \text{ ton ano}^{-1}$). Os autores reportam ainda que, os valores encontrados são cerca de 10 vezes superiores ao valor de $26.000 \text{ ton ano}^{-1}$ encontrados por Cavalcante (2000) e, abaixo das $497.000 \text{ ton ano}^{-1}$, para o período de chuvas do Rio São Francisco (Medeiros et al., 2007).

Dias et al. (2011) realizaram um estudo comparativo entre dois importantes rios do nordeste brasileiro, o rio Jaguaribe e o rio de Contas, para comparar medidas de vazão obtidas *in situ* e de estações fluviométricas localizadas nas bacias de drenagem dos mesmos. Os autores concluíram que, o rio de Contas possui seu fluxo fluvial barrado para geração de energia elétrica, as medidas de vazão *in situ* e as vazões provindas de estações fluviométricas se equivalem. Entretanto, no caso do rio Jaguaribe onde, o fluxo fluvial é barrado para o aumento da disponibilidade hídrica regional, os valores das vazões disponibilizados pelas estações fluviométricas chegam a ser 80% menores quando comparados com as vazões *in situ*.

Capítulo 2

Hipóteses e Objetivos

Nos meses de balanço hídrico positivo, observa-se um grande transporte de volume no estuário do rio Jaguaribe (CE), quando os processos de mistura mais intensos são advectados para fora dos limites físicos do estuário, formando extensa pluma estuarina na Plataforma Continental Interna (PCI), promovendo mistura das massas de Água Fluvial (AR) e Água Costeira (AC). A presença da pluma estuarina provoca na região da PCI um rebaixamento do topo da AC devido à ação da AR, que flutua sobre a primeira. Entretanto, para o período de seca o transporte de volume do rio Jaguaribe é reduzido, não sendo observada a formação de pluma estuarina na PCI, que passa a conter apenas a AC.

Para a Plataforma Continental Média (PCM) e Externa (PCE), no período de chuva, a massa de Água Tropical (AT) transportada pela Corrente Norte do Brasil (CNB) fica restrita a níveis maiores que 60 m, observando-se ainda, domínio da AC. Entretanto, no período de seca é observada maior mistura entre AT e AC na PCM e PCE, devido ao maior transporte da CNB, que nesta época do ano apresenta os maiores valores (12-13 *Sverdup* segundo Silveira et al. (1994)), adentrando a PCCE promovendo esta mistura.

O padrão de circulação na PC ao largo do rio Jaguaribe apresenta caráter barotrópico na componente forçada pelo vento local, mostrando que as correntes paralelas à isobárimétricas são afetadas pela variação sazonal do vento. As componentes M_2 e S_2 são as frequências de maior energia presentes nas correntes de maré, indicando que a maré na região é resultado de co-oscilação com o oceano profundo.

A redução dos fluxos fluviais atualmente em diminuição, alimentado por períodos

cada vez mais curtos de chuva, resultam no bloqueio dos fluxos continentais pela entrada da maré, aumentando o tempo de residência e as taxas de descarga das águas no estuário do rio Jaguaribe, e consequentemente, modificando a hidrodinâmica local, a mobilidade e a reatividade de substâncias orgânicas e inorgânicas, onde as correntes de maré desempenham um papel fundamental no transporte de sal e materiais.

2.1 Objetivo Geral.

Esse trabalho, teve como objetivo geral avaliar qual a resposta das águas da Plataforma Continental do Ceará ao vento forçante e à ação das marés, assim como, caracterizar a influência da descarga fluvial no estuário do rio Jaguaribe e seus efeitos na PCI, calculando os percentuais das massas de água e a variação espacial e temporal das correntes que atuam na região da PCE, PCM e PCI nas estações de chuva e seca.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar o padrão sazonal seca e chuva, da estrutura termohalina e de massas de água da região em estudo.
- Determinar a influência das massas de água e das frentes que atuam na PCCE, analisando sua variação sazonal (chuva e seca).
- Compartimentar a PCCE em externa, média e interna, através do uso de suas características físicas.
- Determinar os períodos de maior energia das correntes nas escalas submaregráfica e maregráfica.
- Quantificar, a partir das observações hidrográficas e correntográficas, se a resposta das águas da PC ao vento forçante apresenta um caráter barotrópico ou baroclínico.
- Avaliar o padrão de circulação, cálculo dos tempos de residência, taxas de descarga e balanço de material particulado em suspensão durante as estações de chuva e seca.

- Calcular o balanço líquido e de materiais nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, com base nos modelos em caixa proposto pelo LOICZ, para as estações de chuva e seca.
- Calcular os números de Richardson estuarino e por camada para determinar a estabilidade vertical do escoamento nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, nas estações de chuva e seca.
- Determinar quais as componentes mais energéticas associadas ao transporte advectivo de sal, nas estações de chuva e seca.
- Classificar o sistema estuarino com base no diagrama de estratificação-circulação de Hansen e Rattray (1986).
- Simular, utilizando técnicas de modelagem numérica, qual a resposta das águas da região da plataforma continental à tensão de cisalhamento do vento.

Capítulo 3

Dados e Métodos

3.1 Aquisição dos Dados.

Durante o ano de 2009, como parte deste trabalho, foram realizadas diversas ações para aquisição de dados oceanográficos na plataforma continental do estado do Ceará e no estuário do rio Jaguaribe. Estas ações foram aplicadas a 3 áreas: Plataforma Continental Externa e Média, Plataforma Continental Interna e estuário do rio Jaguaribe. Os cruzeiros oceanográficos nos três compartimentos contaram com apoio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (CNPq - INCT-TMCOcean, por processo nº 573.601/2008-9), em uma parceria do Laboratório de Hidrodinâmica Costeira (LHiCo/IO/USP) coordenado pelo Professor Dr. Belmiro Mendes de Castro com o Laboratório de Biogeoquímica Costeira (LBC/LABOMAR/UFC) coordenado pelo Professor Dr. Luiz Drude de Lacerda. As datas de início e fim de cada cruzeiro, nos três compartimentos, estão listadas na Tabela 3.1.

3.1.1 Plataforma Continental Média e Externa.

Durante o ano de 2009 foram realizados dois cruzeiros oceanográficos a bordo do Navio Oceanográfico Professor Martins Filho do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR) da Universidade Federal do Ceará. Os cruzeiros foram realizados em junho (período de chuva) e outubro (período de seca) na plataforma continental ao largo do rio Jaguaribe (Figura 3.1).

Cada cruzeiro teve duração média de 10 dias, com 5 dias para realização das ra-

diais hidrográficas, um dia para a instalação do fundeio do ADCP (Acoustic Doppler Current Profile), que realizou medidas temporais de correntes na isóbata de 30 m, e os demais dias para foram usados no deslocamento para a área de estudo.

Tabela 3.1: Datas da realização dos cruzeiros oceanográficos na plataforma continental leste do estado do Ceará e estuário do rio Jaguaribe. PC é a plataforma continental; ZR é a zona de maré do rio; ZM é a zona de mistura estuarina e ZC é a zona costeira.

Compartimento	Início	Fim
CHUVA		
PC Esterma e Média	10/06	20/06
PC Interna	21/06	23/06
Estuário - ZR/ZM	01/06	01/06
Estuário - ZM/ZC	02/06	02/06
SECA		
PC Esterma e Média	06/10	16/10
PC Interna	18/10	20/10
Estuário - ZR/ZM	22/10	22/10
Estuário - ZM/ZC	23/10	23/10

Figura 3.1: Plataforma Continental externa e média ao largo do rio Jaguaribe (CE). Os pontos em vermelho representam as estações hidrográficas realizadas nos dois cruzeiros oceanográficos. O fundeio está representado pelo quadrado vermelho.

3.1.1.1 - Radiais Hidrográficas.

Para a realização das estações hidrográficas na PCCE foi traçada uma grade regular (Figura 3.1), com distâncias média entre radiais de 5,4 milhas náuticas (mn). Cada radial teve um comprimento médio de 25 mn com 5 estações hidrográficas em cada uma, totalizando 25 estações em toda a grade. As radiais foram traçadas perpendicularmente à direção média das isóbatas.

Em cada estação hidrográfica, foi realizado um perfil da superfície ao fundo, para aquisição de dados de condutividade e temperatura com o auxílio de um CTD (FALMOUTH-FSI), nas isóbatas de 10, 20, 30, 50 e 100 m. O CTD tem sensores de temperatura com amplitude de medida entre -5° e 40°C , condutividade, com amplitude de medição entre 0 e 90 ms cm^{-1} e pressão, com amplitude de medição entre 0 e 2000 dbar. A frequência de aquisição dos dados pelo CTD foi de 15 Hz.

O CTD foi utilizado como uma unidade autônoma, sendo os dados armazenados na memória do equipamento, e quando o CTD era retirado da água os dados eram descarregados, passando por um controle de qualidade inicial. Foram eliminados dados inconsistentes (proveniente de erros sistemáticos e aleatórios), e estas lacunas foram preenchidas através do uso de uma interpolação linear: apenas os perfis que tiveram um nível de interpolação $\leq 5\%$ foram considerados na análise.

Apenas os dados obtidos durante a descida do CTD foram considerados, pois o processo de subida do aparelho é considerado mais turbulento que o processo de descida, gerando perturbações na estratificação original da coluna de água.

3.1.1.2 - Campo de Correntes.

A variação espacial das correntes foi medida com auxílio de ADCP (Sontek/YSI) rebocado na popa do navio, com frequência de operação 500 MHz e aquisição de dados (*Burst Interval*) a cada 3 minutos, acoplado ao uso do sistema *Bottom Tracking* que usa como referencial o fundo da plataforma continental (Figura 3.2). A extensão vertical de cada célula foi de 2 m, com uma distância de branco de 1,5 m e alcance máximo de 100 m.

Figura 3.2: Aquisição de dados de velocidade com o auxílio do ADCP rebocado na popa da embarcação na Plataforma Continental ao largo do rio Jaguaribe (CE).

A variação temporal das correntes foi medida por um ADCP (Sontek/YSI) fundeado na posição $4^{\circ} 5' S$ e $37^{\circ} 35' W$, na isóbata de 30 m (Figuras 3.1 e 3.3). O período de amostragem iniciou-se no dia 13 de junho de 2009 e foi até o dia 14 de outubro de 2009, totalizando 120 dias de amostragem.

O ADCP utilizado durante o período do fundeio tinha frequência de 250 kHz com alcance mínimo de 3,5 m e máximo de 100 m de profundidade. O equipamento foi calibrado para gravar 3 perfis em cada período de aquisição (*Profile per Burst*), com um intervalo entre aquisições (*Burst Interval*) de 30 minutos. O período entre os perfis sucessivos (*Profile Interval*) foi de 3 minutos, com realização de médias (*Average Interval*) a cada 1 minuto e tamanho de célula de 1 metro. O ADCP tem acurácia de $\pm 1\%$ da velocidade medida ($\pm 5 \text{ cm s}^{-1}$), e resolução e amplitude de $0,1 \text{ cm s}^{-1}$ e $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

Acoplado à carapaça anti-arrasto, que sustentou o fundeio do ADCP, foi instalado um maregrafo de pressão (DIVER / SBL) que tem escala de medição de condutividade 0-120 mS/cm e de temperatura de -20° a $80^{\circ} C$.

Figura 3.3: Carapaça anti-arrasto utilizada para fundeio do ADCP, sendo preparada para o lançamento na Plataforma Continental Média, ao largo do estuário do rio Jaguaribe (CE).

3.1.2 Plataforma Continental Interna.

Com o intuito de avaliar a influência da pluma estuarina do rio Jaguaribe na plataforma continental interna, foram realizados dois cruzeiros oceanográficos (Tabela 3.1), em uma malha regular de amostragem, com 5 radiais perpendiculares à direção média da isóbata de 10 (Figura 3.4).

3.1.2.1 - Radiais Hidrográficas.

A distância média entre as radiais na região da pluma estuarina foi de aproximadamente 2 mn. Em cada radial foram realizadas 3 estações hidrográficas, com exceção da radial 3 que teve 4 estações hidrográficas. O CTD utilizado foi o mesmo descrito na seção 3.1.1.1.

3.1.2.2 - Campo de Correntes.

As correntes na região da PCI também foram medidas com auxílio de ADCP (Son-tek/YSI) rebocado na popa do navio, mas com frequência de operação 1500 MHz e

aquisição de dados (*Burst Interval*) a cada 1 minuto, acoplado ao uso do sistema *Bottom Tracking*. A extensão vertical de cada célula foi de 1 m, com uma distância de branco de 1,5 m e alcance máximo de 25 m.

Figura 3.4: Plataforma Continental Interna ao largo do rio Jaguaribe (CE). Os pontos em vermelho representam a malha amostral realizadas nos dois cruzeiros oceanográficos.

3.1.3 Campo de Vento.

Para estudarmos a variação espacial e a influência do vento local sobre as águas da PCCE utilizamos os dados aqisitados pelo SeaWinds/QuikSCAT para o ano de 2009. Este instrumento é um radar de microondas que mede, através da rugosidade da superfície do oceano, a intensidade e a direção do vento, com uma resolução espacial de 25 km. Estas medidas apresentam uma variação de 3 a 20 m s^{-1} , com acurácia de 2 m s^{-1} e 20°, para intensidade e direção, respectivamente. Os dados utilizados foram correspondentes à PCCE e à região oceânica adjacente, consistindo nas componentes zonal e meridional do vetor velocidade do vento, com duas medidas diárias.

A variação diária do vento local foi adquirida através de plataformas de coleta de dados independentes (PCD's), localizadas na região costeira do estado do Ceará, man-

tidas pela Fundação Cearense de Meteorologia. As PCD's utilizadas estão instaladas nas cidades de Icapuí, Fortim e Fortaleza. As medidas de temperatura do ar, velocidade e direção do vento, umidade relativa e taxas de radiação, foram realizadas, para o ano de 2009, em intervalos de uma hora.

3.1.4 Estuário do Rio Jaguaribe.

Para o estuário do rio Jaguaribe, foram realizadas duas campanhas nos períodos de chuva e seca, nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 3.5), seguindo a separação proposta por Dias (2005) que adotou os critérios descritos inicialmente por Miranda et al. (2002). A interface ZR/ZM denota a contribuição fluvial da bacia de drenagem para o estuário, enquanto que a interface ZM/ZC denota a contribuição do estuário para a plataforma continental interna.

3.1.4.1 - Radiais Hidrográficas.

Para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 3.5) foram realizados perfis horários em duas estações hidrográficas (margem esquerda e direita) durante 13 horas, para as estações de chuva e seca. A calibração do CTD foi a mesma adotada para a aquisição de perfis termohalinos na plataforma continental interna, com uma distância das estações hidrográficas para as duas regiões de aproximadamente 300m. Entretanto, devido à pequena profundidade local (variou entre 2 e 5 metros) a velocidade de descida do CTD no estuário foi de $0,5 \text{ m s}^{-1}$, o que resultou no dobro de dados por metro quando comprado com os dados da PCI.

3.1.4.2 - Campo de Correntes.

Para medir as velocidades instantâneas em cada hora foi utilizado o ADCP (Son-tek/YSI) rebocado, com frequência 1500 MHz na direção transversal ao escoamento. O equipamento foi programado para realizar a aquisição de dados (*Burst Interval*) a cada 3 segundos com células de 0,3 m cada, em profundidades que variaram entre 6 e 7 metros na estação de chuva e de 3 a 4 metros na estação de seca.

Figura 3.5: Estuário do rio Jaguaribe (CE). As linhas em branco representam as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC.

3.2 Metodologia

3.2.1 Estrutura termohalina e massas de água.

Nos cruzeiros oceanográficos realizados nas PCCE, foram coletadas amostras de água do mar em garrafas de Niskin em 3 profundidades (superfície, meia água e fundo) nas estações oceanográficas até 30 m de profundidade. Nas estações entre 50 e

100 m foram coletadas amostras a cada 15 m.

As amostras foram analisadas a bordo pelo método indutivo com um salinmetro BECHMAN (RS10). A salinidade foi calculada segundo o algoritmo da **Escala Prática de Salinidade** EPS-1978 (Miranda et al., 2002). Posteriormente estes dados foram comparados (CTD e método indutivo) não sendo observados desvios ($\geq 1\%$) entre os dois conjuntos.

3.2.1.1 - Plataforma Continental Externa, Média e Interna.

Remoção de Dados Espúrios.

Para uma melhor análise dos dados, os perfis hidrográficos realizados com CTD foram divididos em blocos de 1 m de espessura, desde a superfície até o fundo. Em cada bloco, os dados que diferiam da média ± 3 vezes o desvio padrão do bloco foram eliminados (Emery e Thomson, 1998).

Equi-Espaçamento Vertical.

A utilização do CTD em uma velocidade de descida de 1 m s^{-1} frequência de aquisição de dados de 15 Hz, permitiu à aquisição de 15 dados de temperatura e condutividade por metro de coluna de água. No entanto, devido ao jogo do navio e à operação mecânica do guincho que desceu o CTD, não pudemos garantir um equi-espacamento vertical entre as amostras no momento da amostragem. Assim, foi calculada uma média vertical para cada 1 m de coluna de água, o que resultou em perfis equi-espacados verticalmente.

Filtragem por Janela Móvel.

Com a realização do equi-espacamento vertical e a retirada dos valores espúrios, os dados de temperatura e salinidade foram recalculados utilizando um procedimento conhecido na literatura como *filtragem por janela móvel*, para cada metro de água. Os valores retirados neste procedimento, são substituídos por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes. A quantidade de valores adjacentes incluídos nesta média corresponde ao tamanho da janela utilizada, e a distribuição dos pesos em

relação ao valor central é determinada pelo tipo da janela utilizada. Este procedimento é necessário pois os dados de CTD são extremamente ruidosos. Entretanto, esse procedimento deve ser usado com o cuidado necessário para que gradientes importantes das propriedades não sejam atenuados.

Optamos por utilizar uma janela de 3 m para a PCI e de 5 m para os pontos localizados na PCE e na PCM. A janela utilizada no presente trabalho foi a *Hanning*, que promove uma distribuição de pesos de caráter gaussiano, privilegiando a medida central. As Figuras 3.6 e 3.7, ilustram cada etapa deste pré-processamento, mostrando o exemplo de um tratamento efetuado em uma estação hidrográfica qualquer.

Figura 3.6: Perfil de temperatura realizado na plataforma continental externa, referente aos primeiros 60 m de profundidade, exemplificando o equi-espaçamento vertical (binado) e filtragem dos dados por janela móvel.

Figura 3.7: Perfil de temperatura na plataforma continental interna, referente aos primeiros 10 m de profundidade, exemplificando o equi-espacamento vertical (binado) e filtragem dos dados por janela móvel.

A densidade convencional (σ_t) foi calculada de acordo com a equação 3.1.

$$\sigma_t = [\rho(S, T, \phi) - 10^3] \quad (3.1)$$

onde $\rho(S, T, \phi)$ é a densidade da água do mar com salinidade S , temperatura T e a pressão atmosférica.

Gradeamento Horizontal.

Para a obtenção da variação horizontal dos campos termohalinos e de massas de água, foram construídas duas grades, de forma a contemplar as características das três regiões da plataforma continental. A grade utilizada na PCE e PCM (Figura 3.8) tem

resolução espacial de 300m x 300 m, enquanto que a grade usada na PCI (Figura 3.9), tem resolução de 100m x 100m. A ortogonalidade dos eixos horizontais foi mantida.

Figura 3.8: Grade ortogonal utilizada para a interpolação dos campos horizontais de salinidade, temperatura, densidade e massas de água na plataforma continental média e externa.

Figura 3.9: Grade ortogonal utilizada para a interpolação dos campos horizontais de salinidade, temperatura, densidade e massas de água na plataforma continental interna.

Para os campos de temperatura, salinidade e densidade convencional estimamos valores médios a partir dos dados pré-processados. Considerando que o conjunto de dados de temperatura e salinidade, para as épocas de chuva e seca, apresentam uma distribuição regular no plano horizontal, foi aplicado um método de estimação denominado de Análise Objetiva (A.O - "*Objective Analysis*").

A A.O usada como interpolador ótimo é uma ferramenta estatística-matemática amplamente utilizada na construção de campos horizontais e verticais de propriedades escalares e vetoriais, a partir de conjunto de dados observacionais que apresentam homogeneidade e/ou heterogeneidade espacial (Emery e Thomson (1998)).

Esse método, cujo princípio é baseado no Teorema de Gauss-Markov, tem como pressupostos fundamentais a estacionaridade, em que o campo não é alterado durante o período de amostragem de cada mapa, e a homogeneidade, com características ao longo de todo o campo de dados iguais. Outra característica é que a função de covariância é isotrópica, apresentando a mesma estrutura em todas as direções (Emery e Thomson (1998)).

Os dados interpolados $\hat{\theta}$ são resultantes da combinação linear dos dados observados ϕ , como observado na equação 3.2:

$$\hat{\theta} = \sum_{i=1}^n a_i \phi_i \quad (3.2)$$

onde a_1 é a i -ésima aplicação da função peso, e n é o número de observações.

Portanto, podemos assumir que uma observação ϕ_r , em um local específico r apresenta um valor real θ_r e um erro aleatório agregado e_r que é inerente à amostragem e aos erros instrumentais das medições. Desta forma a medida observada pode ser expressa como 3.3:

$$\phi_r = \theta_r + e_r \quad (3.3)$$

Ao considerarmos que o erro aleatório e_r não é correlacionável com o erro observado em outra localidade s , nem com o campo verdadeiro, podemos escrever a equação 3.4 como:

$$E[e_r e_s] = \varepsilon^2 \delta_{rs} \quad (3.4)$$

onde ε^2 é a variância do erro amostral, δ_{rs} é o Delta de Kronecker e $E[e_r e_s]$ é a correlação entre os erros nas localidades r e s .

Assumindo que x representa os pontos de grade que serão usados na interpolação, o estimador ótimo usado na A.O, para uma grandeza escalar, pode ser escrito como 3.5:

$$\hat{\theta}_x = \sum_{r=1}^n B_{xr} \left[\sum_{s=1}^n A_{rs} - 1 \phi_s \right] \quad (3.5)$$

onde A_{rs} é a matriz de auto-correlação entre as observações e B_{xr} é a matriz de correlação cruzada entre as observações na localidade r e os dados estimados em x . Logo, podemos representar as matrizes A_{rs} e B_{xr} (equações 3.6 e 3.7), como:

$$A_{rs} = E[\phi_r \phi_s] = C(x_r - x_s) + \varepsilon^2 \delta_{rs} \quad (3.6)$$

$$B_{xr} = C(x - x_r) \quad (3.7)$$

onde $C(x - x_r)$ é a matriz de auto-correlação entre os valores reais das observações e C é a correlação para o campo ϕ .

Utilizamos a forma isotrópica gaussiana da função de auto-correlação, dada por 3.8:

$$C(x_r - x_r) = (1 - \varepsilon^2) e^{-\frac{\gamma^2}{l_c^2}} \quad (3.8)$$

onde γ é a distância radial entre os dados observados e l_c é o comprimento de correlação. Neste trabalho, a determinação dos parâmetros l_c e ε^2 foi realizada através do uso da equação 3.8, segundo Silveira et al. (2000).

Foram calculadas as correlações dos campos termohalinos para profundidades em que existam valores em todos os pontos de grade. A correlação amostral para a PCE e PCM (Figura 3.8) é apresentada na Figura 3.10, enquanto que a Figura 3.11 mostra a correlação amostral para a PCI (Figura 3.9), em função da distância entre as estações (*lag*). É fácil notar o caráter aproximadamente gaussiano apresentado pela correlação, sugerindo que a forma teórica proposta na equação 3.8 é uma boa aproximação. O ajuste não-linear forneceu comprimentos de correlação (l_c) variando entre 17 km para

a PCE e PCM, e de 1,1 km para a PCI. A variância de ϵ^2 observada foi de 0,09 e 0,009, para ambas as áreas.

Figura 3.10: Correlação amostral para os dados hidrográficos na plataforma continental média e externa, conforme ajuste não linear para a equação 3.8. O comprimento de correlação (l_c) foi de 17 km e a variância do erro amostral aleatório $\epsilon^2 = 0,09$.

Figura 3.11: Correlação amostral para os dados hidrográficos na plataforma continental interna, conforme ajuste não linear para a equação 3.8. O comprimento de correlação (l_c) foi de 1,1 km e a variância do erro amostral aleatório $\epsilon^2 = 0,009$.

O emprego da A.O como técnica de interpolação na construção dos campos horizontais da estrutura termohalina estima o valor das quantidades para cada ponto pertencente à grade de interpolação. Como subproduto da A.O é obtido o campo de erros, estimado a partir do erro médio quadrático, associado ao processo de interpolação. O erro encontrado neste trabalho foi menor que 0,5% para PCE, PCM e PCI.

Gradeamento Vertical.

O gradeamento vertical dos campos de temperatura, salinidade e densidade (TSD) para a PCE, PCM e PCI foi realizado com a criação de grades regulares para cada radial, sendo os últimos pontos de grade delimitados pela profundidade local de cada estação hidrográfica. Buscando minimizar a forte anisotropia vertical dos dados, foi implementado um fator peso, que consiste de uma relação direta entre as maiores profundidades e a máxima distância de cada radial. A utilização deste fator de correção possibilitou o uso da A.O como um interpolador ótimo. Os valores dos l_c foram equivalente aos valores das distâncias entre os pontos mais distantes em cada radial, e o valor da variância do erro aleatório amostral foi igual ao valor obtido na interpolação linear ($\epsilon^2 = 0,005$).

Massas de Água.

Foram construídos diagramas TS espalhados, que no plano TS representam observações de salinidade e temperatura (Miranda, 1982; Miranda, 1985), assim como diagramas T-S volumétricos. Para a estimativa da área horizontal e vertical de influência de um dado par TS (Temperatura e Salinidade), foi levada em consideração a isotropia na distribuição das estações nos dois períodos do ano: a área horizontal média foi determinada pela razão entre a área total englobada pela rede de estações e o número de estações selecionadas em cada época do ano. As áreas totais e de influência de cada estação hidrográfica pode ser observada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Áreas representativas de cada estação hidrográfica.

Cruzeiro	Localização	Área Total (km ²)	Nº estações	Área por Estação (km ²)
Chuva	PCI	59,3	16	3,7
	PCE e PCM	1683,6	25	67,3
Seca	PCI	59,3	16	3,7
	PCE e PCM	1683,6	25	67,3

A distância vertical para cada par TS foi definida de acordo com a equação 3.9

$$d_i = \begin{cases} \frac{h_{i+1} - h_i}{2} & \text{se } i = 1 \\ \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2} & \text{se } i < 1 < n \\ Z - h_i + \frac{h_i - h_{i-1}}{2} & \text{se } i = n \end{cases} \quad (3.9)$$

O índice i representa a i -ésima observação na coluna de água, numeradas consecutivamente a partir da superfície livre até o fundo ($i = 1$ é a observação mais próxima a superfície e $i = n$ é a observação mais próxima ao fundo); d_i representa a distância vertical de influência da i -ésima observação na coluna de água; $h_i \geq 0$ é a profundidade da i -ésima observação; Z é a profundidade da estação (Miranda e Castro, 1979).

Depois da identificação dos índices termohalinos para cada tipo de água presente na região, baseada na distribuição e análise dos pares TS no diagrama TS espalhado, utilizamos o método do triângulo de mistura inicialmente descrito por Mamayev (1975), para obter o percentual de cada tipo de massa de água presente em uma mostra representativa da mistura no estado estacionário. Na plataforma continental, principalmente nas camadas mais superficiais, as propriedades de temperatura e salinidade não são estacionárias. Entretanto, neste trabalho foi considerada que as escalas de tempo envolvidas nas variações dos pares TS são maiores que a duração dos cruzeiros oceanográficos.

As equações utilizadas para estimativa dos percentuais de massas de água foram:

$$\begin{cases} m_1 T_1 + m_2 T_2 + m_3 T_3 = (m_1 + m_2 + m_3) T \\ m_1 S_1 + m_2 S_2 + m_3 S_3 = (m_1 + m_2 + m_3) S \\ m_1 + m_2 + m_3 = 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

onde m_1 , m_2 e m_3 indicam as massas relativas de contribuição de cada um dos três tipos de água para a formação das características termohalinas observadas (S,T); O sistema de equações 3.10 tem soluções: (S_1, T_1) , (S_2, T_2) e (S_3, T_3) são os índices termohalinos dos três tipos de água.

$$m_1 = \frac{T(S_2 - S_3) - S(T_2 - T_3) + T_2 S_3 - T_3 S_2}{T_1(S_2 - S_3) - S_1(T_2 - T_3) + T_2 S_3 - T_3 S_2} \quad (3.11)$$

$$m_2 = \frac{T(S_1 - S_3) - S(T_1 - T_3) + T_1 S_3 - T_3 S_1}{T_1(S_2 - S_3) - S_1(T_2 - T_3) + T_2 S_3 - T_3 S_2} \quad (3.12)$$

$$m_3 = \frac{T(S_1 - S_2) - S(T_1 - T_2) + T_1 S_2 - T_2 S_1}{T_1(S_2 - S_3) - S_1(T_2 - T_3) + T_2 S_3 - T_3 S_2} \quad (3.13)$$

3.2.1.2 - Estuário do Rio Jaguaribe.

Remoção de Dados Espúrios.

Durante a etapa de pré-processamento dos dados de CTD, foram detectados e eliminados os dados espúrios, através do uso de uma taxa de máxima variação de cada propriedade, eliminando assim quaisquer valores que excederam a este limite. Para o preenchimento das lacunas deixadas pela remoção dos dados inconsistentes, adotamos o mesmo filtro gaussiano utilizado na PCI.

Após a fase de pré-processamento dos dados de CTD, pudemos investigar os perfis em blocos de 0,5 m da superfície até o fundo, sendo eliminados os valores que diferiram da média ± 3 vezes o desvio padrão do bloco.

Equi-Espaçamento Vertical.

Devido à variação da coluna de água durante um ciclo completo de maré nos períodos de chuva e seca (9,0 e 4,0 m, respectivamente) a profundidade de amostragem (z) foi normalizada, de acordo com Kjerfve (1975) pelo seu valor adimensional, de acordo com a equação (3.14):

$$Z = \frac{z}{h(t)} \quad (3.14)$$

onde $h(t)$ é a profundidade da água no momento de amostragem e Z é a profundidade normalizada.

As propriedades hidrográficas (S , T) foram interpoladas ao longo da coluna d'água em intervalos de 0,1 Z . As principais características das variações do tempo e as propriedades escalares foram descritas na superfície ($Z = 0$) e próximas ao fundo ($Z = 1,0$) em um regime de maré vazante e enchente (Miranda, 1985; Miranda et al., 2002; Bergamo et al., 2002).

Filtragem por Janela Móvel.

Com a realização do equi-espacamento vertical e a retirada de valores espúrios, os espaços vazios nos dados de temperatura e condutividade foram preenchidos utilizando um procedimento conhecido na literatura como *filtragem por janela móvel*, para cada meio metro de água. Os valores retirados neste procedimento, são substituídos por uma média ponderada entre eles mesmos e os valores adjacentes.

Para o estuário, optamos por utilizar uma janela móvel de 0.5 m, visando a manutenção dos gradientes das propriedades. A Figura 3.12, ilustra o alisamento provocado pelo uso da janela gaussiana do tipo *Hanning*, mostrando o exemplo de um tratamento efetuado em uma estação hidrográfica em particular.

Figura 3.12: Perfis hidrográficos de temperatura, salinidade e densidade obtidos no estuário do Rio Jaguaribe, exemplificando o equi-espacamento vertical (binagem) e filtragem dos dados. A figura da esquerda para temperatura, em °C, e da direita para salinidade. As linhas em preto representam os dados brutos e as linhas em vermelho representam os dados filtrados.

Massas de Água.

Também aqui empregamos a A.O como um interpolador ótimo. O comprimento de correlação (l_c) obtido (62,5 m), foi igual a um quinto da distância observada entre as estações hidrográficas, e a variância do erro de amostragem aleatória foi $\varepsilon^2 = 0,02$ (Figura 3.13).

Na maioria dos estuários a massa de Água Costeira (AC) é mensuravelmente diluída pela massa de Água do Rio (AR) e somente esses dois tipos de massas de água são normalmente observados nestes ambientes. Portanto, para calcular a influência destas duas massas de água, utilizamos uma reta de mistura para que pudéssemos obter o percentual de cada tipo de água presente em uma dada amostra.

A aplicação deste método exige a identificação dos índices termohalinos (T_1 , S_1 e T_2 , S_2), que geralmente são feitas a partir do diagrama TS espalhado. A quantidade percentual de cada tipo de água (M_1 , M_2), em uma amostra com a temperatura (T) e salinidade (S) são obtidos pela resolução do sistema linear observada no conjunto de

equações 3.15.

$$\begin{cases} m_1 T_1 + m_2 T_2 = mT \\ m_1 S_1 + m_2 S_2 = mS \\ m_1 + m_2 = 1 \end{cases} \quad (3.15)$$

Figura 3.13: Exemplo de correlação para os dados de TSD (temperatura, salinidade, densidade), utilizando o ajuste não linear, com um comprimento de correlação $l_c = 62,5$ m, e uma variância do erro amostral aleatório $\varepsilon^2 = 0,02$, para o estuário do Rio Jaguaribe.

3.2.2 Campo de Ventos.

Para obtenção do campo de vento na PCCE durante a realização dos cruzeiros oceanográficos, e nos dias que antecederam estes, utilizou-se uma grade ortogonal delimitada pela costa (ao sul) e pela região oceânica adjacente (ao norte), com dimensão de 20×20 e espaçamento entre pontos de 30 km. Para a interpolação, utilizamos a A.O, com comprimento de correlação de 2° e variância do erro amostral de 0,01. A Figura 3.14 mostra a grade regular utilizada na interpolação dos campos de vento e a sua ortogonalidade.

Para estimarmos o campo de ventos sobre a PC utilizamos os dados do QuikSCAT. O QuikSCAT é um radar de microondas que mede, através da rugosidade da superfície

do oceano, a intensidade e a direção do vento, com resolução de 25 km. Para medidas de 3 m s^{-1} a 20 m s^{-1} a acurácia é de 2 m s^{-1} para intensidade e de 20° para direção. Foram utilizados os dados desse equipamento para a PCCE e para a região oceânica adjacente, que consistem nas componentes zonal e meridional do vetor velocidade do vento, com duas medições diárias.

Figura 3.14: Grade ortogonal utilizada na PCCE para a obtenção dos campos de vento sobre a PCCE, utilizando os dados do QuikSCAT.

3.2.2.1 - Parametrização da Tensão de Cisalhamento do Vento.

A aquisição dos dados de vento a 10 metros, foi realizado com o auxílio de uma estação meteorológica instalada na cidade de Fortim e mantida pela Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME). A estação meteorológica fornece dados de direção e intensidade do vento, pressão atmosférica, temperatura do ar e umidade relativa do ar, onde somente os dados de magnitude e direção do vento foram utilizados, cujo intervalo amostral foi de uma hora.

O vetor velocidade do vento foi decomposto em componentes aproximadamente paralela e normal às isobatimétricas, usado o mesmo ângulo de rotação aplicado para os dados de corrente, sendo a tensão de cisalhamento do vento (TCV) calculada se-

gundo:

$$\tau = \rho_{ar} C D V^2 \quad (3.16)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento do vento, ρ_{ar} é a densidade do ar e CD é o coeficiente de arrasto a 10 m da superfície do mar. O coeficiente de arrasto foi estimado usando a velocidade do vento.

3.2.3 Correntes na Plataforma Continental e Estuário do Rio Jaguaribe.

3.2.3.1 - Decomposição da Velocidade.

Para a plataforma continental, o vetor velocidade foi decomposto em componentes longitudinal v ("Along Shelf") e transversal u ("Cross Shelf"), enquanto que no sistema estuarino a decomposição foi feita em componentes longitudinal u ("Along Channel") e transversal v ("Cross Channel"), utilizando a equação 3.17:

$$r = (d \pm \gamma) \quad (3.17)$$

onde r é a componente reduzida em relação ao eixo escolhido; d é a componente em relação ao norte magnético e γ é o ângulo do eixo longitudinal. Partindo dessa decomposição, Miranda et al. (2002) propôs que a correção final na direção θ é dada pela equação 3.18:

$$\theta = 90^\circ - (dd \pm D) \pm \gamma \quad (3.18)$$

onde θ é a direção da corrente; dd a direção medida pelo instrumento e D é a correção pela declinação magnética.

O ângulo utilizado na plataforma continental foi de -60° , enquanto que para o estuário do Rio Jaguaribe foi de -90° para a interface ZR/ZM e de -45° para ZM/ZC. Na plataforma continental, portanto $u > 0$ aponta para NNE (30°) e $v > 0$ aponta para WNW (300°). No estuário, na interface ZR/ZM $u > 0$ aponta para N (0°) e $v > 0$ aponta para W (270°); na interface ZM/ZC $u > 0$ aponta NNE (30°) e $v > 0$ aponta para WNW (300°).

3.2.3.2 - Plataforma Continental Externa, Média e Interna.

Variação Espacial do Campo de Correntes.

Foram realizadas 5 radiais perpendiculares à direção média das isóbatas (Figuras 3.8 e 3.9) na região da plataforma continental externa, média e interna, respectivamente, nas estações de chuva e seca.

As etapas de tratamento dos dados descritas a seguir visaram a remoção de dados inconsistentes, utilizando parâmetros diagnóstico ou através da inspeção minuciosa dos perfis.

Remoção de Perfis Espúrios.

A velocidade vertical foi um dos parâmetros de diagnóstico utilizado para validar a qualidade dos dados, haja vista que ela é muito pequena quando comparada com a velocidade horizontal. Desta forma, os perfis que tiveram valores de velocidade vertical maiores que a horizontal foram removidos. Além disso, os vetores de velocidade que apresentaram magnitudes superiores a 2 m s^{-1} foram considerados espúrios, sendo descartados.

Sob o ponto de vista físico, utilizamos um filtro subjetivo, descartando dados que apresentaram mudanças bruscas e isoladas na direção ou magnitude de velocidade.

Gradeamento Espacial dos Dados.

Para a construção dos campos de velocidades horizontais interpolados, utilizamos as mesmas grades dos campos termohalino e de massas de água (Figuras 3.8 e 3.9), porém com a aplicação da condição de contorno de não escorregamento junto ao fundo. Dessa forma, transformamos os dados do domínio (x, y, t) para o domínio (x, y) .

A A.O como um interpolador ótimo foi novamente utilizada na construção dos campos horizontais de corrente (Figura 3.15). Os valores de l_c e ε^2 aplicados para a interpolação foram iguais aos utilizados na construção dos campos termohalinos (plataforma média e externa $l_c = 17 \text{ km}$ e $\varepsilon^2 = 0,09$, e para a plataforma interna $l_c = 1,1 \text{ km}$ e $\varepsilon^2 = 0,009$).

Gradeamento Vertical dos Dados.

Após a construção dos campos horizontais das correntes, e calculados os valores das velocidades paralelas e transversais à direção média das isóbatas, as velocidades foram inseridas na grade para as cinco radiais, sendo delimitadas pela i -ésima profundidade de cada ponto.

Figura 3.15: Comparação qualitativa entre os dados de ADCP brutos (painel superior) e após a remoção dos dados espúrios, do gradeamento horizontal e aplicação da A.O (painel inferior).

Função de Corrente e Velocidade Não-Divergente.

Para calcular o fluxo horizontal não-divergente foram removidos os movimentos com alta frequência e, também, os fluxos divergentes. Silveira et al. (2000) mostraram que o campo horizontal de velocidade pode ser decomposto em duas partes: não-divergente e irrotacional (equação 3.19);

$$\vec{v} = \vec{k} \times \nabla_h \psi - \nabla_h \chi \quad (3.19)$$

onde $\vec{v}$ é a velocidade total; ψ é a função de corrente; χ é o potencial de velocidade; $\vec{k}$ é o versor vertical e ∇_h é o operador gradiente horizontal.

Utilizamos a A.O vetorial que calcula a função de corrente (ψ) com base nos dados de velocidade observados com o ADCP (Bretherton et al., 1976). Os autores mostram que caso exista uma relação funcional entre a velocidade não-divergente e a função de corrente, existirá também uma relação funcional entre suas funções de correlação. Desta forma, para o mapeamento horizontal de ψ utilizamos o mesmo procedimento descrito para os vetores velocidade, assumindo isotropia da função de correlação (o escoamento apresenta a mesma escala nas direções paralela e transversal).

Uma vez assumida a não-divergência do campo de velocidade, aplicamos, para a estimativa de u e v , a equação 3.20:

$$\begin{cases} u = -\frac{\partial \psi}{\partial y} \\ v = \frac{\partial \psi}{\partial x} \end{cases} \quad (3.20)$$

Para quantificar a importância do campo de velocidade não-divergente em relação ao campo de velocidade total, calculamos a raiz do erro quadrático médio normalizado, segundo a equação 3.21

$$REMQ = \sqrt{\frac{\langle v - v_{nd} \rangle^2}{\langle v \rangle^2}} \quad (3.21)$$

onde $\langle \rangle$ é a média, v_{nd} é o módulo da velocidade não divergente e v é o módulo da velocidade total.

O percentual de contribuição do campo de velocidade não-divergente em relação ao campo de velocidade total foi calculado com a equação 3.22:

$$CONT = 100 \times (1 - REMQ) \quad (3.22)$$

3.2.3.3 - Estuário do Rio Jaguaribe.

Variação do Campo de Correntes e Remoção de Perfis Espúrios.

Foram realizados perfis perpendiculares à direção média do escoamento, com medidas das correntes ao longo de um ciclo completo de maré (13 horas), nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 3.5). Assim como na plataforma continental, a velocidade vertical foi utilizada como um parâmetro de diagnóstico na validação dos dados de corrente no sistema estuarino.

Gradeamento Vertical.

A decomposição do vetor velocidade, em relação ao referencial local plano de coordenadas cartesianas ortogonais Oxy foi realizada como descrito na seção 3.2.3. Após a decomposição do vetor velocidade, para cada hora, as componentes foram delimitadas pela i -ésima profundidade de cada ponto.

A seguir, apresentaremos os métodos descritos por Miranda et al. (2002) e Bergamo et al. (2002) para o tratamento dos dados observacionais do estuário.

Integração Numérica para Médias no Espaço e no Tempo.

Para os perfis verticais de propriedades escalares denotadas genericamente por $P=P(Z_j,t)$, amostradas em profundidades adimensionais discretas ($Z_j = 0,-0,1,-0,2,...-1$),

as médias desses perfis no tempo foram calculadas por integração numérica, conforme:

$$\langle P(Z_j, t) \rangle = P(Z_j) = \frac{1}{T} \int_0^T P(Z_j, t) dt \quad (3.23)$$

Uma vez obtido o perfil médio em cada uma das profundidades adimensionais, o valor médio da propriedade na coluna de água foi obtido numericamente segundo:

$$\overline{\langle P(Z_j, t) \rangle} = \bar{P} = \int_{-1}^0 P(Z_j) dZ \quad (3.24)$$

Os símbolos $\langle \rangle$ e a barra $(-)$ indicam médias no tempo e no espaço, respectivamente, durante intervalos de tempo iguais a um período de um ciclo completo de maré (T) e ao longo da coluna de água.

Para estimar o efeito barotrópico da maré, foi calculado o valor médio da propriedade escalar $P=P(Z,t)$ na coluna de água, por integração numérica:

$$\overline{P(Z, t)} = \overline{P(t)} = \int_{-1}^0 P(Z, t) dZ \quad (3.25)$$

subtraindo-se a seguir esse valor do correspondente valor quase-estacionário, $\bar{P}$, obtido pela equação 3.24.

Para o cálculo dos valores médios nas áreas $A=A(x,Z)$ das seções transversais no intervalo de tempo (T) das propriedades escalares $P=P(A,t)=P(x,Z,t)$, utilizamos:

$$\langle P(x, Z, t) \rangle = P(x, Z) = \frac{1}{T} \int_0^T P(x, Z, t) dt \quad (3.26)$$

$$\overline{\langle P(x, Z, t) \rangle} = \bar{P} = \frac{1}{A} \int_A P(x, Z) dx dZ \quad (3.27)$$

Quando na expressão da média na coluna de água a propriedade $P(x,Z,t)$ foi a componente longitudinal de velocidade $v=v(x,Z,t)$, a diferença entre o valor médio na coluna de água e o valor estacionário, $v_t = v(x, Z, t) - \langle v(x, Z, t) \rangle$, representou o efeito do componente barotrópico da força de gradiente de pressão.

3.2.3.4 - Variação Temporal do Campo de Correntes.

Remoção de Dados Espúrios e Preenchimento de Lacunas.

Os mesmos fatores que podem ocasionar erros na aquisição de dados de corrente com o uso de um ADCP rebocado por uma embarcação, também atuam nos fundeios. Para remoção dos dados inconsistentes armazenados no equipamento durante o tempo de fundeio utilizamos o método estatístico de eliminação dos registros que excederam a média mais ou menos três vezes o valor do desvio padrão a partir da aplicação de uma janela móvel retangular com um dia de largura.

As lacunas na série de original dos dados, geradas pela remoção dos dados espúrios, foram preenchidas com o uso de interpolação linear. O percentual de preenchimento de lacunas através da interpolação linear variou entre 0,5 e 0,8% do número total de dados da série original.

Análise Espectral de Processos Escalares e Analise Harmônica.

As funções e momentos estatísticos para processos estocásticos estacionário discretos, definidos por Jenkins e Watts (1968) foram utilizados em nossa análise. Para o estabelecimento da frequência de corte para as bandas a serem estudadas, calculamos o período inercial para a PCCE de acordo com:

$$T = \frac{2\pi}{f_o} \quad (3.28)$$

onde f_o é o parâmetro de Coriolis ($f = 2 \Omega \sin \theta_o$), onde Ω é o módulo da velocidade angular de rotação da Terra e o θ_o é a latitude de referência. Obtivemos para T o valor 7 dias.

A banda submaregráfica das marés foi retirada com o uso de um filtro passa-baixa tipo Lanczos Quadrático (Walters e Heston, 1982) com frequência de corte de $1/40 \text{ h}^{-1}$. Exemplo desse processamento aparece na Figura 3.16.

Figura 3.16: Exemplo da utilização do filtro digital como passa baixa, e a diferença entre o sinal total e as oscilações submaregráficas.

Para as correntes de maré, integramos os dados de velocidade de correntes da superfície ao fundo. Para a retirada da banda maregráfica das correntes de maré, utilizamos um filtro passa-alta tipo Lanczos Quadrático (Walters e Heston, 1982) com frequência de corte de $1/25 \text{ h}^{-1}$. Exemplo desse processamento aparece na Figura 3.16. A análise harmônica para as componentes do vetor velocidade foi realizada segundo Franco (1998), para toda série de correntes.

Funções Empíricas Ortogonais.

Uma importante ferramenta para compreensão da variabilidade espaço-temporal dos fenômenos oceanográficos é a análise de funções ortogonais empíricas (EOF). A grande vantagem da análise EOF é o fato do resultado produzir uma descrição reduzida da variabilidade espacial e temporal de séries de dados em termos de funções ortogonais, ou modos normais estatísticos.

Usamos a EOF vetorial segundo Owens (1985) e Owens (1990), combinando as componentes das velocidade na representação complexa:

$$V = u + iv \quad (3.29)$$

onde V representa a forma complexa da composição das componentes e $i = \sqrt{-1}$.

3.2.4 Interações Continente Oceano.

3.2.4.1 - Transporte de Volume e Prisma de Maré.

O transporte de volume (T_V) ou vazão estuarina nas seções transversais ao fluxo médio de área $A=A(x,Z)$ foram calculados através da integração numérica da equação:

$$T_V = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{A} \int \int_A \vec{v} \cdot \vec{n} dA \right] dt \quad (3.30)$$

onde $\vec{v} = \vec{v}(x, Z, t)$ é o vetor velocidade, $\vec{n}$ é o versor normal à seção A , T é o intervalo de tempo de um ciclo completo de maré, x é a distância horizontal da seção e Z é a profundidade.

Para o cálculo do prisma de maré, utilizamos o modelo clássico proposto por Officer (1976), onde P_M é definido como o volume de água contida no estuário entre os níveis de maré baixa e alta. Uma vez calculada a variação do transporte de volume (T_V) durante um ciclo de maré, a integração do transporte durante o intervalo de tempo (Δt) correspondente a meio ciclo de maré semi-diurna, é igual ao prisma de maré (P_M), que foi calculado segundo a equação:

$$P_M = \int_0^{\Delta t} T_V dt \quad (3.31)$$

A salinidade média no sistema estuarino foi calculada assumindo uma mistura entre volumes de águas marinha (V_P) e continental (Q_f) ao longo de um ciclo de maré semi-diurna, e que todo o volume é retirado do sistema em maré vazante. Diante disto, para conservação dos campos de massa (volume), usamos:

$$S = \frac{V_P}{(V_P + Q_f)} S_0 \quad (3.32)$$

onde S é a salinidade média no estuário em eventos de maré enchente e vazante, assumindo um estuário bem misturado, e S_0 denota a salinidade média não diluída da água do mar na região oceânica adjacente. Maiores detalhes a cerca desta metodologia podem ser obtidos em Luketina (1998) e Miranda et al. (2002).

3.2.4.2 - Cálculo do Volume, Taxa de Descarga e Tempo de Residência.

Para que possamos estabelecer, em uma primeira aproximação, a importância relativa entre as forçantes de maré e descarga fluvial, foram calculados os volumes de água em eventos de maré vazante (V_{ebb}) e enchente (V_{flood}), durante um ciclo completo de maré de 12,4 horas, usando:

$$V_{Ebb} = \int_{t=0}^{t=ebb} Q_f dt \quad (3.33)$$

$$V_{Flood} = \int_{t=0}^{t=flood} Q_f dt \quad (3.34)$$

Na ZM é comum observarmos o efeito do gradiente longitudinal de salinidade, mostrando que, devido à diluição da água do mar, uma parcela de água doce fica retida no sistema estuarino (Miranda et al., 2002). Sabendo que o volume de água estuarina

é resultado de uma mistura entre água marinha e fluvial, a fração de água doce (V_{fw}) foi calculada por:

$$V_{fw} = \frac{Q_f}{P_M} \quad (3.35)$$

A taxa de descarga (TD, *Flushing Time*) e o tempo de residência (TR, *Residence Time*) representam o tempo em que uma partícula de água ou substância, orgânica e/ou inorgânica, permanece no sistema estuarino em eventos de maré enchente e vazante. De acordo com estudo realizado por Ketchum (1950) a T_D para os volumes líquidos e o T_R para as substâncias inorgânicas e orgânicas transportadas e retidas no sistema estuarino, são a razão entre o volume de água doce (V_{fw}) retido na ZM e a descarga fluvial (Q_f):

$$T_D = T_R = \frac{V_{fw}}{Q_f} \quad (3.36)$$

Assumindo que o sistema estuarino já tenha retido o V_{fw} , o taxa de descarga para o período de maré é igual a razão:

$$T_D = \frac{V_{fw} + Q_R}{Q_f} = \frac{V_{fw} + Q_R}{Q_R} T \quad (3.37)$$

3.2.4.3 - Transporte Advectivo de Sal.

O transporte médio de sal (TS) durante um ciclo completo de maré é separado em: descarga fluvial, deriva de Stokes, difusão da maré, circulação gravitacional, difusão residual, cisalhamento da maré e efeito não estacionário do vento, calculado como:

$$T_S = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^h \rho u S dz \right] dt = \langle \overline{\rho u S h} \rangle \quad (3.38)$$

Maiores detalhes a cerca desta metodologia podem ser adquiridos em Bergamo et al. (2002) e Miranda et al. (2002).

3.2.4.4 - Número de Richardson Estuarino e por Camada.

O número de Richardson estuarino (R_{ie}), que estabelece a razão do ganho de energia potencial devido à descarga do rio e a energia cinética da maré foi calculado como:

$$R_{ie} = \frac{g \Delta \rho_H \bar{h} u_a}{\rho u_{rmq}^3} \quad (3.39)$$

onde $\Delta \rho_H$ é a diferença entre a densidade entre a água do mar e a do rio, $\bar{h} u_a$ é a descarga fluvial por unidade de largura e u_{rmq} é a raiz média quadrática da velocidade gerada pelo efeito barotrópico da maré, aproximada por $u_{rmq} = (\bar{u}(t) - u_a)$, com $\bar{u}(t)$ denotando a velocidade média na coluna de água.

O número de Richardson por camadas Ri_L foi calculado como:

$$Ri_L = \frac{gh \Delta \rho_v}{\rho \bar{u}^2} \approx \frac{gh\beta \Delta S_v}{\bar{u}^2} \quad (3.40)$$

onde $h = h(t)$ é a profundidade local, $\Delta \rho_v$ e ΔS_v a diferença entre a densidade (salinidade) do fundo e superfície, $\bar{u}$ é o valor médio da velocidade na coluna e β é o coeficiente de contração salina. Os limites inferior e superior ($Ri_L=2,0$ e $Ri_L=20,0$) estabelecem as condições de instabilidade e alta estabilidade vertical da coluna de água, respectivamente.

3.2.4.5 - Transporte de Material Particulado em Suspensão.

Para a determinação do material particulado em suspensão (MPS), amostras de água do estuário foram coletadas em duplicata, em 18 estações ao longo do estuário do rio Jaguaribe. Para a plataforma continental interna (PCI), foram feitas coletas em 16 estações dispostas em cinco perfis transversais à direção média da isobata de 10 m. As descargas de MPS foram obtidas de acordo com:

$$T_{mps} = \iint_A \varphi \vec{v} \cdot \vec{n} dA = \iint_A \varphi \cdot u dA = \overline{\varphi} \bar{u} A \quad (3.41)$$

onde T_{mps} representa a descarga de MPS [$M T^{-1}$], $\bar{u}$ é a velocidade média integrada na coluna de água ($L T^{-1}$), $\overline{\varphi}$ é a concentração média de MPS ($M T^{-1}$), e A representa a área média da seção transversal a direção longitudinal do fluxo (L^2).

A área representativa para cada amostra de MPS, foi determinada através da espacialização da área de atuação de cada uma delas, utilizando os Polígonos de Voronoi (Figura 3.17) (Aurenhammer e Klein, 1989).

Figura 3.17: Representação da espacialização de áreas de representatividade de cada estação de amostragem e MPS de acordo com diagramas de Voronoi, para o estuário do rio Jaguaribe.

3.2.4.6 - Modelo em Caixa (LOICZ).

Para o cálculo dos balanços de água e de materiais na interface continente-oceano utilizamos um modelo em caixa do LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone). O modelo proposto para ambientes costeiros (Figura 3.18), mostra a contribuição da bacia de drenagem para o sistema estuarino e deste para a zona costeira adjacente.

Figura 3.18: Representação esquemática do modelo em caixa utilizado para o estuário do rio Jaguaribe, no cálculo dos balanços líquido e de materiais. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é de aproximadamente 25 km, com uma profundidade média de 4 m.

3.2.4.7 - Diagrama de Classificação de Hansen e Rattray.

A classificação do estuário foi feita com base no diagrama de estratificação-circulação proposto por Hansen e Rattray (1986), de acordo com os parâmetros de estratificação e circulação:

$$\frac{\delta S}{\bar{S}} \quad (3.42)$$

$$\frac{u_s}{u_f} \approx \frac{U_S}{\bar{u}} \quad (3.43)$$

onde $\delta S = S_f - S_s$ é a diferença entre os valores de salinidade no fundo (S_f) e de superfície (S_s), e $\bar{S}$ é o valor médio da salinidade na coluna de água. U_S é o valor médio

do componente longitudinal de velocidade na superfície e $\bar{u}$ e a média da velocidade na coluna de água. Onde a velocidade da descarga fluvial é dada por: $u_f = T_v / \text{Area}$.

3.2.5 Experimentos Numéricos.

O ROMS (Regional Ocean Modeling System) é um modelo numérico tridimensional, baroclínico, que resolve as equações fundamentais, primitivas; de conservação para a água do mar, incluindo uma versão simplificada da equação de estado, sob as aproximações de águas rasas e de Boussinesq, principalmente. No plano beta usa coordenadas curvilíneas ortogonais e, na direção vertical, utiliza a chamada coordenada S (*terrain - following*), que é uma generalização da coordenada sigma, permitindo resolução variável principalmente nas regiões das camadas de Ekman de fundo e superfície.

As equações hidrostáticas primitivas de momentum são resolvidas através de esquema explícito que exige acoplamento entre os modos barotrópico e baroclínico. Um número finito de passos de tempo barotrópico, dentro de cada etapa baroclínica, é realizado para resolver a superfície livre e as equações de momentum verticalmente integradas. Para evitar erros associados com a suavização das frequências resolvidas no passo de tempo barotrópico, mas não resolvidas pelo passo de tempo baroclínico, são realizadas médias temporais dos campos barotrópicos antes de serem substituídos no passo de tempo baroclínico. Além disso, o código garante conservação de volume e discretiza as equações usando um esquema de terceira ordem (*Leap-Frog*) e um algoritmo corretor do passo de tempo (*Adams-Molton*). Maiores informações sobre o modelo utilizado neste trabalho podem ser obtidos em Shchepetkin e McWilliams (2005).

3.2.5.1 - Construção da Grade Numérica.

Utilizamos uma grade regular, com dimensão de 140 x 80 pontos, entre a Ponta de Cajuais (04° 42' S, 37° 19,5' W) e a Ponta de Itapajé (02° 50,5' S, 40° 00' W) (Figura 3.20). Dada a orientação da linha de costa e das isobatimétricas nessa região, efetuou-se uma rotação nos eixos de 60° no sentido anti-horário, seguindo o procedimento usualmente adotado em estudos de hidrodinâmica da plataforma continental, orientando o eixo x normal à direção média das isóbatas e o eixo y quase-paralelo à essa direção média.

A grade é composta de 11.000 pontos, espaçados entre si em aproximadamente 5 km (nas direções x e y), espaçamento considerado suficiente para garantir adequada resolução aos fenômenos de interesse, conforme estudos anteriores (Soares e Castro (1996)).

3.2.5.2 - Batimetria.

A batimetria da região em estudo (Figura 3.21) foi obtida combinando profundidades digitalizadas das cartas náuticas editadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) com dados do arquivo ETOPO-2 (Miranda e Castro, 2008). Constatando-se a notável quantidade de feições geomorfológicas espúrias introduzidas por esta base de dados, ETOPO-2 na PCCE, somente foram empregadas as profundidades do ETOPO-2 superiores a 300 m. Dos dados validados, calculamos mediana a cada 5 minutos do arco de latitude/longitude, interpolando as profundidades para cada ponto da grade, pelo método da curvatura mínima.

A batimetria obtida guarda coerência com a representada nas cartas náuticas da DHN. Para economizar tempo computacional, considerando que a finalidade deste trabalho recai sobre o estudo da hidrodinâmica da plataforma continental, as profundidades superiores a 1.000 m foram aproximadas a este valor.

3.2.5.3 - Níveis Sigma.

Considerando os objetivos desta tese, as camadas de Ekman de superfície e de fundo têm papel relevante na dinâmica dos movimentos a serem estudados e, dessa forma, a discretização vertical do modelo deve prover adequada resolução dessa região. Por esse motivo, foram adotados 25 níveis sigma (Figura 3.19), escolhidos de maneira que a espessura das 5 camadas próximas da superfície e do fundo variasse de forma exponencial e nas 15 camadas restantes, representativas do interior da coluna d'água, a espessura fosse constante e igual à da 5ª camada (a partir da superfície/fundo).

Figura 3.19: Resolução dos níveis verticais do sistema de coordenadas S. $\theta_s = 7$ e $\theta_b = 0.1$. θ_s controla a concentração das camadas S, em superfície. θ_b controla a concentração das camadas S, no fundo.

Exemplificando, para um ponto de grade com profundidade de 150m, os 25 níveis sigma representam os seguintes níveis aproximados: 0, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60, 66, 72, 78, 84, 90, 96, 102, 108, 114, 120, 126, 132, 138, 144 m.

Figura 3.20: Grade para realização dos experimentos numéricos.

Figura 3.21: Topografia da grade do modelo, em metros.

3.2.5.4 - Condições de Contorno.

Há três contornos abertos: um mais afastado, em domínio oceânico, aproximadamente paralelo à direção média das isóbatas, que chamaremos de contorno Norte (N), e os outros dois localizados na direção transversal, que se estendem desde a linha da costa e que chamaremos de contornos E e W (Figura 3.20).

Nos contornos abertos utilizamos condições de contorno passivas. Assim a resposta do modelo nos contornos abertos é determinada pela dinâmica da circulação no interior do domínio de integração. Essas condições visam manter a propagação das ondas geradas no interior do domínio, permitindo livre advecção ao fluido. Palma e Matano (2000) avaliaram o desempenho de várias condições de contorno passivas formuladas por diversos autores, estendida às condições radiativas, originalmente elaborada por Orlanski (1976):

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial s} = 0 \quad (3.44)$$

onde C_ϕ é a velocidade de fase relacionada a variável dependente ϕ , t é o tempo, e s é a coordenada perpendicular ao contorno aberto. A escolha de C_ϕ determina a transparência do contorno à propagação de ondas, podendo este ser constante ou estimado a partir dos valores assumidos pela variável próximo ao contorno aberto. Sob este último enfoque, Orlanski (1976) empregou a equação 3.44 para estimar a velocidade de fase das ondas que se aproximam do contorno, no ponto de grade imediatamente anterior a este, adotando-a como representativa para o próprio contorno e resolvendo a referida equação no contorno, para a variável escolhida.

A condição de contorno radiacional de *Orlanski*, largamente empregada na integração numérica de modelos matemáticos, só é válida para ondas livres, podendo não funcionar adequadamente quando forçantes externas atuam na fronteira aberta, como por exemplo, a tensão de cisalhamento do vento. A fim de solucionar esta dificuldade, vários autores têm apresentado formulações alternativas à equação 3.44, buscando a parametrização do efeito da ação destas forçantes sobre seu desempenho.

Diante dos trabalhos desenvolvidos por Palma e Matano (1998) e por Soares e Castro (1996), aplicamos as condições de contorno o suficientemente longe da região de interesse, adicionando 2 pontos de grade aos contornos E e W e 3 pontos ao contorno N. Na região onde adicionamos pontos de grade, a TCV e os campos termohalinos iniciais, bem como a batimetria, assumem os valores correspondentes ao último ponto de grade da região de interesse.

Para o modo externo, adotamos o esquema de relaxação com cálculo de solução local no contorno (MRO), nas três fronteiras abertas. A atualização das variáveis prognósticas nos subdomínios adjacentes a esses contornos, é efetuada através:

$$\phi = \gamma\phi_b + (1 - \gamma)\tilde{\phi} \quad (3.45)$$

onde $\tilde{\phi}$ representa o valor integrado no tempo, nessas regiões, conforme fornecido pelo modelo; ϕ_b representa o valor que assume no contorno, em decorrência da solução local, linear; e γ é o parâmetro de relaxação, variando de 0 a 1, no limite da região de interesse até a fronteira onde foi aplicada a solução local, respectivamente. Dessa forma, na região de relaxamento, a variável converge do valor integrado pelo modelo,

no limite da região de efetivo interesse, para o valor da condição de contorno que é aplicada no contorno aberto, suficientemente longe dessa região.

No modo interno, impomos a condição radiativa de Orlanski à componente horizontal da velocidade paralela ao contorno. Para a componente da velocidade perpendicular ao contorno, foi imposta uma condição não-gradiente, o que equivale a calcular essa componente segundo uma versão linearizada para a respectiva equação.

Partindo-se da equação 3.44, a condição de Orlanski foi implementada em diferenças finitas, de acordo com um esquema de diferenciação centrado no tempo e avançado no espaço, em que a velocidade de fase é computada sob uma formulação implícita, de forma a evitar instabilidade computacional:

$$\phi_b^{n+1} = [\phi_b^{n-1}(1 - \mu) + 2\mu\phi_b^n \pm C]/(1 + \mu) \quad (3.46)$$

onde $n-1$, n e $n+1$ são os passos de tempo consecutivos, μ e C podem ser expressos pelas equações:

$$\mu = \begin{cases} 1, & \text{se } C = 1 \\ C, & \text{se } 0 < C < 1 \\ 0, & \text{se } C \leq 0 \end{cases} \quad (3.47)$$

$$C = \frac{\phi_{b\pm 1}^{n-1} - \phi_{b\pm 1}^{n+1}}{\phi_{b\pm 1}^{n+1} + \phi_{b\pm 1}^{n-1} - 2\phi_{b\pm 1}^n} \quad (3.48)$$

C a velocidade de fase e b o ponto no contorno aberto.

Para o campo de massa, as condições de contorno foram formuladas a partir de versão simplificada da equação da advecção:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V_b \frac{\partial P}{\partial s} = 0 \quad (3.49)$$

onde P representa a temperatura ou a salinidade, V_b é a componente da velocidade e $\partial P / \partial s$ é a derivada parcial da componente P , na direção normal ao contorno.

A maré foi introduzida como forçante nos contornos abertos. Nos contornos E e W usamos uma condição radiacional, enquanto que no contorno N implementamos uma fronteira parcialmente fechada ("*partially clamped border*"), segundo Blumberg e Mellor (1987), em que um termo de tendência é adicionado à uma condição radiacional. A escolha da introdução da condição de contorno parcialmente fechada, somente na borda N, foi com o intuito de minimizar a perda de energia no domínio.

A equação que determina a elevação da superfície livre (η) no contorno, fornece a resultante da soma da elevação forçada da maré e de uma onda gravitacional de águas rasas cuja fase se propaga perpendicularmente à borda, para fora do sistema, conforme:

$$h_{i,1} = \sum A - (C \times \sqrt{g \cdot H_{i,1}} \times (h_{i,2} - h_{i,1})) \quad (3.50)$$

onde: $h_{i,1}$ é a elevação da fronteira; $\sum A$ é a somatória das elevações de cada componente de maré; C é uma constante que modula o valor da velocidade de fase da onda ($C=0,1$); g é a aceleração da gravidade; $H_{i,1}$ é a profundidade no contorno e $h_{i,2}$ é a elevação no ponto anterior ao contorno.

3.2.5.5 - Passos de Tempo.

O tempo de integração total para os experimentos foi de aproximadamente 30 dias, para a estação de chuva e seca, período suficiente para a estabilização do modelo. O passo de tempo baroclínico foi definido em 150 segundos, enquanto que o passo de tempo barotrópico foi definido em 5 segundos.

3.2.5.6 - Experimentos Realizados.

Os experimentos realizados na Plataforma Continental do Estado do Ceará (PCCE) foram forçados por vento espacialmente homogêneo, proveniente de nordeste (estação de chuva) e sudeste (estação de seca), e um campo de massa semelhante ao cenário sinótico descrito no Capítulo 4, Seção 4.1. Após a observação da resposta das águas da

PCCE ao vento uniforme, incluímos também como forçante a variação semi-diurna da maré, como descrito no Capítulo 4, Seção 4.2.

Como condição inicial, impomos o estado de repouso ($\eta = u = v = 0$), em todos os pontos de grade, associada a uma TCV do vento espacialmente uniforme em todos os pontos de grade, desde o instante inicial $t=0$. No contorno aberto N utilizamos a condição de contorno adiabática para a elevação da superfície livre ($\eta = 0$), visando a manutenção do nível do mar constante durante a integração numérica.

O campo de massa utilizado na inicialização do ROMS foi construído com base em médias sazonais para o verão (chuva), e inverno (seca), do banco de dados do *World Ocean Atlas - WOA 2009*, segundo Johnson et al. (2009), associado ao cenário sinótico observado na porção leste da PCCE, obtido neste estudo. Tendo em vista que o vento é uma das principais forçantes na PCCE, estabelecemos um campo médio de vento para os meses de chuva e seca.

Com o objetivo de caracterizar possíveis variações sazonais na resposta das águas da PCCE a um vento uniforme, a TCV foi aplicada em cada ponto de grade, simulando o vento mais frequente que atua na região em estudo, durante os períodos de chuva (de dezembro a junho) e de seca (de julho a novembro), desde o instante inicial até o instante em que uma resposta quase estacionária foi obtida.

Para o período de chuva, utilizamos TCV de 0,080 Pa na direção paralela às isóbatas e de -0,070 Pa na direção normal, equivalente a um vento de aproximadamente 8 m s^{-1} e direção de 70° . No período de seca, a TCV utilizada foi de -0,070 Pa na direção paralela às isóbatas, e de 0,078 Pa na direção normal às isóbatas, equivalente a um vento de aproximadamente $7,5 \text{ m s}^{-1}$ e direção de 120° .

Os dados de vento, obtidos sobre o continente foram corrigidos para serem extrapolados para o oceano, utilizando a equação de regressão linear, sugerida por Hsu (1986):

$$U_{\text{oceano}} = 1,62 + 1,17.U_{\text{continente}} \quad (3.51)$$

O domínio foi forçado nos contornos abertos com os parâmetros de maré, elevação (amplitude e fase). Os dados da maré foram obtidos com o uso do modelo global TPXO 7.2, com resolução de $1/4^\circ$ de grau. O TPXO é um modelo global de marés

oceânicas desenvolvido para assimilar dados altimétricos em um modelo barotrópico global (Egbert et al., 1994).

Oito componentes principais de frequências de maré diurna e semi-diurnais (M_2 , K_1 , O_1 , S_2 , N_2 , P_1 , K_2 , Q_1 , ordenados por suas amplitudes na região) são usados nos contornos abertos do domínio. Esse modelo fornece elevações e correntes de maré para os principais constituintes semi-diurnas e diurnos (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 e K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , respectivamente) com uma resolução de $1/4^\circ$ de grau para o Atlântico Sul. A simulação foi realizada sob as condições de chuva, por um período de 30 dias.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Estrutura termohalina e massas de água.

4.1.1 Propriedades Termohalinas: estação de chuva.

4.1.1.1 - Distribuição Horizontal.

Para a PCE e PCM a estrutura térmica superficial apresenta pequena variação espacial, com valores entre 27,93°C e 28,62°C (Figura 4.1 A). As maiores temperaturas ocorreram ao largo, entre as isóbatas de 30 e 100 m, diminuindo gradativamente em direção à costa. Entretanto, foi observado um mínimo relativo na porção norte da grade, com temperatura média de 28 °C sobre as isóbatas de 50 e 100 m, fato observado entre a superfície e o nível de 30 m. A maior variação térmica, com temperaturas variando de 25,9 °C a 28,28 °C (Figuras 4.1 E, F), com amplitudes térmicas de 1,82°C e 3,72°C, foi observado no nível de 50 m e nas proximidades do fundo, respectivamente. Podemos observar que a amplitude térmica média para a estação de chuva apresentou decréscimo da superfície ao fundo de 3 °C, indicando, possivelmente a intrusão de uma massa de água mais fria em direção à costa, na PCCE.

A salinidade superficial (Figura 4.2) apresentou-se de forma homogênea, com valores de 35,5 em toda a área, exceto na porção NE que apresentou um mínimo de salinidade de 35,3, entre as isóbatas de 30 e 50 m. Este tipo de distribuição também foi observado no nível de 10 m (Figura 4.2 B).

Figura 4.1: Distribuição horizontal de temperatura superficial (A) e para os níveis de 10 m (B), 20 m (C), 30 m (D), 50 m (E) e fundo (F), para PCE e PCM, durante a estação chuvosa.

Figura 4.2: Distribuição horizontal de temperatura superficial (A) e para os níveis de 10 m (B), 20 m (C), 30 m (D), 50 m (E) e fundo (F), para PCE e PCM, durante a estação chuvosa.

Nos níveis mais profundos (Figuras 4.2 E, F), os maiores valores de salinidade (36,4) ocorreram ao largo, entre as isóbatas de 50 e 100 m, diminuindo gradativamente em direção à costa (35,3). Este comportamento mostra aumento da salinidade da superfície em direção ao fundo, com amplitude média de 1,05.

Podemos notar, ainda, que águas com salinidades maiores que 36,0 possuem temperaturas em torno de 25,9 °C, na região norte da grade indicando, possivelmente, a presença da AT. Os gradientes de salinidade mais intensos ocorreram entre as isóbatas de 30 e 100 m junto ao fundo: em uma distância aproximada de 12 km os valores de salinidade passam de 35,5 para 35,9 (Figura 4.2 F), mostrando gradiente da ordem de $0,03 \text{ km}^{-1}$. Esta zona indica, em superfície, a transição da área de influência oceânica, com salinidades mais altas, para aquela de influência costeira, com menores valores de salinidade. Em direção à costa, podemos observar águas mais quentes, com temperaturas médias da ordem de 28,2° C, associadas a menores valores de salinidades (35,5), que indicam, muito provavelmente, a presença da AC.

Para a PCI a temperatura variou em superfície de 29,10 a 29,30 °C, com os maiores valores ocorrendo próximos à foz do Rio Jaguaribe (Figura 4.3), decrescendo em direção ao largo, ressaltando o aporte de águas continentais mais quentes neste período. Em sub-superfície e no fundo, podemos observar variação horizontal de temperatura (28,8 a 29,2 °C) apontando para SE.

O gradiente halino em superfície para a PCI apresentou comportamento diferente do observado para a temperatura: onde os maiores valores de salinidade foram observados ao largo da foz do Rio Jaguaribe, da ordem de 30,5, decrescendo em direção ao rio (29,5), (Figura 4.4). Ou seja, em aproximadamente 6 km de extensão, a variação horizontal de salinidade observada foi de $0,17 \text{ km}^{-1}$. Em sub-superfície e no fundo, os menores valores de salinidade (33,0) foram observados na porção E do domínio, aumentando gradualmente na direção W (34,5) (Figura 4.4).

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram que na região de ocorrência de temperaturas mais elevadas ($T \geq 29 \text{ °C}$) foram observadas os menores valores de salinidade ($S \leq 33,5$), com exceção da superfície. O padrão observado para os gradientes térmico e halino sugerem a presença de uma massa de água tipicamente continental, que passaremos a chamar de Água do Rio (AR), mais quente e menos salina, que ao adentrar na PCI

tende a se deslocar para NW.

Figura 4.3: Distribuição horizontal de temperatura superficial (figura superior esquerda), à meia água (figura superior direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de chuva na PCI.

Figura 4.4: Distribuição horizontal da salinidade superficial (figura superior esquerda), à meia água (figura superior direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de chuva na PCI.

Para o estuário do Rio Jaguaribe, na interface ZR/ZM durante 13 horas de amostragem, a temperatura variou de 29,6 a 30,2 °C com média de 29,9 °C, mostrando elevação de 0,05 hr⁻¹ (Figura 4.5). O mesmo comportamento foi observado na interface ZM/ZC, onde a variação observada foi de 29,3 a 30,3 °C, com média de 29,9 °C, com uma elevação de 0,08 hr⁻¹. Os valores máximos foram observados às 15 horas, em ambas as regiões.

Figura 4.5: Variação diurna de temperatura, nas interfaces ZR/ZM (Superior) e ZM/ZC (inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva.

Nesta época do ano, o rio apresentava grande volume de águas continentais, fazendo com que a salinidade fosse praticamente constante ao longo do dia nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 4.6). Esse aporte de águas continentais no estuário do Rio Jaguaribe na estação de chuva é observado na PCI (Figuras 4.3 e 4.4), apresentando águas mais quentes e menos salinas. O elevado volume hídrico advecta os processos de mistura para fora dos limites geomorfológicos do estuário.

Figura 4.6: Variação diurna de salinidade, nas interfaces ZR/ZM (figura, superior) e ZM/ZC (figura, inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva.

4.1.1.2 - Distribuição Vertical.

Ao longo das cinco radiais realizadas na PCE e PCM, a temperatura variou no intervalo de 24,5 a 28,6 °C, com valores médios de 28 °C (Figura 4.7 A). A estrutura vertical de temperatura foi novamente definida por valores mais elevados ao largo, decrescendo gradativamente em relação à costa, com os maiores valores observados em superfície decrescendo nos primeiros 45 m de profundidade. Na superfície livre as temperaturas variaram entre 28,4 °C ao largo e 28 °C nas proximidades da costa, apre-

sentando gradiente de $8,3 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$. A variação vertical da temperatura foi praticamente constante nos primeiros 50 m de profundidade, onde passamos a observar um decréscimo mais acentuado da temperatura. Os gradientes verticais de temperatura se acentuam nas radiais 4 e 5 (Figura 4.7 B). Nesta radial o gradiente térmico observado foi de $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ em 50 m de profundidade, a uma distância de aproximadamente 80 km da costa. Nas radiais 1, 4 e 5 podemos observar núcleos de máximos de temperatura, que chegam a $24,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$

A estrutura vertical de salinidade (Figura 4.8 A) apresentou gradiente de $8,3 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$ em superfície, com os maiores valores de salinidade ocorrendo próximos à costa (35,8) e decrescendo em relação ao largo (35,4). Para a porção NE da área (Figura 4.8 B), observou-se entre a superfície e o nível de 30 m região com um mínimo de salinidade (35,4), entre as isóbatas de 50 e 100 m. Na região mais ao norte da grade, observou-se a presença de uma haloclina: os valores de salinidade passaram de 35,6 no nível de 40 m para 36,5 no nível de 80 m. Assim com a intensificação do gradiente térmico, o gradiente halino ocorreu a uma distância aproximada de 80 km da costa, na borda da plataforma continental.

A estrutura vertical de massa (Figuras 4.9 A e B) intensificou-se gradualmente da costa em direção ao largo. Este padrão é facilmente observado nas radiais mais a oeste (Figura 4.9 B, radiais 4 e 5), onde a densidade convencional, em superfície, na costa, foi de 22,6 e, ao largo, chegou a 23,0. Entretanto, nas radiais mais a leste (Figura 4.9 A), radiais 1 e 2) a uma distância de 10 km da costa para o largo, foram observados núcleos de máximas densidades (23,0). Nas profundidades verticais menores que 50 m, os valores de densidade convencional aumentaram gradualmente, chegando a 24,5 (radiais 4 e 5). O gradiente de massa horizontal médio foi de $1,5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$.

Figura 4.7: A - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.7: Continuação. B - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.8: A - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.8: Continuação. B - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.9: A - Distribuição vertical de densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.9: Continuação. B - Distribuição vertical de densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Como visto nas distribuições horizontais de temperatura e salinidade (Figuras 4.1 e 4.2) na porção mais ao norte da grade, nos primeiros 50 m de profundidade, observamos a presença de águas mais frias e salinas. Este fato também foi observado na estrutura vertical (Figuras 4.7 A e B; Figuras 4.8 A e B), onde temos a intrusão de águas mais salina e fria, proveniente do talude continental, sobre a plataforma continental, ficando restrita entre 50 e 100 m de profundidade, caracterizando o topo da camada de AT que compõe a CNB. No restante da plataforma, observou-se a presença de águas mais quentes e menos salinas, com a presença de pequenos gradientes verticais halinos e térmicos em toda sua extensão, caracterizando a presença da AC.

Para a PCI durante a estação de chuva (Figuras 4.10, A e B), próximo a foz do Rio Jaguaribe, foram observados os maiores valores de temperatura, variando entre 29,6 a 29 °C entre a superfície e 3 m de profundidade. Os menores valores de temperatura ocorreram mais ao largo, entre 4 e 6 km da linha de costa. Na radial 3 (Figura 4.10 A), em frente ao estuário do Rio Jaguaribe, o gradiente vertical foi de 0,05 °C m⁻¹, mostrando a influência do aporte continental.

A distribuição de salinidade (Figuras 4.11, A e B) apresentou os menores valores próximos à costa, entre a superfície (24,0) e 3 m de coluna de água (31,0), aumentando em direção ao largo e com a profundidade. Esta distribuição vertical de salinidade se manteve em todas as radiais, com os menores valores em superfície e os maiores junto ao fundo (33,0), o que resultou em gradiente halino de 1,30 m⁻¹.

A estrutura vertical de massa para a PCI (Figuras 4.12 A e B) apresentou picnoclina pronunciada nas radiais mais centrais (radiais 2, 3 e 4), intensificando-se da costa para o largo à uma distância de até 5 km, mantendo-se na camada mais superficial, entre a superfície e 3 m de profundidade. A variação de densidade convencional observada através da picnoclina foi de 16,0 a 21,0. Abaixo da picnoclina, observou-se uma pequena variação vertical da estrutura de massa, com valores próximos a 21, fato também observado para distâncias maiores que 5 km da costa, onde os gradientes de densidade foram menores que os observados na picnoclina. O gradiente vertical médio de massa observado na região da desembocadura do estuário do Rio Jaguaribe foi de 0,98 m⁻¹.

Figura 4.10: A - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.10: B - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.11: A - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.11: B - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.12: A - Distribuição vertical de densidade convencional na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.12: B - Distribuição vertical de densidade convencional na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Os gradientes halino e térmico, assim como a estrutura de massa, observado na PCI denotam a intrusão de águas mais quentes e menos salinas e densas na camada mais superficial (0-3 m), muito provavelmente, devido ao grande volume de água de origem fluvial (AR) exportada pelo estuário para a PCI nesta época do ano. Mesmo com um maior aporte de água doce, não observamos homogeneidade em toda a coluna de água dos gradientes térmicos, halino e de massa, onde esta intrusão foi perceptível apenas em superfície.

Em profundidades maiores que os 3 primeiros metros de coluna de água e mais próximo da costa, observamos núcleos de temperaturas mais elevadas (Figura 4.10 A), associadas a salinidades quase-constantes da costa em direção ao largo (Figura 4.11 A). Da mesma forma que a salinidade, a estrutura de massa (Figura 4.12 A e B) se manteve constante em profundidades maiores que os 3 primeiros metros de coluna de água, não apresentando gradientes significativos, o que muito provavelmente denota a presença de uma massa de água mais fria e salina proveniente do oceano adjacente (AC).

Para o estuário do Rio Jaguaribe, na interface ZR/ZM a variação temporal da temperatura durante o período amostral (13 h) foi de 29,6 a 30,2 °C, com média de 29,9 °C $\pm$ 0,2 (Figura 4.13 A). Na interface ZM/ZC, o padrão de variação foi muito semelhante ao observado na ZR/ZM, variando entre 29,3 a 30,3 °C, com média de 29,9 °C $\pm$ 0,3 (Figura 4.13 B). A amplitude térmica observada nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, foi de 0,6 °C e 1 °C, respectivamente, gerando elevações de 0,05 e 0,08 h⁻¹, respectivamente.

A estrutura vertical de salinidade foi praticamente constante em todo o estuário (Figuras 4.14 A e B), variando entre 0,143 a 0,144, com valores médio de 0,142, e de 0,149 a 0,194, com média de 0,171, para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, respectivamente. As pequenas variações dos gradientes verticais térmicos e salinos, com linhas praticamente verticais, mostram a homogeneidade da coluna de água em todo o estuário durante a estação de chuva, devido ao domínio de águas continentais, mais quente e menos salinas (AR).

O elevado volume de chuvas na região durante o período amostral, gerou elevada descarga fluvial da bacia de drenagem para o estuário, facilmente observada pelos pequenos ou quase inexistentes gradientes térmicos e salinos nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, culminando em maior aporte de águas fluviais na PCI, como visto nas Figuras 4.10 A e B, 4.11 A e B, e 4.12 A e B.

Figura 4.13: Variação vertical de temperatura (°C) nas interfaces ZR/ZM (A) ZM/ZC (B) para a estação de chuva.

Figura 4.14: Variação vertical de salinidade nas interfaces ZR/ZM (A) ZM/ZC (B) para a estação de chuva.

4.1.2 Propriedades Termohalinas: estação de seca.

4.1.2.1 - Distribuição Horizontal.

Para a PCE e PCM a estrutura térmica variou de 27 °C a 27,4 °C da superfície ao fundo, com valores médios de 27 °C $\pm$ 0,07 (Figura 4.15). Em superfície, as maiores temperaturas foram observadas próximas à costa, 27,5 °C, entre as isóbatas de 10 e 20 m, decaindo gradativamente em direção ao largo, chegando a 27 °C entre as isóbatas de 50 e 100 m, gerando gradiente horizontal de 0,02 °C km⁻¹ (Figura 4.15 A). Este comportamento se manteve nos níveis imediatamente abaixo da superfície (Figuras 4.15 B e C) chegando à isóbata de 50 m que manteve uma temperatura média de 27 °C (Figura 4.15 D e E). Entretanto, junto ao fundo, observou-se um mínimo relativo de temperatura na porção NW da área, com valores de 25 °C, o que gerou nesta região gradiente térmico horizontal de 0,06 °C km⁻¹. Assim como na estação de chuva, podemos observar que a amplitude térmica para a PCE e PCM da superfície ao fundo, decaiu em aproximadamente 2,6 °C, evidenciando a intrusão de águas mais fria.

Assim como observado na estação chuvosa, as salinidades superficiais apresentaram-se com pequena variabilidade, variando entre 35,4 a 36,4, com valores médios de 36,1 (Figura 4.16 A). Os maiores valores de salinidade foram observados próximo à costa, entre as isóbatas de 10 e 20 m (Figura 4.16 B e C), decaindo de forma gradual em direção ao largo, desde a superfície até o fundo. No norte da grade, entre as isóbatas de 50 e 100 m (Figura 4.16 D, E e F), podemos observar uma região com mínimos relativos de salinidade, chegando a 35,9. Em todas as profundidades, observou-se aumento da salinidade com a profundidade, gerando gradiente horizontal de 0,03 km⁻¹.

A região norte do domínio apresentou as menores temperaturas (25 °C) associadas a salinidades de 36, o que muito provavelmente indica a presença da AT sobre a PCCE para esta época do ano, na região da isóbata de 50 m. Como os valores de temperatura e salinidade variaram de forma monotônica entre as isóbatas de 100 m e 30 m, podemos inferir maior presença da AT sobre a PCCE na estação de seca.

Figura 4.16: Distribuição horizontal de salinidade superficial (A) e para as profundidades de 10 m (B), 20 m (C), 30 m (D), 50 m (E) e fundo (F), para PCE e PCM, durante a estação de seca.

As temperaturas para a PCI, em superfície, variaram entre 27,5 e 27,9 °C, com valores médios de 27,7 °C $\pm$ 0,01, os maiores valores ocorrendo a leste da foz do Rio Jaguaribe (Figura 4.17). A temperatura na região da PCI, decai de leste para oeste do domínio, na ordem de 0,07 °C km⁻¹, comportamento também observado em meia água e no fundo. A pouca variabilidade da massa de água costeira adjacente à região estuarina do Rio Jaguaribe mostra a pequena contribuição fluvial nesta época do ano, do estuário para a PCI, haja vista que águas de origem continental são mais quentes que as águas do oceano adjacente.

A salinidade superficial variou de 35,5 a 36,8, com valores médios de 36,7 $\pm$ 0,12, os maiores valores ocorreram a oeste da foz do Rio Jaguaribe (Figura 4.18). Ao contrário do comportamento observado para a temperatura que apresentou um decaimento de leste para o oeste, a variação da superfície decaiu de oeste para leste na ordem de 0,1 km⁻¹. Este comportamento também foi observado à meia água e no fundo, mostrando um decaimento da salinidade de W-E.

A variação horizontal da temperatura e salinidade observados nas Figuras 4.17 e 4.18 mostram que nas regiões com temperaturas mais elevadas ($T \geq 27,7$ °C) foram encontrados os menores valores de salinidade ($S \leq 36,6$), o que nos leva a crer em um deslocamento horizontal da AC que estava localizada na PCM na estação de chuva, para a PCI, durante a estação de seca. Este fato se deve, muito provavelmente, à mudança de cenário na estação de seca, pois na quadra chuvosa o elevado aporte de água continental (AR) que se misturava a massa de água marinha (AC) formava uma mistura mais quente e menos salina na camada superficial na região da PCI, fato não observado logo abaixo, onde as águas se mantiveram mais frias e mais salinas que a água sobrejacente. Entretanto, na estação de seca, os baixos fluxos fluviais, ou a inexistência dos mesmos colaboraram para o amplo domínio da AC, mais salina e fria, quando comparada à AR.

Figura 4.17: Distribuição horizontal de temperatura superficial (figura superior, esquerda), à meia água (figura superior, direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de seca.

Figura 4.18: Distribuição horizontal de salinidade superficial (figura superior, esquerda), à meia água (figura superior, direita) e fundo (figura inferior), durante a estação de seca.

De modo geral, as variações de temperatura no estuário do Rio Jaguaribe para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 4.19) foram de 28,1 °C a 29,5 °C, com valores médios de 28,9 °C e desvio padrão de $\pm 0,4$ e de 27,1 °C a 28,9 °C, com média de 28 °C e desvio padrão de $\pm 0,4$, respectivamente. Em evento de maré vazante, os valores de temperatura oscilaram entre 28,2 °C a 29,2 °C, com média de 28,6 °C $\pm 0,4$ e de 27,1 °C a 28,5 °C, com valores médios de 27,8 °C $\pm 0,6$, nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, respectivamente. Entretanto, em maré enchente a variação observada na ZR/ZM foi de 29,2 °C a 29,5 °C, com média de 29,3 °C $\pm 0,1$, enquanto que na ZM/ZC foi de 27,9 °C a 29 °C, com média de 28,4 °C $\pm 0,4$, mostrando uma maior influência da AC nesta região do estuário.

A salinidade variou na ZR/ZM entre 2,92 e 16, com média de 8,8 e desvio padrão de ± 5 e de 17,2 a 36,5, com valores médios de 28 e desvio padrão de ± 7 na ZR/ZM ao longo de um ciclo de maré (Figura 4.20). Em evento de maré vazante, a salinidade observada na ZR/ZM foi de 2,9 a 15,4, com média de 7 ± 5 , enquanto que na ZM/ZC, devido à maior proximidade com a PCI, observamos uma maior amplitude de salinidade, variando entre 17,3 e 34,5, com média de 25,5 ± 7 . O mesmo comportamento foi observado em evento de maré enchente, com variação de salinidade para ZR/ZM de 3,6 a 16, com média de 11 e desvio padrão de ± 5 , enquanto que na ZM/ZC a variabilidade observada foi de 19,2 a 36,5, com valores médios de 31,6 ± 7 .

As maiores variações de temperatura foram observadas em evento de maré vazante, 0,08 e 0,11 hr⁻¹, para ZR/ZM e ZM/ZC, mostrando que o aporte de água continental gerou maior variabilidade na massa de água estuarina do que a observada em evento de maré enchente. A pequena variação de temperatura observada em evento de maré enchente na ZR/ZM se deve muito provavelmente à pequena atuação da AC na mistura de águas nesta região, pois a variação de temperatura é tipicamente de águas continentais (AR), enquanto que na ZM/ZC a variação em maré enchente (0,08 h⁻¹) foi igual à observada na ZR/ZM em maré vazante. Entretanto, os valores de temperatura registrados na ZM/ZC foram compatíveis com os valores observados na PCI.

Para a salinidade, os valores observados na ZR/ZM foram praticamente constantes durante um ciclo completo de maré (0,96 e 0,95 hr⁻¹ em maré vazante e enchente), com variações de salinidade que foram de água doce ($S \leq 5$) à água estuarina ($S=16$).

Entretanto, na ZM/ZC a variação de salinidade foi de água estuarina ($5 \leq S \leq 30$) a água tipicamente oceânica (AC), com variações halinas de 1,32 e 1,33 h^{-1} , para maré vazante e enchente, respectivamente.

Figura 4.19: Variação diurna de temperatura, nas interfaces ZR/ZM (figura, superior) e ZM/ZC (figura, inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de seca.

Figura 4.20: Variação diurna de salinidade, nas interfaces ZR/ZM (figura, superior) e ZM/ZC (figura, inferior) para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de seca.

4.1.2.2 - Distribuição Vertical.

A distribuição vertical de temperatura (Figuras 4.21 A e B) ao longo das cinco radiais realizadas na PCE e PCM apresentou comportamento oposto ao observado na estação de chuva, onde as maiores temperaturas foram observadas na região mais próxima à costa, decrescendo em direção ao largo. Para as 5 radiais, as temperaturas superficiais médias, próximas à costa, foram de 26,8 °C, chegando a 27 °C na região mais ao largo, mostrando uma variação horizontal da temperatura de 0,01 °C km⁻¹. As variações das temperaturas observadas na superfície se mantiveram praticamente constantes a uma distância de 25 km da costa, nos primeiros 80 m de profundidade, onde podemos observar a presença pronunciada da termoclina, com temperaturas variando entre 24,9 °C a 27 °C junto ao fundo, mostrando variação vertical de 0,07 °C m⁻¹.

A salinidade (Figura 4.22 A e B) apresentou um caráter quase-homogêneo em toda a coluna de água, demonstrando comportamento oposto ao observado na estação chuvosa, que apresentou os maiores valores de salinidade nos primeiros 50 m de profundidades, como já discutido na distribuição horizontal de salinidade (Figura 4.16). A radial 4 (Figura 4.22 B) foi a que apresentou a maior variação de salinidade, com valores de 35,3 na região mais próxima à costa e de 36,3 no largo, mostrando variação de 0,03 km⁻¹. Para as radiais 1 e 2 (Figura 4.22 A) observamos a presença de máximos relativos (36,4), na região mais próxima à costa.

A densidade (Figura 4.23 A e B), assim como observado para a salinidade, mostrou-se bastante homogênea nesta época do ano, com isopicnais variando de 22,9 a 24,3. A pequena variação térmica observada para esta época do ano não foi capaz de influenciar o campo de massa, sendo os valores quase-homogêneos em toda a região, não apresentando variação significativa (0,04 km⁻¹ entre a região mais costeira e a localizada ao largo). Entretanto, na superfície foram observados os menores valores, aumentando monotonicamente em direção ao fundo.

Figura 4.21: A - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.21: Continuação. B - Distribuição vertical de temperatura na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.22: A - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.22: Continuação. B - Distribuição vertical de salinidade na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.23: A - Distribuição vertical da densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.23: Continuação. B - Distribuição vertical da densidade convencional na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Como observado na distribuição horizontal de temperatura e salinidade para PCE e PCM (Figuras 4.15 e 4.16), na porção mais ao norte do domínio, nos primeiros 50 m de profundidade, foram observadas as menores temperaturas associadas à uma pequena variação de salinidade, indicando a presença de águas mais frias e ligeiramente menos salinas que a massa de água que ocupa grande parte da PCE e PCM. Este fato foi evidenciado na análise das distribuições verticais, com pequenas variações de temperatura e salinidade, não modificando de forma considerável a estrutura de massa da PCE e PCM, mostrando o caráter quase-homogêneo da plataforma continental nesta época do ano.

A presença marcante de água mais fria, onde podemos observar a presença de termoclina, e menos salina na porção norte do domínio e em profundidades localizadas abaixo dos primeiros 80 m de profundidade, associada a pequena variação térmica em toda a plataforma, mostra que a AT, influenciou de forma mais significativa a estrutura térmica da PCE e PCM neste período.

Para a PCI a variação vertical de temperatura na radial mais a leste da foz do Rio Jaguaribe (Radial 1, Figura 4.24 A), foi praticamente constante, da costa em direção ao largo, variando entre 27,6 °C e 27,7 °C. Este fato também é observado na radial 2, entretanto, foi observada maior variação, com valores variando entre 27,8 °C na superfície e 27,5 °C próximo ao fundo, resultando em uma amplitude de 0,03 °C e variação térmica vertical de 0,05 °C m⁻¹. A radial 3 (Figura 4.24 A), apresentou as maiores temperaturas na região próxima à foz do rio (27,9 °C), decaindo monotonicamente em direção ao largo (27,7 °C). Para as radiais 4 e 5 (Figura 4.24 B), o mesmo padrão foi observado, onde as maiores temperaturas ocorreram na região mais próxima da costa e decaíram em direção ao largo.

A estrutura vertical de salinidade (Figura 4.25 A, B) apresentou-se de forma quase-homogênea, comportamento também observado na PCE e PCM. Diferentemente da variação de salinidade observada na estação de chuva, na estação de seca, com os aporte fluviais minimizados e/ou praticamente inexistentes, podemos observar o caráter quase-homogêneo da PCI na ausência de AR, com um domínio da AC.

A estrutura de massa (Figura 4.26, A e B) observada na PCI foi fortemente influenciada pelos campos de temperatura e salinidade (Figuras 4.24 e 4.25), mostrando os

maiores valores junto à costa. A estrutura de massa foi pouco variável em todas as radiais. Entretanto, podemos observar para as radiais 4 e 5 (Figura 4.26, B), zonas de máximos de densidade convencional, com as isopícnais praticamente verticalizadas. Somente a radial 2 (Figura 4.26, A) mostrou um aumento dos valores de σ_t da superfície em direção ao fundo, variando de 23,5 a 24,0.

No estuário do Rio Jaguaribe, a variação de temperatura na ZR/ZM (Figura 4.27, painel superior) foi tipicamente de águas continentais em evento de maré vazante, variando entre 28,9 e 29,5 °C, enquanto que em maré enchente, observamos uma mistura da AR com AT, onde a variação observada foi de 28,1 °C a 28,5 °C. Este comportamento também foi observado na ZM/ZC (Figura 4.27, painel inferior). Entretanto, esta região do estuário apresentou temperaturas, na maior parte do tempo, compatíveis com as observadas para a PCI (Figura 4.24 A e B).

A salinidade no Rio Jaguaribe na ZR/ZM (Figura 4.28, painel superior) apresentou comportamento típico de águas estuarinas, variando entre 2 e 5 em maré vazante, e de 8 a 17 em maré enchente, mostrando a diluição da AC pela AR. O caráter vertical das isohalinas, demonstra um processo de total mistura no estuário. Na região da ZM/ZC (Figura 4.28, painel inferior), em maré vazante observamos uma massa de água tipicamente estuarina (AR/AC), enquanto que na maré enchente existe um amplo domínio da AC, onde os maiores valores foram encontrados junto ao fundo, sugerindo a presença de uma cunha salina.

Figura 4.24: A - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.24: B - Distribuição vertical de temperatura na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.25: A - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.25: B - Distribuição vertical de salinidade na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.26: A - Distribuição vertical da densidade convencional na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, superior; radial 2, central; radial 3, inferior).

Figura 4.26: B - Distribuição vertical da densidade convencional na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, superior; radial 5, inferior).

Figura 4.27: Variação vertical de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) nas interfaces ZR/ZM (A, superior) e ZM/ZC (B, inferior) para a estação de seca.

Figura 4.28: Variação vertical de salinidade nas interfaces ZR/ZM (A, superior) e ZM/ZC (B, inferior) para a estação de seca.

4.1.3 Diagramas T-S.

4.1.3.1 - Estação de Chuva.

A - Diagrama T-S Espalhado.

Os diagramas T-S para a estação de chuva, referentes a PCE, PCM e PCI (Figura 4.29), possui forma triangular fechada, indicando a presença de mistura entre a quente e salobra AR, a salina AC e a AT.

Nota-se que, a influência da AT nas massas de água da plataforma foi pequena, ficando restrita às isopícnais maiores que 24 ($\sigma_t \geq 24$). Entre as isopícnais de 22 e 24, temos o predomínio de AC e, para ($\sigma_t = 20$), observamos a mistura da AC com a AR. Este comportamento nos leva a delimitar a área de atuação da AR na PCI, enquanto que a AC atua desde a região mais próxima à costa (PCI) até a quebra da PC, onde encontra a AT.

Figura 4.29: Diagrama T-S espalhado para a PCE, PCM e PCI durante a estação de chuva de 2009. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).

Para o estuário do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 4.30), observamos que os pares T-S ficaram localizados abaixo da isopical de 5 ($\sigma_t \leq 5$), mostrando a forte influência dos fluxos continentais no sistema estuarino.

Figura 4.30: Diagrama T-S espalhado para o estuário do Rio Jaguaribe durante a estação de chuva de 2009, para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).

B - Diagrama T-S Volumétrico.

O diagrama T-S volumétrico (Figura 4.31) apresenta como característica a predominância de águas relativamente quentes ($T \geq 27^\circ\text{C}$) e com salinidades próximas a 35, confirmando a grande influência da AC na região da PCE e PCM. O volume da AC, foi em média de 30 km^3 , chegando a 80 km^3 . Águas relativamente frias ($T \leq 26^\circ\text{C}$) e com salinidades $\geq 35,8$ caracterizam a presença da AT na PC neste período, compondo o segundo grupo, com volume médio de 20 km^3 , podendo chegar a 30 km^3 .

Figura 4.31: Diagrama T-S volumétrico para a PCE, PCM e PCI durante a estação de chuva de 2009.

4.1.3.2 - Estação de Seca.

A - Diagrama T-S Espalhado.

Para a estação de seca o diagrama T-S espalhados (Figura 4.32) mostrou a mistura entre AC e a AT. Nesta época do ano, não houve massas de água com salinidades menores que 30 ($S \leq 35$) e temperaturas maiores que 28°C , na plataforma continental. Aparentemente, a mistura das massas de água AC e AT sobre a plataforma continental foi mais pronunciada que a observada na estação de chuva. Este comportamento é evidenciado ao observarmos a disposição dos pontos T-S entre as isopícnais de 23 e 24. A isopícnal de 24 (σ_t) evidencia a presença da AT sobre a plataforma. A disposição assimétrica dos pares T-S sobre o plano ($23 \leq \sigma_t \leq 24$) sugere maior atuação da AT nesta época do ano.

Figura 4.32: Diagrama T-S espalhado para a PCE, PCM e PCI durante a estação seca de 2009. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).

Para o estuário do Rio Jaguaribe a disposição dos pares T-S sobre o diagrama T-S espalhado (Figura 4.33), mostram a presença de três massas de água. Uma massa de água de origem estritamente continental, que é caracterizada por pequenas salinidades ($S \leq 5$) e elevadas temperaturas ($T \geq 28^\circ\text{C}$) e outra que é o resultado da mistura desta massa de água com a AC, e que tem características de uma massa de água salobra ($5 \leq S \leq 30$) comumente denominada de água estuarina.

A massa de água de origem continental ficou restrita à $\sigma_t \leq 5$, enquanto que a massa de água estuarina concentrou-se entre $5 \leq \sigma_t \leq 20$. À AC concentrou-se na região cuja densidade convencional foi maior que 20 ($\sigma_t \geq 20$). O que no período de seca chamamos de AR, uma massa de água quente e salina, foi a combinação entre a AC e a massa de água estuarina. Para o estuário do Rio Jaguaribe podemos dizer que a distribuição dos pares T-S (Figura 4.33) delimita as interfaces ZR/ZM, região com valores de $\sigma_t \leq 5$, e ZM/ZC regiões com $\sigma_t \geq 20$. Os valores observados são corroborados pelos resultados obtidos por Dias (2005), que adotou os critérios de classificação sugeridos por Miranda et al. (2002).

Figura 4.33: Diagrama T-S espalhado para o estuário do Rio Jaguaribe durante a estação seca de 2009. As isolinhas representam a densidade convencional (σ_t).

B - Diagrama T-S Volumétrico.

Na estação de seca, o diagrama T-S volumétrico apresentou como volume de água dominante aquele associado a salinidades e temperaturas relativamente altas ($S \geq 35$ e $T \geq 26^\circ\text{C}$), com forte influência da AT (Figura 4.34). Os volumes observados foram em média de 40 km^3 , podendo chegar a 70 km^3 . Águas com influência da AC são notáveis sobre a PC. Ao compararmos o diagrama T-S volumétrico da estação de seca (Figura 4.34) com o obtido na estação chuvosa (Figura 4.31) podemos observar na região mais próxima à costa a predominância de águas relativamente quentes ($T > 28^\circ\text{C}$) e com salinidades próximas a 35, confirmando a presença da AC. Águas com aporte de AT, caracterizadas por salinidades maiores que 36 e temperaturas maiores que 25°C , compoem o segundo grupo de influência, ocupando a porção mais ao largo da PC.

Figura 4.34: Diagrama T-S volumétrico para a PCE, PCM e PCI durante a estação seca de 2009.

4.1.4 Massas de Água.

4.1.4.1 - Estação de Chuva.

Através da aplicação do método descrito na seção 3.2.1, foram calculadas as distribuições percentuais dos três tipos de água, para as estações de chuva e seca, envolvendo todas as estações da plataforma continental (PCE, PCM e PCI) e estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC).

Os índices termohalinos foram escolhidos com base nos diagramas T-S espalhados das Figuras 4.29, 4.30, 4.32 e 4.33, nos quais podemos observar uma pequena variabilidade temporal dos índices para AR e AT. Desta forma, escolhemos índices únicos para essas massas de água, para os períodos de chuva e seca. Por outro lado, a AC apresentou variação sazonal dos seus índices, nos levando a escolher índices diferentes para AC para a estação chuvosa e de seca. Desta forma, a comparação do percentual de AC durante os cruzeiros realizados na plataforma continental e no estuário adquirem maior significado, pois está referenciada a um único índice por estação.

Tabela 4.1: Índices termohalinos utilizados nos cálculos dos percentuais de massa de água na plataforma continental e estuário do Rio Jaguaribe.

Tipo de Água	Temperatura (°C)	Salinidade
CHUVA		
AR	29	30
AC	29	35
AT	25,5	36,3
SECA		
AR	29	30
AC	27	35,5
AT	25,5	36,3

As distribuições horizontais das três massas de água na PCE, PCM e PCI são apresentadas nas Figuras 4.35 e 4.36. Para a região da PCE e PCM, é observado domínio da AC, desde a região mais costeira até o largo (Figura 4.35), e verticalmente esse domínio é observado desde a superfície até os primeiros 30 m de profundidade (Figuras 4.37 A). A distribuição vertical mostra que abaixo dos primeiros 50 m de profundidade pode-

mos observar uma zona de mistura entre a AC e a AT. Na porção mais ao largo do domínio (Figuras 4.37 B), observou-se maior atuação da AT, localizada espacialmente entre as isóbatas de 50 e 100 m. Neste período não foi observada a presença de AR. Para a PCI, em superfície (Figura 4.36, A), observamos a presença da AR em todo o domínio, promovendo mistura com a AC em meia água e no fundo (Figuras 4.36, B e C). Em meia água e no fundo, mesmo com a mistura pronunciada entre AR e AC, observa-se domínio da AC.

A estrutura vertical dos percentuais de massas de água para PCE e PCM mostra nas radiais mais a leste da foz do Rio Jaguaribe (radiais 1,2 e 3, Figura 4.37 A), amplo domínio da AC nos primeiros 50 m de profundidade. Para as radiais mais a oeste (radiais 4 e 5, Figura 4.37 B), o mesmo comportamento é observado. Entretanto, abaixo dos primeiros 50 m de profundidade, observamos a mistura entre a AC e AT, e logo abaixo desta faixa, observamos o topo da AT. Desta forma, sugere-se que a AT ficou confinada a profundidades abaixo dos primeiros 50 m de profundidade e espacialmente localizada entre as isóbatas de 50 e 100 m, a uma distância média da costa de 35 km.

Na PCI, como vimos na distribuição horizontal, a AR domina praticamente toda a região, sendo claramente observada em todas as 5 radiais (Figura 4.38, A e B). Mesmo diante de um elevado fluxo continental, a AR ocupou apenas os três primeiros metros da coluna de água, gerando um rebaixamento do topo da AC em profundidades menores que 3 m e alcançando uma distância da costa de aproximadamente 6 km. Logo abaixo da zona de mistura entre as massa de água (AR/AC), observamos a AC sendo influenciada pela AR.

Um amplo domínio da AR nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 4.39) durante um ciclo completo de maré, evidencia os elevados fluxos fluviais observados nesta estação do ano. O amplo domínio da AR em todo o estuário se refletiu na formação da pluma estuarina na PCI (Figura 4.36).

Figura 4.35: Percentuais de massas de água na superfície (superior, esquerdo), 10 m (superior, central), 20 m (superior, direito), 30 m (inferior esquerdo), 50 m (inferior central) e no fundo (inferior direito), para a estação de chuva na PCE e PCM.

Figura 4.36: Percentuais de massas de água superficial (superior, esquerdo), à meia água (superior, direito) e fundo (inferior), durante a estação de chuva na PCI.

Figura 4.37: A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).

Figura 4.37: Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de chuva. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).

Figura 4.38: A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de chuva. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).

Figura 4.38: Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de chuva. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).

Figura 4.39: Distribuição vertical dos percentuais de massas de água para o estuário do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM, A (07:00 hs), B (12:00 hs), C (19:00 hs), e ZM/ZC, D (07:00 hs), E (12:00 hs), F (19:00 hs), para a estação de chuva.

4.1.4.2 - Estação de Seca.

Para a estação de seca, a distribuição das massa de água na PCE e PCM (Figura 4.40) mostrou comportamento diferenciado do observado durante a estação de chuva. Enquanto que na estação de chuva a mistura entre AC e AT ficou restrita a profundidades abaixo dos primeiros 50 m, na época de seca essa mistura se fez sentir em superfície. Essa zona de mistura variou verticalmente da superfície ao fundo (Figuras 4.42 A e B) e espacialmente entre as isóbatas de 30 e 100 m (Figura 4.40). Nas profundidades abaixo dos primeiros 50 m, observou-se o topo da AT, tanto na distribuição horizontal (Figura 4.40) quanto na distribuição vertical (Figuras 4.42 A e B). As distribuições percentuais horizontais e verticais sugerem maior atuação da AT na PCE e PCM durante a estação chuvosa, embora a AC domine grande parte da plataforma continental, exceto na porção norte do domínio em que a AT aparece de forma mais pronunciada. O comportamento destoante observado na PCE e PCM entre as duas estações também ocorreu na PCI, onde o domínio da AR nos primeiros metros de coluna de água não foi observado na estação seca, tendo a AC dominado a região.

As distribuições verticais vêm corroborar o exposto para as distribuições horizontais, mostrando o aumento da zona de mistura entre AC e AT na PCE e PCM (Figura 4.42, A e B). Os percentuais mostram mistura mais intensa entre AC/AT durante a estação de seca, ocupando toda a plataforma continental nos primeiros 50 m de profundidade, onde o topo da AT apareceu de forma mais intensa. Na PCI o domínio da AC é evidenciado por toda a região, não apresentando zonas de mistura com a AR.

Para o estuário do Rio Jaguaribe, na interface ZR/ZM, podemos observar a mistura entre AR/AC em maré vazante (Figura 4.44, A), que se repetiu em evento de maré enchente (Figura 4.44, C), mas mostrando domínio da AR, que chegou a 100% na estufa da maré (Figura 4.44, B). Na interface ZM/ZC, em evento de maré vazante a mistura se repetiu, com um pequeno domínio da AR (Figura 4.44, D), enquanto que na estufa de maré o domínio se inverteu, passando a ser da AC (Figura 4.44, E). Em maré enchente o domínio da AC chegou a 100%, mostrando a forte influência da AC oriunda da PC adjacente (Figura 4.44, F).

Figura 4.40: Percentuais de massas de água na superfície (superior, esquerdo), 10 m (superior, central), 20 m (superior, direito), 30 m (inferior, esquerdo), 50 m (inferior, central) e no fundo (inferior, direito), para a estação de seca na PCE e PCM.

Figura 4.41: Percentuais de massas de água superficial (superior, esquerdo), à meia água (superior, direito) e fundo (inferior), durante a estação de seca na PCI.

Figura 4.42: A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).

Figura 4.42: Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCE e PCM, durante a estação de seca. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).

Figura 4.43: A - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de seca. (radial 1, painel superior; radial 2, painel central; radial 3, painel inferior).

Figura 4.43: Continuação. B - Distribuição vertical dos percentuais de massas de água na PCI, durante a estação de seca. (radial 4, painel superior; radial 5, painel inferior).

Figura 4.44: Distribuição vertical dos percentuais de massas de água para o estuário do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM, A (07:00 hs), B (12:00 hs), C (19:00 hs), e ZM/ZC, D (07:00 hs), E (12:00 hs), F (19:00 hs), para a estação de seca.

4.1.5 Frentes.

Segundo Castro (1996), as frentes térmicas ou halinas na plataforma continental podem ser identificadas como zonas de intensificação dos gradientes quase-horizontais dessas propriedades. Como mencionado e descrito nas Seções 4.1.1 e 4.1.2, os dados hidrográficos sugerem a presença de três frentes: duas delas separam a plataforma externa da média, podendo ser chamadas de **Frente Térmica de Fundo (FTF)** e de **Frente Halina Superficial (FHS)**; a terceira separa a plataforma média da interna, tendo características de Frente de Pluma (FP).

Para a localização da FTF plotamos os valores médios de temperatura dos 10 metros mais profundos, para cada estação, contra a distância entre a estação e a costa, respectivamente. Este procedimento foi realizado para cada estação e em cada uma das radiais, localizadas na PCE e na PCM (Figura 4.45), para os períodos de chuva e seca. Para a região da PC mais ao largo podemos observar a FTF de forma bem definida (Figura 4.45). Nota-se que, nas proximidades da quebra da plataforma continental (QPC) há uma região de transição, onde o gradiente quase-horizantal de temperatura passa de valores maiores para valores menores. O ponto de inflexão onde ocorre essa transição indica o limite interno da FTF, ou o limite externo da plataforma média. Este limite esteve a cerca de 55 km da costa. A FTF indica, nas proximidades do fundo, o limite interno de influência de águas de origem oceânica.

A FHS foi posicionada plotando os valores médios de salinidade nos primeiros 15 m de profundidade de coluna de água na PCE e PCM contra a distância entre a estação e a costa (Figura 4.46). Para a estação de chuva, a FHS aparece a cerca de 55 km da costa, praticamente na mesma posição da FTF (Figura 4.46,A). Para a estação de seca (Figura 4.46,B) a FHS aparece mais próxima da costa, a cerca de 45 km de distância da linha costeira. Os pontos de inflexão para as estações de chuva e seca indicam aproximadamente a posição do limite externo da PCM e, por outro lado, a distância de intrusão da AT. As posições da FTF e da FHS nas duas estações do ano, comparativamente, sugerem que durante a estação seca a intrusão da AT na PC é maior e, além disso, há maior influência dessa massa de água na camada superficial da PCE.

A FP foi posicionada plotando os valores médios de salinidade nos primeiros 4 m de profundidade de coluna de água para a PCI, contra a distância entre a estação e a

costa (Figura 4.46). Para as estações de chuva a FP aparece bem definida na região da PCI, demarcada por uma zona de transição entre 5 e 6 km da linha de costa (Figura 4.46,C e D). Esta zona transicional é posicionada pela presença dos pontos de inflexão para a estação de chuva, demarcando o limite externo da PCI.

Figura 4.45: Distribuição espacial, ao longo das radiais, da temperatura média entre a maior profundidade amostrada em cada estação hidrográfica e os 10 primeiros metros acima para PCE e PCM na estação de chuva (A) e na estação de seca (B).

Figura 4.46: Distribuição espacial, ao longo das radiais, da salinidade média entre a superfície e 15 metros abaixo na plataforma continental e 3 metros abaixo na região da pluma. A - PC na estação de chuva. B - PC na estação de seca. C - PCI na estação de chuva. D - PCI na estação de seca.

4.2 Correntes: Observações.

Neste capítulo, estudaremos a variação espacial e temporal dos campos de correntes e ventos na PCE, PCM, PCI e estuário do Rio Jaguaribe, com o objetivo de determinarmos as escalas temporais típicas para as oscilações predominantes. Ainda com o intuito de proporcionar um melhor entendimento, tentaremos estabelecer relações de causa efeito, identificando as forçantes com as respostas observadas no campo de correntes.

4.2.1 Forçante Meteorológica: Vento.

Nesta Seção apresentaremos os resultados para o campos de vento na PCCE e região oceânica adjacente, para as estações de chuva e seca. A metodologia utilizada na aquisição dos dados foi apresentada na Seção 3.2.2, para o período dos cruzeiros oceanográficos (Tabela 3.1). Utilizamos os dados de ventos da semana anterior à data de início dos cruzeiros, em virtude do ajuste geostrófico corresponder ao período inercial, que na latitude de -4°S , corresponde a aproximadamente 7 dias.

4.2.1.1 - Variação espacial.

Estação de Chuva.

A Figura 4.47 mostra a média diária da tensão de cisalhamento do vento (TCV) entre os dias 09 e 23 de junho de 2009. A principal característica observada é a predominância de vento com direção W-NW. Para os dias 09 e 15 de junho (Figura 4.47, A e B), a direção preferencial do vento foi para NW, enquanto que nas Figuras 4.47 C e D a direção preferencial foi para W. Este comportamento é decorrência da presença da ZCIT sobre a região, gerando o padrão de ventos para W.

A variação da intensidade do vento local foi de $0,51 \text{ m s}^{-1}$ a $8,74 \text{ m s}^{-1}$, com valores médios de $3,32 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 1,63 \text{ m s}^{-1}$. Os dados de vento apresentaram variância de $2,6 (\text{m}^2 \text{ s}^{-2})$ e direção média de 310° . Este padrão é evidenciado também por Camelo et al. (2008) em estudo sobre a variabilidade sazonal do vento na costa cearense.

Figura 4.47: Tensão de cisalhamento do vento (dyn.cm^2) obtida a partir dos dados do QuikSCAT durante a estação de chuva. A - Dia 09/06/2009. B - Dia 15/06/2009. C - 19/06/2009. D - 23/06/2009.

Estação de Seca.

Durante a estação de seca, os ventos apresentaram direção preferencial para W durante a realização dos cruzeiros oceanográficos (Figura 4.48). Entretanto, podemos observar que entre Fortaleza e o estuário do Rio Jaguaribe, a direção predominante do vento foi para W-SW. Analisando os dados da estação meteorológica de Fortim, observamos que a intensidade dos ventos variaram entre $1,02 \text{ m s}^{-1}$ e $10,3 \text{ m s}^{-1}$, com média de $4,86 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 1,73 \text{ m s}^{-1}$. A variância observada foi de $3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ e direção média de 282° .

4.2.1.2 - Variação temporal.

Para o sistema de coordenadas adotado, a direção de máxima variância foi aproximadamente paralela à direção média das isobatimétricas, enquanto que a direção de mínima variância foi perpendicular. Desta forma, para facilitar a discussão dos dados, adotaremos os termos *componente paralela* e *componente normal*, para as componentes v e u do vento, respectivamente.

Seguindo o comportamento geral apresentado nas Figuras 4.47 e 4.48 para a região da PCCE, a variação temporal do vento local da costa leste cearense, nas estações de chuva e seca, variou entre $7,9$ e $8,9 \text{ m s}^{-1}$, o que mostra o mesmo padrão para as diferentes épocas do ano (Figura 4.49).

A variação das frequências sinótica e diurna podem ser observadas na Tabela 4.2. Analisando as componentes paralela e normal na frequência sinótica, observamos que a componente paralela na estação de chuva variou entre $6,50 \text{ m s}^{-1}$ e $-1,17 \text{ m s}^{-1}$, com média de $3,58 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 1,03$. A componente normal apresentou menor amplitude de variação, com valores entre $-2,03 \text{ m s}^{-1}$ e $2,50 \text{ m s}^{-1}$, com média de $0,14 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 0,91$. Na estação de seca, o mesmo comportamento foi observado, prevalecendo a maior amplitude de variação da componente paralela: os valores observados foram de $-6,56 \text{ m s}^{-1}$ e $-2,71 \text{ m s}^{-1}$, com valores médios de $4,68 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 0,92$ para a componente paralela às isóbatas, e de $-0,08 \text{ m s}^{-1}$ a $3,49 \text{ m s}^{-1}$, com média de $1,58 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 0,70$ para a componente perpendicular às isóbatas (Figura 4.49).

Figura 4.48: Tensão de cisalhamento do vento (dyn.cm^2) obtida a partir dos dados do QuikSCAT durante a estação de seca. A - Dia 09/10/2009. B - Dia 15/10/2009. C - 19/10/2009. D - 23/10/2009.

Para frequências diurnas, na estação de chuva a componente paralela, variou entre $-8,64 \text{ m s}^{-1}$ e $0,04 \text{ m s}^{-1}$ com média de $3,98 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 1,59$, enquanto que a componente normal apresentou variação de $-4,81 \text{ m s}^{-1}$ a $6,41 \text{ m s}^{-1}$ com valores médios de $0,66 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 1,67$. Na estação de seca, a variação para as componentes paralela e normal foram de $-8,75 \text{ m s}^{-1}$ a $0,70 \text{ m s}^{-1}$ com média de $3,99 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 1,60$, e de $-5,60 \text{ m s}^{-1}$ a $5,28 \text{ m s}^{-1}$ com média de $0,67 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 1,43$, respectivamente. Note que, diferentemente da variabilidade sinótica, as variações observadas na frequência diurna foram maiores na direção normal, entretanto, as maiores médias ocorreram na direção paralela.

Tabela 4.2: Primeiros momentos estatísticos para a variação temporal do campo de vento, para as estações de chuva e seca de 2009. **Min** é o valor mínimo e **Max** o valor máximo.

Frequência	Variável	Min	Max	Média	Desvio
CHUVA					
Sinótica	u	-2,03	2,50	0,14	0,91
	v	-1,17	6,50	3,58	1,03
Diurna	u	-4,81	6,41	0,66	1,67
	v	-8,64	0,04	3,98	1,59
SECA					
Sinótica	u	-0,08	3,49	1,58	0,70
	v	-2,71	6,56	4,68	0,92
Diurna	u	-5,60	5,28	0,67	1,43
	v	-8,75	0,70	3,99	1,60

Em uma análise das variâncias nas frequências de interesse, podemos observar que os ventos na escala sinótica, são responsáveis pela variância na estação de chuva em: 24% na componente normal e de 69%, para a componente paralela. Na estação de seca, a variância observada para as componentes normal e paralela foram de 22% e 73%, respectivamente. A Figura 4.49 mostra a variação total do vento, e das frequências sinótica e diurna para as estações de chuva e seca de 2009.

Figura 4.49: Variação total do vento nas estações de chuva (painel superior, esquerdo) e seca (painel superior, direito). Variação do vento na frequência sinótica nas estações de chuva (painel intermediário, esquerdo) e seca (painel intermediário, direito). Variação do vento na frequência diurna nas estações de chuva (painel inferior, esquerdo) e seca (painel inferior, direito). A variação de cores representa a intensidade dos ventos (m s^{-1}); a seta representa a direção (em graus) e intensidade do vento médio (m s^{-1}); a linha em preto representa a direção média das isóbatas.

4.2.1.3 - Domínio da frequência.

Os espectros de energia das componentes paralela e normal da TCV, na banda submaregráfica, para as estações de chuva e seca são apresentados na Figura 4.50. Durante a estação de chuva, para a TCV não são observados máximos significativos de energia, embora haja indicações de valores maiores para as frequências entre 0,4 e 0,5 cpd e 0,25 cpd para a componente paralela da TCV e próxima a 0,5 cpd para a componente perpendicular dessa mesma tensão. Entretanto, durante a estação de seca, não observamos máximos significativos de energia.

Figura 4.50: Espectro de energia para a TCV nas estações de chuva (painel superior) e seca (painel inferior) para o ano de 2009.

4.2.2 Campo de Correntes.

Os resultados da distribuição horizontal do campo de velocidades, para as regiões da PCE, PCM e PCI nas estações de chuva e seca, referem-se às profundidades superficiais, à meia água e fundo.

4.2.2.1 - Correntes na PCE, PCM e PCI na Estação de Chuva.

O campo de correntes na PCE e PCM, na estação de chuva, apresentou direção preferencial para NW, da superfície ao fundo, seguindo a direção média das isóbatas locais. Em superfície (Figura 4.50 A), as velocidades variaram entre $-0,80$ e $0,67 \text{ m s}^{-1}$. Entretanto, as magnitudes observadas decaíram em direção ao fundo, variando entre $-0,73$ e $0,64 \text{ m s}^{-1}$ em meia água, e entre $-0,38$ e $0,35 \text{ m s}^{-1}$ junto ao fundo (Figura 4.50 A e B).

Para a PCI, as velocidades foram um pouco maiores que as observadas na PCE e PCM, com direção preferencial W-NW, variando entre $-0,91$ e $0,92 \text{ m s}^{-1}$ em superfície, entre $-0,87$ e $0,78 \text{ m s}^{-1}$ a meia água, e entre $-0,38$ a $0,36 \text{ m s}^{-1}$ junto ao fundo (Figura 4.51 A e B).

Outra característica do campo de correntes na PCE e PCM é a ocorrência das maiores velocidades na região mais próxima à costa, diminuindo monotonicamente suas intensidades em direção ao largo, na forma de jato costeiro.

Para a PCI as maiores velocidades foram observadas na região ao largo da foz do estuário do rio Jaguaribe, diminuindo consideravelmente com a proximidade da costa. Este fato se deve à forte intrusão de águas continentais na região da pluma estuarina, fazendo com que as velocidades dos movimentos das massas de água na região (movimento norte-sul para AR e movimento leste-oeste para AC) fossem menores que as observadas ao largo.

Entretanto, mesmo com o grande aporte fluvial observado nesta estação do ano, que resultou na formação de uma pluma estuarina que chegou a 6 km da costa e gerou o rebaixamento do topo da AC, como demonstrado na Seção 4.1.4, não observamos uma inversão do campo de correntes na PCI: as velocidades de superfície e meia água diminuíram monotonicamente com o aumento da profundidade, chegando a valores mínimos junto ao fundo.

Figura 4.50: A - Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCE e PCM, para a estação de chuva de 2009, em superfície (painel superior) e meia água (painel inferior).

Figura 4.50: B - Distribuição do campo de correntes (m s⁻¹) na PCE e PCM, para a estação de chuva de 2009, no fundo.

Figura 4.51: A - Distribuição do campo de correntes (m s⁻¹) na PCI, para a estação de chuva de 2009, em superfície.

Figura 4.51: B - Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCI, para a estação de chuva de 2009, a meia água (painel superior) e fundo (painel inferior).

A Tabela 4.3 , mostra os momentos estatísticos das componentes paralela e normal às isobatimétricas, evidenciando que as velocidades paralelas (v) são mais energéticas que velocidades normais (u) para as regiões da PCE, PCM e PCI.

Tabela 4.3: Primeiros momentos estatísticos para a distribuição horizontal do campo de correntes na **PCE**, **PCM** e **PCI** na estação de chuva. u e v , referem-se às componentes normal e paralela à batimetria local, respectivamente. **Prof** é a profundidade; **Min** é o valor mínimo e **Max** o valor máximo, ambas em m s^{-1} . **Amp** e **Var** são as amplitudes (s^{-1}) e a variância ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão a média (m s^{-1}).

Variável	Prof.	Min	Max	Amp	Média	Desvio	Var
PCE e PCM							
u	Superfície	-0,59	0,73	1,32	0,21	0,05	0,0023
	Meia Água	-0,47	0,70	1,17	0,10	0,03	0,0020
	Fundo	-0,18	0,17	0,35	0,04	0,02	0,0010
v	Superfície	-1,02	1,00	2,02	0,36	0,06	0,0028
	Meia Água	-0,96	0,98	1,94	0,25	0,04	0,0024
	Fundo	-0,22	0,18	0,40	0,14	0,01	0,0018
PCI							
u	Superfície	-0,77	0,79	1,56	0,06	0,02	0,0018
	Meia Água	-0,51	0,57	1,02	0,02	0,01	0,0016
	Fundo	-0,09	0,11	0,20	0,01	0,01	0,0010
v	Superfície	-0,86	0,92	1,72	0,19	0,08	0,0040
	Meia Água	-0,58	0,63	1,15	0,20	0,06	0,0030
	Fundo	-0,16	0,18	0,34	0,10	0,01	0,0026

4.2.2.2 - Correntes na PCE, PCM e PCI na Estação de Seca.

Para a estação de seca, o campo de correntes apresentou a mesma direção observada na estação chuvosa, fluindo preferencialmente para NW em todas as profundidades. As velocidades observadas em superfície (Figura 4.52 A) variaram entre $-0,98 \text{ m s}^{-1}$ e $1,04 \text{ m s}^{-1}$. Nas profundidades mais abaixo, a meia água e no fundo, as correntes variaram entre $-0,90 \text{ m s}^{-1}$ e $0,96 \text{ m s}^{-1}$, e entre $-0,54 \text{ m s}^{-1}$ a $0,50 \text{ m s}^{-1}$ para meia água e fundo, respectivamente (Figuras 4.52 B).

Diferente do comportamento observado durante a estação de chuva, onde as veloci-

dades das correntes na região da PCI foram relativamente maiores que as observadas na PCE e PCM, as intensidades na PCI para a estação seca foram menores do que na PCE e PCM. Em superfície e meia água (Figura 4.53 A e B), as velocidades variaram entre $-0,54 \text{ m s}^{-1}$ e $0,62 \text{ m s}^{-1}$ e entre $-0,46 \text{ m s}^{-1}$ a $0,50 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. As menores velocidades foram observadas junto ao fundo (Figura 4.53 B), com variação entre $-0,30 \text{ m s}^{-1}$ e $0,33 \text{ m s}^{-1}$.

O comportamento das correntes para a PCE e PCM observado na estação de chuva foi novamente observado na estação de seca, quando as maiores velocidades ocorreram na região mais próxima à costa, da superfície ao fundo, entre as isóbatas de 10 e 30 m. Assim como na estação de chuva, observou-se que na PCI as maiores velocidades ocorreram na região ao largo da foz do Rio Jaguaribe, comportamento oposto ao observado para a região da PCE e PCM, diminuindo gradativamente em direção à costa.

Figura 4.52: A - Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCE e PCM, para a estação de seca de 2009, em superfície.

Figura 4.52: B - Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCE e PCM, para a estação de seca de 2009, a meia água (painel superior) e no fundo (painel inferior).

Figura 4.53: A - Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCI, para a estação de seca de 2009, em superfície (painel superior) e a meia água (painel inferior).

Figura 4.53: B - Distribuição do campo de correntes (m s^{-1}) na PCI, para a estação de seca de 2009, no fundo.

Em uma análise das componentes u e v (Tabela 4.4) para as regiões da PCE, PCM e PCI, assim como na estação de chuva, podemos observar que a componente v foi a mais energética.

Tabela 4.4: Primeiros momentos estatísticos para a distribuição horizontal do campo de correntes na PCE, PCM e PCI na estação de seca. u e v , referem-se às componentes normal e paralela à batimetria local, respectivamente. **Prof** é a profundidade; **Min** é o valor mínimo e **Max** o valor máximo, ambas em m s^{-1} . **Amp** e **Var** são as amplitudes (s^{-1}) e a variância ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão a média (m s^{-1}).

Variável	Prof.	Min	Max	Amp	Média	Desvio	Var
PCE e PCM							
u	Superfície	-0,67	1,12	1,79	0,18	0,04	0,0017
	Meia Água	-0,52	0,97	1,49	0,16	0,03	0,0012
	Fundo	-0,27	0,25	0,52	0,15	0,02	0,0009
v	Superfície	-0,97	0,98	1,95	0,23	0,06	0,0032
	Meia Água	-0,89	0,82	1,71	0,10	0,02	0,0024
	Fundo	-0,40	0,31	0,71	0,08	0,01	0,0010
PCI							
u	Superfície	-0,50	0,41	0,91	0,91	0,03	0,0015
	Meia Água	-0,43	0,37	0,80	0,12	0,01	0,0010
	Fundo	-0,36	0,26	0,62	0,10	0,03	0,0007
v	Superfície	-0,43	0,55	0,98	0,12	0,05	0,0030
	Meia Água	-0,39	0,50	0,89	0,10	0,04	0,0024
	Fundo	-0,28	0,40	0,68	0,08	0,04	0,0022

4.2.2.3 - Função de Corrente e Campos de Velocidades Não-Divergente.

Nesta Seção, serão apresentados os resultados alcançados para o mapeamento horizontal das funções de corrente e dos campos de velocidade não-divergente para as estações de chuva e seca, para a superfície, na PCE, PCM e PCI.

Estação de Chuva.

Na Figura 4.54, podemos observar que o mapeamento horizontal da função de corrente e do campo de velocidade não-divergente para a superfície confirma os resultados observados na Seção 4.2.2 (Figuras 4.50 A e B): as maiores velocidades do campo não-divergente foram observadas também na região mais próxima à costa, decaindo monotonicamente em direção ao largo. As maiores velocidades obtidas na região mais

próxima à costa foram de $0,7 \text{ m s}^{-1}$, enquanto que na região mais ao largo os valores ficaram em torno de $0,3 \text{ m s}^{-1}$.

Para a região da PCI, o mesmo comportamento descrito na Figura 4.51 da Seção 4.2.2, foi obtido para a velocidade não divergente: as maiores velocidades ocorreram na região ao largo da foz do Rio Jaguaribe, chegando a $0,77 \text{ m s}^{-1}$. As velocidades decaíram em direção à costa, apresentando valores próximos a $0,1 \text{ m s}^{-1}$.

Figura 4.54: Mapeamento horizontal da função de corrente ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) e da velocidade não-divergente (m s^{-1}) para a estação de chuva de 2009. As figuras da parte superior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCE e PCM. As Figuras da parte inferior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCI.

Os percentuais de contribuição do campo de velocidade não-divergente para a velocidade observada foram de 85,5% para PCE e PCM, e de 82,6% para a região da PCI, quantificando a importância das correntes não-divergentes para a estação chuvosa.

Estação de Seca.

Assim como observado na estação chuvosa, os campos obtidos com o mapeamento horizontal da função de corrente e das velocidades não-divergentes para a época de seca apresentaram o mesmo comportamento observado para a distribuição horizontal do campo de velocidades, mostrados na Seção 4.2.2 (Figura 4.52).

As maiores velocidades do campo não-divergente ocorreram entre as isóbatas de 10 e 20 m para a PCE e PCM, chegando a valores de $0,88 \text{ m s}^{-1}$, decaindo monotonicamente em direção ao largo, onde nas proximidades da isóbata de 100 m, as velocidades foram de $0,26 \text{ m s}^{-1}$. Na região da PCI, assim como observado na estação chuvosa (Figura 4.53 da Seção 4.2.2), as maiores velocidades ocorreram ao largo da costa, chegando a valores de $0,52 \text{ m s}^{-1}$, decaindo em direção à foz do Rio Jaguaribe, onde os valores foram de $0,18 \text{ m s}^{-1}$.

Os percentuais de contribuição do campo de velocidade não-divergente em relação aos campos observados, foram de 86% para PCE e PCM, e de 83,8% para a região da PCI, quantificando, novamente, maior importância das correntes não-divergentes para a estação de seca.

O que podemos observar para as duas estações do ano é que as velocidades não-divergentes apresentam direção preferencial para NW. Entretanto, para a estação de chuva, na região da PCI, podemos observar na região mais próxima à foz do Rio Jaguaribe uma pequena inversão no campo de velocidades e no mapeamento horizontal das velocidades não-divergentes na radial mais a leste da foz do rio. Este fato se deve, muito provavelmente, ao grande volume de água fluvial exportado pelo estuário do Rio Jaguaribe para a PCI, promovendo uma maior mistura entre a AR e AC. A mistura entre as duas massa de água na região da PCI, tende a inclinar as isopcnais na direção leste, conforme pode ser observado na Figura 4.54, gerando gradiente de pressão apontando para esta direção, ocasionando velocidades direcionadas para E-SE. Fato não observado na estação de seca, devido minimização dos fluxos fluviais, as

velocidades não-divergentes apresentaram direção preferencial para NW.

Figura 4.55: Mapeamento horizontal da função de corrente ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e da velocidade não-divergente (m s^{-1}) para a estação de seca de 2009. As figuras da parte superior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCE e PCM. As Figuras da parte inferior esquerda (Função de Corrente) e direita (velocidade não-divergente), referem-se à PCI.

4.2.2.4 - Variação Temporal do Campo de Correntes.

Estudaremos nesta Seção as correntes resultantes do fundeio realizado na isóbata de 30 m (Figura 3.1). A variabilidade temporal será analisada com o objetivo de determinarmos as escalas temporais típicas para as oscilações predominantes. Procurando entender o comportamento hidrodinâmico da PCCE, procuraremos, ainda, estabelecer

relações causa-efeito, identificando as forçantes com as respostas observadas no campo de correntes.

Diante disto, analisaremos qual a resposta das águas à ação do vento e das marés na região. Para isso, subdividiremos as séries de correntes nas duas frequências de interesse, **Submaregráfica** e **Maregráfica**, analisando-as no domínio do tempo e da frequência.

4.2.2.4.1 - Análise no Domínio do Tempo.

Estatística Básica: Estação de Chuva.

Os resultados do cálculo dos primeiros momentos estatísticos para as série de tempo de correntes são apresentados na Tabela 4.5. Para as profundidades de superfície, meia água e fundo, os valores máximos das componentes normais são, em geral, menores que os valores máximos da componente paralela. Os valores mínimos e médios seguem o mesmo padrão nas três profundidades. Ao compararmos as variâncias das componentes paralelas e normais, em todos os níveis, fica evidenciado que as primeiras são maiores que as segundas.

Assim, as correntes paralelas são, em geral, mais intensas e apresentam variabilidade temporal com maior energia do que as correntes normais. Entretanto, é necessário destacar que os desvios padrões da média foram maiores que as médias, em todas as profundidades. Os valores médios positivos para as componentes paralelas apresentadas na Tabela 4.5, indicam sentido preferencial das correntes para NW.

A redução de variância, obtida com a aplicação do filtro passa-baixa, é sistematicamente maior nas componentes normais do que nas componentes paralelas. Em superfície, a redução média da variância para a componente normal foi de 70%, enquanto que em meia água e no fundo a redução observada ficou entre 70 e 80%. Para a componente paralela, entretanto, a redução média foi de apenas 44% em superfície e de 36% em meia água e no fundo. Consequentemente, as correntes de maré são mais importantes para as componentes normais, nas quais contribuem com cerca de 65% da variância, do que para as componentes paralelas. Nestas últimas, a variância das correntes de maré chega no máximo a 30% da variância total.

Tabela 4.5: Primeiros momentos estatísticos para as séries correntográficas, total, submaregráfica e maregráfica na estação de chuva. U e V , referem-se às componentes normal e paralela à batimetrias local, respectivamente. u_t e v_t referem-se às variações totais, u_s e v_s à variabilidade submaregráfica e u_m e v_m à variabilidade maregráfica. **Prof** é a profundidade; **Min** é o valor mínimo e **Max** o valor máximo em $m s^{-1}$. **Amp** e **Var** são as amplitudes ($m s^{-1}$) e a variância ($m^2 s^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão da média em $m s^{-1}$.

Variável	Prof.	Min	Max	Amp	Média	Desvio	Var
CHUVA							
u_t	Superfície	-0,49	0,41	0,90	0,04	0,14	0,0219
	Meia Água	-0,13	0,11	0,24	0,02	0,04	0,0024
	Fundo	-0,06	0,07	0,13	0,002	0,02	0,0006
u_s	Superfície	-0,32	0,17	0,49	0,06	0,08	0,0064
	Meia Água	-0,03	0,01	0,04	0,01	0,02	0,0005
	Fundo	-0,03	0,01	0,04	0,001	0,01	0,0002
u_m	Superfície	-0,40	0,37	0,77	0,10	0,12	0,0144
	Meia Água	-0,12	0,10	0,22	0,04	0,04	0,0016
	Fundo	-0,06	0,04	0,10	0,02	0,02	0,0004
v_t	Superfície	-0,47	0,44	0,91	0,06	0,12	0,0144
	Meia Água	-0,07	0,10	0,17	0,03	0,05	0,0025
	Fundo	-0,03	0,05	0,08	0,01	0,04	0,0016
v_s	Superfície	-0,30	0,31	0,61	0,09	0,11	0,0121
	Meia Água	-0,06	0,07	0,13	0,03	0,04	0,0016
	Fundo	-0,03	0,03	0,06	0,02	0,03	0,0009
v_m	Superfície	-0,17	0,31	0,48	0,08	0,06	0,0032
	Meia Água	-0,01	0,07	0,08	0,03	0,01	0,0002
	Fundo	-0,006	0,04	0,04	0,01	0,01	0,0002

Estatística Básica: Estação de Seca.

Os primeiros momentos estatísticos para as séries de corrente referentes à estação de seca são apresentados na Tabela 4.6. Em superfície, meia água e junto ao fundo, os valores máximos da componente paralela são, em geral, maiores que os valores máximos da componente normal, o mesmo comportamento observado na estação chuvosa. Para os valores médios e mínimos, podemos observar que este comportamento se repete nas três profundidades. Ao compararmos as variâncias das componentes

paralelas e normais, em todos os níveis, verificamos que as primeiras são maiores que as segundas.

Da mesma forma como observado na estação chuvosa, na estação de seca as correntes paralelas são, em geral, mais intensas e apresentam uma maior variabilidade temporal, mostrando uma maior energia, quando comparadas com as correntes normais. Entretanto, destacamos que assim como observado na estação chuvosa, os desvios padrões da média foram maiores que as mesmas, em superfície, meia água e no fundo. O fluxo preferencial para NW na estação de seca fica facilmente evidenciado quando observamos os valores médios positivos para a componente paralela à batimetria (Tabela 4.6).

A redução na variância, assim como observamos na quadra chuvosa, é sistematicamente maior nas componentes normais do que nas componentes paralelas. Essa redução se traduz, em média na superfície, para a componente normal em 94%, enquanto que em meia água e junto ao fundo, as reduções observadas foram de 92% e 75%, respectivamente. Este comportamento não foi observado para a componente paralela, que apresentou reduções mínimas em relação à variância total, com valores de 16% para superfície e 88% para meia água e fundo. Consequentemente, as correntes de maré são mais importantes para as componentes normais, nas quais contribuem com cerca de 85% da variância, do que para as componentes paralelas. Nestas últimas, a variância das correntes de maré chega no máximo a 21% da variância total.

Tabela 4.6: Primeiros momentos estatísticos para as séries correntográficas, total, submaregráfica e maregráfica na estação de seca. U e V , referem-se às componentes normal e paralela à batimetrias local, respectivamente. $\mathbf{u}_t$ e $\mathbf{v}_t$ referem-se as variações totais, $\mathbf{u}_s$ e $\mathbf{v}_s$ à variabilidade submaregráfica e $\mathbf{u}_m$ e $\mathbf{v}_m$ à variabilidade maregráfica. **Prof** é a profundidade; **Min** é o valor mínimo e **Max** o valor máximo em m s^{-1} . **Amp** e **Var** são as amplitudes (m s^{-1}) e a variância ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$), respectivamente. Desvio é o desvio padrão da média em m s^{-1} .

Variável	Prof.	Min	Max	Amp	Média	Desvio	Var
SECA							
$\mathbf{u}_t$	Superfície	-0,39	0,44	0,83	0,03	0,12	0,0167
	Meia Água	-0,12	0,12	0,24	0,009	0,04	0,0024
	Fundo	-0,07	0,06	0,13	0,007	0,02	0,0004
$\mathbf{u}_s$	Superfície	-0,18	0,12	0,30	0,03	0,04	0,0009
	Meia Água	-0,03	0,01	0,04	0,001	0,01	0,0002
	Fundo	-0,02	0,01	0,03	0,001	0,01	0,0001
$\mathbf{u}_m$	Superfície	-0,34	0,31	0,64	0,10	0,12	0,0155
	Meia Água	-0,12	0,10	0,22	0,04	0,04	0,0021
	Fundo	-0,07	0,05	0,12	0,02	0,02	0,0003
$\mathbf{v}_t$	Superfície	-0,51	0,47	0,98	0,08	0,12	0,0144
	Meia Água	-0,06	0,11	0,17	0,03	0,05	0,0025
	Fundo	-0,03	0,06	0,09	0,01	0,03	0,0009
$\mathbf{v}_s$	Superfície	-0,19	0,31	0,50	0,09	0,11	0,0121
	Meia Água	-0,03	0,07	0,10	0,03	0,04	0,0022
	Fundo	-0,01	0,04	0,05	0,02	0,03	0,0008
$\mathbf{v}_m$	Superfície	-0,25	0,29	0,54	0,07	0,06	0,0031
	Meia Água	-0,02	0,08	0,10	0,03	0,01	0,0002
	Fundo	-0,01	0,04	0,05	0,01	0,001	0,0001

Diagramas de Dispersão.

A - Estação de Chuva.

Os diagramas de dispersão das correntes (Figura 4.56), mostram a distribuição espacial dos dados, em superfície, meia água e fundo. Podemos observar a presença de um fluxo dominante em todas as profundidades, com velocidades médias variando

entre $0,09 \text{ m s}^{-1}$, $0,05 \text{ m s}^{-1}$ e $0,01 \text{ m s}^{-1}$, em superfície, meia água e fundo, respectivamente.

Em superfície, o deslocamento médio apresenta direção preponderante para 330° , enquanto que em meia água e no fundo esses valores variaram entre 340° e 345° , respectivamente. Os fluxos apresentam em superfície convergência mínima com a direção média da isóbata local, enquanto que em meia água e no fundo observamos uma divergência mínima com a isóbata.

Figura 4.56: Diagrama de dispersão das correntes na PCCE, durante a estação chuvosa de 2009, em superfície (painel superior esquerdo), a meia água (painel superior direito) e fundo (painel inferior). A linha vermelha representa a direção média das isóbatas; a linha verde a direção de máxima variância dos dados. A barra de cores representa as intensidades das correntes (m s^{-1}). A seta laranja indica a direção e magnitude média da corrente.

B - Estação de Seca.

A Figura 4.57 mostra a distribuição espacial das correntes, em superfície, meia água e fundo, para a estação de seca. Podemos observar, assim como na estação chuvosa, fluxo preferencial para N-NW, com velocidades médias variando entre $0,10 \text{ m s}^{-1}$, $0,06 \text{ m s}^{-1}$ e $0,02 \text{ m s}^{-1}$, em superfície, meia água e fundo, respectivamente.

Figura 4.57: Diagrama de dispersão das correntes na PCCE, durante a estação seca de 2009, em superfície (painel superior esquerdo), a meia água (painel superior direito) e fundo (painel inferior). A linha vermelha representa a direção média das isóbatas; a linha verde a direção de máxima variância dos dados. A barra de cores representa as intensidades das correntes (m s^{-1}). A seta laranja indica a direção e magnitude média da corrente.

Em superfície e no fundo, as direções mais frequentes apresentaram um deslocamento médio para 335° , enquanto que em meia água a velocidade média apresentou

uma direção predominante para 350° . Os fluxos médios em superfície e no fundo apresentam uma convergência mínima com a direção média da isóbata local, enquanto que em meia água observou-se uma divergência mínima com a direção média da isóbata. Entretanto, ressaltamos a existência de na direção NW-SW, mesmo com a maior frequência das correntes ocorrendo na direção N-NW.

Distribuição Temporal.

A - Estação de Chuva.

As direções predominantes, bem como a variabilidade temporal dos dados, podem ser observadas na Figura 4.58, onde são apresentadas as distribuições temporais dos vetores velocidade de corrente e do vento na banda submaregráfica (*Stickplots*). Aqui adotaremos a convenção oceanográfica para o campo de ventos e correntes.

A variação temporal do vento apresenta várias inversões de direção durante o período de chuva, como podemos observar na Figura 4.58, acompanhadas por algumas inversões das correntes em superfície. Os períodos de inversão do vento, em média de 2 a 3 dias, não ocasionam inversões de correntes em meia água e no fundo. Estas inversões no campo de vento podem estar associadas ao retorno da ZCIT ao hemisfério norte durante a quadra chuvosa, fato que intensifica as brisas marinhas e terrestres na zona costeira, como mostrado por Camelo et al. (2008) e Silva et al. (2010).

Nestas distribuições, é possível observarmos boa correlação visual entre a direção do vento e as correntes em superfície: ventos provenientes de SE impulsionam correntes para NW. Entretanto, podemos observar que em alguns períodos, como por exemplo de 3 a 6 de julho, os ventos provenientes de NW impulsionaram correntes para SE. Em meia água e no fundo as correntes apresentam direção preferencial para NW, com boa correlação visual entre elas, mas não refletindo as variações observadas em superfície e no campo de vento.

Figura 4.58: Distribuição temporal da tensão de cisalhamento do vento na banda sub-maregráfica (primeiro painel) e dos vetores de velocidade de corrente na banda submaregráfica, em superfície (segundo painel), a meia água (terceiro painel) e no fundo (quarto painel) na estação chuvosa de 2009. Observe que a tensão de cisalhamento do vento e as correntes seguem a convenção oceanográfica (para onde vão).

B - Estação de Seca.

Diferente do comportamento observado na estação chuvosa, a variação temporal no campo de ventos apresentou direção média para NW, com alguns períodos onde observamos inversões (Figura 4.59). As inversões, embora mais curtas que as observadas na estação de chuva, compreenderam períodos variando de algumas horas até 2 dias. Este fato se deve muito provavelmente a passagem da ZCIT pela região da

PCCE em direção ao hemisfério norte, o que segundo Camelo et al. (2008) e Silva et al. (2010) tende a enfraquecer as brisas terrestres nesta época do ano, fato evidenciado pelos pequenos períodos de inversão do campo de ventos.

Figura 4.59: Distribuição temporal da tensão de cisalhamento do vento na banda submaregráfica (primeiro painel) e dos vetores de velocidade de corrente na banda submaregráfica, em superfície (segundo painel), a meia água (terceiro painel) e no fundo (quarto painel) na estação seca de 2009. Observe que a tensão de cisalhamento do vento e as correntes seguem a convenção oceanográfica (para onde vão).

Uma boa correlação visual é mais uma vez observada entre a tensão de cisalhamento do vento e o campo de correntes, da superfície ao fundo: ventos provenientes de sudeste polarizam as correntes na direção NW. Assim como observado na estação

de chuva, alguns períodos de inversão se mostram presentes no campo de correntes, embora como já mencionado anteriormente os períodos são bem menores em relação aos observados na época de chuva. Podemos usar como exemplo os dias 14 e 18 de agosto, nos quais os períodos de inversão do campo de ventos e correntes foram da ordem de 14 a 35 horas, respectivamente. Ressaltamos que algumas inversões do campo de correntes não foram perceptíveis no campo de ventos, o que nos leva a sugerir que, estas variações no campo de correntes podem estar associadas a estruturas de meso-escala presentes na região, como descrito por Marin (2009). Entretanto, ressaltamos que de modo geral, a direção dominante do campo de ventos e das correntes, da superfície ao fundo, foi para NW.

Mapas Médios e Diagramas Vetoriais Progressivos.

A - Estação de Chuva.

Diante dos padrões de circulação observados no diagrama de dispersão e na variação temporal para a estação de chuva, podemos traçar um comportamento médio da direção e intensidade das correntes na PCCE, como observado na Figura 4.60. O vento apresentou direção média para NW (330°), enquanto que as correntes variaram na direção N-NW ($340\text{-}345^\circ$). Podemos observar também um quase paralelismo da direção média das correntes, em superfície, a meia água e no fundo, com a direção média das isóbatas.

Para a estação chuvosa, a pseudo-trajetória das partículas de água, podem ser observadas na Figura 4.61. De modo geral, as partículas se deslocaram para NW, afastando-se gradativamente da direção média das isóbatas, da superfície ao fundo. Em superfície, o deslocamento médio observado foi de aproximadamente 160 km na direção paralela e de 200 km na direção normal, enquanto que em meia água os valores chegaram a 50 e 150 km, para as direções paralelas e normais, respectivamente. Junto ao fundo, observamos os menores deslocamentos, onde a partícula percorreu uma distância de 9 km na direção paralela e 60 km na direção normal.

Figura 4.60: Média do vetor velocidade do vento (vermelho) e dos vetores de velocidade de corrente, em superfície (laranja), a meia água (verde) e no fundo (azul), na estação de chuva de 2009. Dados filtrados na banda submaregráfica.

Figura 4.61: Diagrama vetorial progressivo para a corrente filtrada, na banda submaregráfica, estação de chuva de 2009. O círculo é o início da trajetória e o (*) é o fim da mesma. Figura superior: superfície; do meio: a meia água; inferior: fundo.

B - Estação de Seca.

Assim como na estação de chuva, os valores médios das correntes são representados na Figura 4.62. A direção média do vento foi para W-NW, mais precisamente para 310° , fato também observado no campo de correntes da superfície ao fundo, com direção preferencial para NW. Como observado na estação chuvosa, as correntes foram polarizadas para 308° , quase paralelas à direção média das isóbatas.

Figura 4.62: Média do vetor velocidade do vento (vermelho) e dos vetores de velocidade de corrente, em superfície (laranja), a meia água (verde) e no fundo (azul), na estação de seca de 2009. Dados filtrados na banda submaregráfica.

Assim como observado na estação chuvosa, as pseudo-trajetórias das partículas na estação de seca, em superfície, meia água e fundo, apresentaram deslocamento médio para NW (Figura 4.63). Comparativamente ao observado na estação de chuva, durante a estação de seca, observamos que a trajetória de uma partícula em uma dada profundidade foi bem maior: em superfície o deslocamento observado foi de aproximadamente 180 km na direção paralela e de 550 km na direção normal. Em meia água e no fundo os deslocamentos médios observados foram de 50 a 60 km na direção paralela, e de 120 a 200 km, na direção normal, respectivamente.

Figura 4.63: Diagrama vetorial progressivo para a corrente filtrada, na banda submaregráfica, estação de seca de 2009. O círculo é o início da trajetória e o (*) é o fim da mesma. Figura superior: superfície; do meio: a meia água; inferior: fundo.

Como podemos observar para as estações de chuva e seca, as partículas se deslocaram preferencialmente para NW, e as maiores distâncias percorridas ocorreram durante a estação de seca. Ressaltamos também que não observamos a presença de fluxos reversos entre as camadas superficiais e de fundo, o que caracteriza a unidirecionalidade do fluxo na PCCE.

Correlações entre correntes.

A - Estação de Chuva.

As correlações entre as componentes de correntes na banda submaregráfica paralelas e normais nas diferentes profundidades, superfície, meia água e fundo, são apresentados na Figura 4.64.

Figura 4.64: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas e normais, na banda submaregráfica, para a estação de chuva, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.

Podemos observar, para a componente paralela em superfície e a meia água uma alta correlação, de 0,97 para o *Lag* zero. Entre meia água e fundo, e superfície e fundo, as correlações foram de 0,4. Para a componente normal, nota-se clara diminuição da correlação quando comparada à componente paralela. Entretanto, os máximos se mantiveram praticamente no *Lag* zero para as profundidades de superfície e meia água, com valor de 0,4. Para as demais profundidades, observamos que as correlações diminuíram, apresentando um *Lag* de 2-3 horas, para os valores máximos.

B - Estação de Seca.

Assim como observado na estação de chuva, as correlações entre as componentes paralelas e normais das correntes na banda submaregráfica, na estação de seca, referentes às três profundidades, são apresentados na Figura 4.65. As correlações entre superfície e meia água apresentaram elevados valores, chegando a 0,98. Os valores das

correlações entre meia água e fundo, e entre superfície e fundo, foram de 0,60 e 0,58, respectivamente.

Figura 4.65: Correlações entre as componentes de velocidade paralelas e normais à batimetria para a estação de seca, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.

Observa-se uma degradação dos valores de correlação para a componente normal à batimetria nas três profundidades, chegando a valores de 0,41 na superfície, e de 0,38 a meia água. Para a componente normal observamos que para as três profundidades as maiores correlações ocorreram no *Lag* zero, fato que difere do comportamento observado na estação de chuva.

Funções Empíricas Ortogonais.

A - Estação de Chuva.

A Figura 4.66 mostra a distribuição dos modos empíricos para a estação de chuva, na banda submaregráfica. O que podemos observar é uma predominância do primeiro

modo empírico, explicando 97% da variância total. O segundo e o terceiro modos explicaram não mais que 3% da variância total. Não observamos muita variação nos sentidos e amplitudes do primeiro modo, assemelhando-se, assim, ao modo barotrópico. Os dois modos empíricos seguintes, sugerem correspondência ao primeiro e segundo modo baroclínico, devido às inversões nos sentidos observadas.

Figura 4.66: Funções empíricas ortogonais para as correntes na banda submaregráfica, para a estação de chuva de 2009. A orientação dos vetores são relativas e não estão necessariamente ligadas à uma orientação geográfica. Quanto mais escura a seta, maior a profundidade.

A Figura 4.67 nos mostra a reconstrução das componentes paralelas das correntes para superfície, meia água e fundo, através da análise EOF. A correlação entre essas componentes principais das EOFs com as componentes paralelas das correntes foram de 0,96 na superfície, de 0,95 a média água, e de 0,97 no fundo. Portanto, as direções das componentes principais da primeira EOF, são quase paralelas às direções das isóbatas.

Figura 4.67: Reconstrução da componente principal das séries de tempo das correntes e do vento, na banda submaregráfica, direção paralela às isóbatas, para as profundidades de superfície, meia água e fundo. Todas as séries são normalizadas pelos desvios padrões das médias. O nível de significância considerado foi de 95%.

B - Estação de Seca.

A Figura 4.68 apresenta a distribuição dos modos empíricos resultantes da análise EOF para a estação de seca. O primeiro modo empírico, mais uma vez, foi o modo predominante, explicando 93% da variância total. O segundo modo empírico explicou 6% da variância total, enquanto que o terceiro modo empírico explicou 1% da variância total. Em uma análise do resultado da EOF na estação de seca, referente ao primeiro modo empírico, não observamos variações significativas na direção e nas amplitudes, assemelhando-se ao modo barotrópico, mesmo comportamento observado na estação de chuva. As inversões significativas nos sentidos, observada no segundo e terceiro modo empírico, sugerem que os mesmos sejam o primeiro e o segundo modo baroclínico.

Figura 4.68: Funções empíricas ortogonais para as correntes na banda submaregráfica, para a estação de seca de 2009. A orientação dos vetores são relativas e não estão necessariamente ligadas à uma orientação geográfica. Quanto mais escura a seta, maior a profundidade.

A Figura 4.69 mostra a reconstrução da componente principal da EOF para superfície, meia água e fundo. As correlações observadas entre a componente principal da EOF e das correntes paralelas, foram de 0,93, 0,90 e 0,88, respectivamente. A direção da CP da EOF apresenta paralelismo com a direção média das isóbatas, nas três profundidades.

Figura 4.69: Reconstrução da componente principal das séries de tempo das correntes e do vento, na banda submaregráfica, direção paralela às isóbatas, para as profundidades de superfície, meia água e fundo. Todas as séries são normalizadas pelos desvios padrões das médias. O nível de significância considerado foi de 95%.

4.2.2.4.2 - Análise no Domínio da Frequência.

A - Estação de Chuva.

Os autoespectros para as componentes paralela e normal das correntes, na banda submaregráfica na estação de chuva, são apresentados na Figura 4.70. As componentes paralelas das correntes apresentam máximos relativos de energia para as mesmas frequências que a TCV (entre 0,25 e 0,4 cpd, como observado na Figura 4.50), particularmente à meia água: aproximadamente 0,5 e 0,25 cpd. As componentes normais de correntes não apresentam máximos destacados de energia, mas apenas sugestões de maiores valores de maiores valores nas mesmas frequências que as componentes paralelas desse mesmo vetor.

Figura 4.70: Espectros de energia das correntes nas direções paralela e normal à direção média da isobatimétrica, na banda submaregráfica, em superfície, a meia água e no fundo, na estação de chuva de 2009. Componente paralela (linha tracejada); Componente normal (linha cheia). Corrente próxima à superfície - superior direita; corrente à meia água - superior esquerda; corrente próximo ao fundo - inferior.

Pode-se notar, ainda, que a energia observada nas componentes de velocidade paralelas é, na maioria dos casos, pelo menos uma ordem de grandeza maior que aquelas para as componentes normais.

B - Estação de Seca.

Para a estação de seca, os autoespectros para as componentes paralela e normal das correntes, na frequência submaregráfica, são apresentadas na Figura 4.71. Para as componentes do vetor velocidade de corrente, os máximos relativos de energia aparecem para as frequências entre 0,4 e 0,5 cpd e, também, 0,25 cpd, da mesma forma que na estação chuvosa (Figura 4.70). Novamente, a energia das componentes paralelas de corrente é maior do que aquela das correntes normais.

Figura 4.71: Espectros de energia das correntes e da TCV nas direções paralela e normal a direção média das isobatimétricas, em superfície, meia água e fundo, na estação de seca de 2009. *Along Shelf* é a componente paralela; *Cross Shelf* é a componente normal.

4.2.2.5 - Correntes de Maré.

As séries de tempo da altura da maré observada, Figura 4.72 painel superior, previsão de maré, painel intermediário, e do resíduo da maré, painel inferior, assim como as amplitudes dos constituintes harmônicos (Figura 4.73) foram obtidas a partir da análise harmônica da série original da altura do nível do mar, obtida no período de 13 de junho e 14 de outubro de 2009, através do uso de um marégrafo de fundo acoplado ao ADCP fundeado na PCCE, como descrito na Seção 3.1.1.2. A análise da série de tempo da maré resultou em um número de forma de 0,15, caracterizando a maré na plataforma continental leste do estado do Ceará como majoritariamente semi-diurna, onde as componentes semidiurnas M_2 , S_2 e N_2 foram as principais responsáveis por uma elevação da maré de 1,8 m. As componentes de águas rasas, tais como; M_4 , MS_4 , MSN_2 , MNS_2 e M_6 , contribuíram de forma menos significativa para a altura da maré.

Figura 4.72: Série original da altura da maré (painel superior), previsão da maré (painel intermediário) e resíduo da maré (painel inferior), para o período de 13 de junho a 14 de outubro de 2009, obtidas através do uso de um marégrafo de fundo acoplado ao ADCP fundeado na PCCE. Os valores estão em m.

Figura 4.73: Amplitude média dos constituintes da maré para um nível de significância de 95%, no período de 13 de junho a 14 de outubro de 2009, através do uso de um marégrafo de fundo acoplado ao ADCP fundeado na PCCE. Os valores estão em m.

Correntes de maré: estação de chuva.

Para a estação de chuva, os parâmetros estatísticos para as velocidades das correntes de maré para às componentes paralela e normal foram apresentadas na Tabela 4.5. A Figura 4.74 mostra, no painel superior, o resultado da análise harmônica para a série de corrente de maré verticalmente integradas na estação de chuva de 2009: as correntes de maré oscilaram entre $-0,36$ e $0,34 \text{ m s}^{-1}$, associadas a um NF de 0,09 que caracteriza o regime de marés como semidiurno. As componentes M_2 , S_2 e N_2 foram as principais responsáveis pelas velocidades das correntes de maré nesta época do ano. O caráter semi-diurno da maré, é novamente observado no espectro de energia, pois as maiores energias ocorreram nos períodos próximos a dois ciclos por dia, para a componente normal.

As componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isóbatas, em superfície, na frequência maregráfica, são apresentadas na Figura 4.75. As correntes de

maré apresentaram menores intensidades na direção paralela, quando comparadas as correntes de maré para a componente perpendicular. Nessa componente (perpendicular) as velocidades das correntes de maré variaram entre $-0,40$ e $0,37 \text{ m s}^{-1}$, com valores médios de $0,10 \text{ m s}^{-1}$.

A componente normal à batimetria, apresentou uma amplitude de $0,77 \text{ m s}^{-1}$, mostrando uma variação semidiurna e modulação quinzenal das correntes de maré: as maiores velocidades foram observadas em evento de maré de sizígia, enquanto que as menores velocidades das correntes de maré foram observadas em eventos de maré de quadratura.

Figura 4.75: Série de tempo das correntes de maré em superfície (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de chuva de 2009.

A Figura 4.76 mostra a variação das correntes de maré para as componentes paralela e normal nas proximidades do fundo. As correntes de maré variaram entre $-0,06$ e $0,04 \text{ m s}^{-1}$, com valor médio de $0,02 \text{ m s}^{-1}$ para a componente paralela, e de $-0,006$ e $0,04 \text{ m s}^{-1}$, com valor médio de $0,01 \text{ m s}^{-1}$, para a componente normal. Neste nível as correntes de maré se mostraram menos intensas do que as observadas em superfície (Figura 4.75). Além disso, as velocidades próximas ao fundo são menos influenciadas pela modulação quase quinzenal das marés de sizígia e quadratura.

Figura 4.76: Série de tempo das correntes de maré junto ao fundo (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de chuva de 2009.

As Figuras 4.77 e 4.78 apresentam as elipses das correntes de maré para as componentes K_1 , O_1 , M_2 , S_2 e M_3 em superfície e nas proximidades no fundo, para a estação de chuva. Para essas componentes, podemos observar que as maiores velocidades foram observadas em superfície, chegando a $0,12 \text{ m s}^{-1}$ para a componente M_2 , e $0,03 \text{ m s}^{-1}$ para a componente K_1 . Podemos notar também, que as elipses estão polarizadas na direção quase normal, sugerindo um caráter de co-oscilação entre a maré da PC e do oceano profundo. Junto ao fundo, observamos as menores velocidades das correntes de maré, variando de $0,025 \text{ m s}^{-1}$ para a componente M_2 a $0,012 \text{ m s}^{-1}$ para a componente S_2 . A polarização das elipses próximas ao fundo apresenta aparente rotação para N mas, de qualquer maneira, não esteve quase-perpendicular às isóbatas.

Os principais constituintes harmônicas, diurna, semidiurna e de águas rasas para a estação de chuva, encontram-se na Tabela 4.7, para um nível de confiança de 95%.

Figura 4.77: Elipses das correntes de maré em superfície, na estação de chuva. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.

Figura 4.78: Elipses das correntes de maré próximas ao fundo, na estação de chuva. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.

Tabela 4.7: Constituintes harmônicas para as correntes de maré, para o período de chuva, com um nível de confiança de 95%. **E. Maior** é o eixo maior da elipse; **E. Menor** é o eixo menor da elipse; **E** é a elipsidade, que é a razão entre E. Menor/E. Maior; **Fase** em graus em relação ao meridiano de Greenwich, e **SNR** é a amplitude (m s^{-1}).

Variável	E. Maior	E. Menor	E	Fase	SNR
Componentes Diurnas					
Q1	-0,001	0,005	-0,20	165	2,6
O₁	0,001	0,005	0,20	139	3,3
K₁	0,002	0,015	0,13	14	11
J1	0,0001	0,004	0,03	99	1,5
Componentes Semidiurnas					
M₂	0,004	0,198	0,02	306	2e3
S₂	0,001	0,056	0,18	347	1,2e2
N₂	0,005	0,048	1,04	295	98
M₃	0,002	0,0001	20	44	1,2
L2	-0,001	0,005	-0,20	318	1,5
Componentes de Águas Rasas					
M₄	0,002	0,002	1,0	130	1,4
Ms4	0,002	0,0001	20,0	30	4
Mn4	0,002	0,0001	-20,0	140	1,6
Sn4	0,002	0,0001	-20,0	155	1,2
M₆	-0,0001	0,004	-0,03	63	2,3

B - Estação de Seca.

Os resultado da análise harmônica para a série de tempo de corrente na banda da maré na estação de seca, pode ser observado na Figura 4.79. As velocidades das correntes de maré variaram entre $-0,34$ e $0,31 \text{ m s}^{-1}$, associados a um NF de 0,08, que, assim como observado na estação chuvosa, caracterizou o regime de marés como semidiurno. Os espectros de energia mostram que as maiores energias ocorreram nos períodos de 2 ciclos por dia, para a componente normal à batimentria.

Figura 4.79: Série da corrente de maré verticalmente integrada (filtradas na banda maregráfica), resultante das observações, correntes de maré prevista e resíduo da corrente de maré (figura superior) em m.s^{-1} , amplitude média dos constituintes das correntes de maré para um nível de significância de 95% em m.s^{-1} (segunda figura de cima para baixo), fase das correntes de maré em graus (terceira figura de cima para baixo) e espectro de energia para a componente de velocidade perpendicular à isobatimétrica, verticalmente integrada, em $\text{m}^2.\text{s}^{-2}.\text{cpd}^{-1}$, para o período de seca de 2009.

A variação das componentes normal e paralela das correntes de maré em superfície, pode ser observada na Figura 4.80. Da mesma forma como observado na estação de chuva, as correntes de maré são menos intensas na direção paralela do que na direção

normal. Nesta última, a variação observada foi de $-0,34$ a $0,31$ m s^{-1} , com valores médios de $0,10$ m s^{-1} . Ainda na componente normal, podemos observar amplitude de $0,65$ m s^{-1} , com evidente modulação quase-quinzenal.

Figura 4.80: Série de tempo das correntes de maré em superfície (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de seca de 2009.

As componentes de corrente de maré paralela e normal junto ao fundo, são apresentadas na Figura 4.81. A variação observada na direção normal, foi de $-0,07$ a $0,05$ m s^{-1} , com valor médio de $0,02$ m s^{-1} , enquanto que na componente paralela essa variação foi de $-0,01$ a $0,04$ m s^{-1} , com média de $0,01$ m s^{-1} . Assim como observado

na estação de chuva, as maiores velocidades foram observadas em superfície (Figura 4.80) decaindo em relação ao fundo (Figura 4.81).

Figura 4.81: Série de tempo das correntes de maré junto ao fundo (m s^{-1}), na banda maregráfica, para as componentes paralela (painel superior) e normal (painel inferior) as isobatimétricas para a estação de seca de 2009.

As Figuras 4.82 e 4.83 apresentam as elipses das correntes de maré para as componentes K_1 , O_1 , M_2 , S_2 e M_3 em superfície e nas proximidades no fundo, para a estação de seca. Podemos observar que as maiores velocidades ocorreram em superfície, chegando a $0,13 \text{ m s}^{-1}$ para a componente M_2 , e $0,05 \text{ m s}^{-1}$ para a componente

S_2 . Assim como observado na estação de chuva, as elipses de maré, em superfície, para as componentes O_1 , M_2 , S_2 e M_3 apresentaram polarização quase-normal às isobatimétricas, sugerindo que a propagação da maré é uma resposta co-oscilatória como a onda de maré observada em águas mais profundas.

As menores velocidades das correntes de maré, foram observadas junto ao fundo, variando de $0,022 \text{ m s}^{-1}$ para a componente M_2 a $0,010 \text{ m s}^{-1}$ para a componente S_2 (Figura 4.83). Ou seja, da mesma maneira como observamos na estação de chuva, as velocidades das correntes de maré decaíram da superfície em direção ao fundo. Mais uma vez, a polarização das elipses próximas ao fundo está aparentemente rotacionada para N.

As principais constituintes harmônicas, diurna, semidiurna e de águas rasas para a estação de seca, encontram-se na Tabela 4.8, para um nível de confiança de 95%. Ao compararmos as principais constituintes harmônicas para as estações de chuva e seca, observamos que a componente principal lunar M_2 apresentou as maiores amplitudes na estação de chuva, sendo 40% menor na estação de seca, fato também observado para a componente diurna K_1 , que apresentou uma redução nas amplitudes na ordem de 60% na estação seca. Entretanto, a componente principal solar S_2 apresentou um aumento de 55% nas amplitudes na estação de seca, em relação à estação chuvosa.

Os constituintes de águas rasas mais significativas foram Ms_4 , com variação entre 4 e 8,2 cm, M_4 com variação de 1,4 a 7,4 cm, e a constituinte M_6 , com variação de 2,3 a 4,8 cm, para as estações de chuva e seca, respectivamente.

Figura 4.82: Elipses das correntes de maré em superfície, na estação de seca. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.

Figura 4.83: Elipses das correntes de maré próximos ao fundo, na estação de seca. K_1 - superior esquerda; O_1 superior direita; M_2 central esquerda; S_2 central direita; M_3 inferior.

Tabela 4.8: Constituintes harmônicas para as correntes de maré, para o período de seca, com um nível de confiança de 95%. **E. Maior** é o eixo maior da elipse; **E. Menor** é o eixo menor da elipse; **E** é a elipsidade, que é a razão entre E. Menor/E. Maior; **Fase** em graus em relação ao meridiano de Greenwich, e **SNR** é a amplitude ($m s^{-1}$).

Variável	E. Maior	E. Menor	E	Fase	SNR
Componentes Diurnas					
Q1	-0,0001	0,005	-0,02	141	2,8
O₁	0,003	0,006	0,50	125	3,3
K₁	0,004	0,009	0,44	36	4,3
J1	0,0001	0,001	0,10	66	0,12
Componentes Semidiurnas					
M₂	0,009	0,193	0,05	305	1,2e3
S₂	-0,001	0,083	-0,01	327	2,7e2
N₂	0,005	0,035	0,14	286	49
M₃	-0,002	0,004	-0,50	282	0,83
L2	-0,0001	0,002	-0,05	350	1,6
Componentes de Águas Rasas					
M₄	0,0001	0,005	0,02	115	7,4
Ms4	0,001	0,006	0,17	158	8,2
Mn4	0,001	0,0001	10,0	80	0,82
Sn4	0,001	0,002	0,50	20	2,1
M₆	0,002	0,0005	0,40	237	4,8

Um total de 14 constituintes harmônicas estatisticamente significativas ao nível de 95% de confiança foram obtidas para os períodos de chuva e seca, sendo 4 constituintes diurnas, 5 constituintes semidiurnas e 5 correspondentes à águas rasas.

4.2.2.6 - Correntes no Estuário do Rio Jaguaribe.

Como vimos no Capítulo 3, as velocidades de corrente no estuário do Rio Jaguaribe foram adquiridas nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC para as estações de chuva e seca de 2009. Para efeito de comparação, adotaremos a convenção; $u > 0$ para as velocidades longitudinais de vazante, e $u < 0$ para as velocidades longitudinais de enchente.

A - Estação de Chuva.

Na interface ZR/ZM (Figura 4.84 painel superior) os 13 perfis da componente longitudinal (u) apresentaram comportamento uniforme, vazando em todo o período ($u > 0$), com as maiores velocidades observadas em superfície. Nesta interface, as velocidades chegaram a $1,3 \text{ m s}^{-1}$, com valores médios de $0,74 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 0,35 \text{ m s}^{-1}$.

O mesmo comportamento foi observado na interface ZM/ZC (Figura 4.84 painel inferior) com as maiores velocidades, da ordem de $1,6 \text{ m s}^{-1}$, observadas em superfície, com valores médios de $0,78 \text{ m s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 0,39 \text{ m s}^{-1}$. Analisando o comportamento da componente transversal (v), e comparando este comportamento ao observado para a componente longitudinal, notamos que os valores médios de v foram em média quatro vezes menores na ZR/ZM ($0,15 \text{ m s}^{-1}$), e pelo menos metade na ZM/ZC ($0,48 \text{ m s}^{-1}$). Comparamos a importância da componente longitudinal para a renovação das águas no sistema estuarino do Rio Jaguaribe, mesmo em períodos de elevadas descargas fluviais, quando a AR domina o estuário.

o padrão unidirecional observado para ambas as interfaces traduz-se em elevado fluxo fluvial nesta época do ano. Esta influência fluvial no sistema estuarino é facilmente identificada na circulação gravitacional quando calculamos os perfis de velocidades estacionárias (u_a) para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 4.85). Obtivemos os valores de $0,76$ e $0,81 \text{ m s}^{-1}$, para ZR/ZM e ZM/ZC, respectivamente. Os valores positivos obtidos para u_a na estação de chuva, mostram transporte resultante estuário abaixo, caracterizando o sistema, durante o período de fluxos unidirecionais, como exportador de água, corroborando os resultados obtidos por Dias et al. (2011).

Figura 4.84: Perfis de velocidade longitudinais ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de chuva de 2009.

Figura 4.85: Perfil médios de velocidade estacionária ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de chuva de 2009. u_a é o valor médio estacionário da componente longitudinal da velocidade; $\langle u(Z) \rangle$ é o perfil médio temporal na profundidade adimensionalizada.

B - Estação de Seca.

Durante a estação de seca, podemos observar na Figura 4.86 um escoamento bidirecional nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), demonstrando maior atuação da componente marinha no sistema estuarino.

Figura 4.86: Perfis de velocidade longitudinais ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de seca de 2009.

Os perfis da velocidade longitudinal, medidos em evento de maré vazante ($u > 0$) para a interface ZR/ZM, mostram variação de 0,09 a 0,87 m s^{-1} , com média de 0,43 m s^{-1} e desvio padrão de $\pm 0,23 \text{ m s}^{-1}$, enquanto que em evento de maré enchente ($u < 0$), as velocidades longitudinais variaram entre -0,05 a -0,91 m s^{-1} , apresentando valores médios de -0,42 m s^{-1} , e desvio padrão de $\pm 0,24 \text{ m s}^{-1}$. Na interface ZM/ZC, em evento de maré vazante e enchente, as velocidades longitudinais variaram entre 0,08 e 0,88 m s^{-1} , com média de 0,36 m s^{-1} e desvio padrão de $\pm 0,22 \text{ m s}^{-1}$, e de -0,04 a -0,64 m s^{-1} , com valores médios de -0,27 m s^{-1} e desvio padrão de $\pm 0,17 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

Assim como observado na estação chuvosa, o comportamento da componente transversal em relação à componente longitudinal na estação de seca mostrou-se, em evento de maré enchente, em média, de duas (0,12 m s^{-1}) a dez (0,04 m s^{-1}) vezes menor, para ZM/ZC e ZR/ZM, respectivamente. Em evento de maré vazante, a componente transversal apresentou velocidades quatro vezes menores (0,09 e 0,10 m s^{-1}) quando comparadas às velocidades observadas na direção longitudinal, para ZR/ZM e ZM/ZC, respectivamente.

A bidirecionalidade do escoamento na estação de seca, observada na Figura 4.86, mostra a perda de importância da componente fluvial em relação à estação de chuva, em ambas as interfaces, evidenciando a componente marinha como um importante agente na renovação da água estuarina nesta época do ano.

O comportamento do estuário do Rio Jaguaribe durante a estação de seca (Figura 4.87), demonstra maior atuação da maré nas duas interfaces em estudo. Entretanto, podemos observar na ZR/ZM que o perfil estacionário apresentou valor de 0,02 m s^{-1} , caracterizando a interface como exportadora de água para o sistema estuarino. Entretanto, o valor médio do perfil estacionário na interface ZM/ZM foi de -0,06 m s^{-1} , tornando esta interface uma importadora de água para o estuário.

A circulação gravitacional estuário abaixo, na estação de seca, na interface ZR/ZM e estuário acima na interface ZM/ZC, nos faz sugerir que, os volumes de água que penetram no sistema estuarino em evento de maré enchente, são praticamente os mesmos volumes que saem do estuário em maré vazante, haja vista que os valores de u_a estejam muito próximos de zero, evidenciando a importância da dinâmica da maré na

região.

Figura 4.87: Perfil médios de velocidade estacionária ao longo de um ciclo de maré, nas interfaces ZR/ZM (painel superior) e ZM/ZC (painel inferior), durante a estação de seca de 2009. u_a é o valor médio estacionário da componente longitudinal da velocidade; $\langle u(Z) \rangle$ é o perfil médio temporal na profundidade adimensionalizada

4.2.3 Tensão de Cisalhamento do Vento X Correntes.

Correlações: estação de chuva.

A Figura 4.88 mostra a correlação entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes nas direções paralela e normal na banda submaregráfica, para a estação de chuva. As maiores correlações para a componente paralela foram observadas em superfície e meia água, com liderança do vento. Para as componentes normais, assim como observado para as correlações entre as correntes, observamos uma degradação das correlações, e quando elas são significativas, em geral a liderança é do vento.

Figura 4.88: Correlações entre as componentes de velocidade das correntes, na banda submaregráfica, e tensão de cisalhamento do vento na estação de chuva, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%. A Figura superior indica a correlação entre a TCV e correntes na direção paralela. A Figura inferior indica a correlação entre a TCV e correntes na direção perpendicular.

A Figura 4.89 mostra as correlações entre a tensão de cisalhamento do vento e as correntes, na banda submaregráfica, utilizando componentes perpendiculares entre si. O que podemos observar é que a componente paralela da tensão de cisalhamento do vento exerce pequena influência sobre as correntes normais, com correlações pouco significativas. O mesmo comportamento foi observado para as correlações entre componente normal da tensão de cisalhamento do vento e a componente paralela das correntes. Este comportamento nos faz sugerir que as correntes paralelas as isobatómetricas são essencialmente forçadas pela componente paralela da tensão de cisalhamento do vento.

Figura 4.89: Correlações entre as componentes u e v do vetor velocidade e tensão de cisalhamento do vento paralelas e normais à batimetria para a estação de chuva, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.

As correlações entre a parte real da primeira componente da EOF e a componente paralela do vento (Figura 4.67) também é relativamente alta, em torno de 0,72, indicando que as variabilidades das correntes paralelas são forçadas principalmente pelos ventos nesta direção.

Correlações: estação de seca.

As correlações entre a TCV com as correntes nas direções paralela e normal as isobatimétricas para estação de seca são apresentadas na Figura 4.90. Podemos observar à elevada influência da TCV nas correntes paralela às isobatimétricas, onde as correlações em superfície foram de 0,53, enquanto que em meia água e no fundo os valores observados foram de 0,51 e 0,48, respectivamente. Para as componentes normais, a degradação das correlações é visível em todas as profundidades, onde junto ao fundo, observamos uma correlação, mesmo que pequena, inversa tendo sua origem não atrelada a TCV.

A correlação cruzada entre a TCV e as correntes paralela e normal, para a estação de seca é mostrada na Figura 4.91. Da mesma forma como observado na estação de chuva, não observamos correlações significativas entre as componentes paralela e normal da TCV com as componentes normal e paralela das correntes.

A parte real da componente principal da EOF e a componente paralela do vento (Figura 4.69), assim como na estação de chuva, apresentaram uma elevada correlação, em torno de 0,80, caracterizando mais uma vez que, a variabilidade das correntes que fluem paralelas a direção das isobatimétricas são fortemente influenciadas pela transferência de momentum da componente paralela do vento.

Figura 4.90: Correlações entre as componentes de velocidade e tensão de cisalhamento do vento paralelas e normais à batimetria para a estação de seca, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.

Figura 4.91: Correlações cruzadas entre as componentes u e v do vetor velocidade e tensão de cisalhamento do vento paralelas e normais à batimetria para a estação de seca, em superfície, meia água e fundo. As linhas indicam o intervalo de confiança de 95%.

Coerência e Fase: estação de chuva.

A coerência entre a componente paralela da TCV e a componente paralela das correntes é alta para as três profundidades, como observado na Figura 4.92. O espectro de fase apresenta valores oscilando muito próximo de zero em períodos de 3 a 5 dias, indicando uma rápida resposta das águas da PCCE a forçante do vento.

Figura 4.92: Espectro de coerência ao quadrado e fase entre as componentes paralelas da TCV e das correntes, em superfície (superior), a meia água (intermediário) e fundo (inferior), na estação de chuva de 2009.

Coerência e Fase: estação de seca.

A coerência entre a componente paralela da TCV e as componentes paralelas das correntes para as três profundidades, como observado na Figura 4.93. Em frequências próximas a 0,25 cpd a diferença entre a TCV e as correntes é muito pequena; entre 0,4 e 0,5 cpd a diferença de fase é positiva próxima a superfície, com liderança do vento, e negativa a meia água e no fundo, com liderança das correntes.

Figura 4.93: Coerência ao quadrado e fase da TCV com as correntes na direção paralela a direção média das isobatimétricas, em superfície, meia água e fundo, na estação de seca de 2009. *Along Shelf* é a componente paralela.

4.3 Correntes geradas pelo vento - ROMS.

4.3.1 Variação da Energia Cinética.

A variação da energia cinética média por unidade de massa (ECM) foi calculada pelo ROMS a cada hora da integração numérica, sendo adotada neste estudo como um parâmetro de estabilidade do modelo. A Figura 4.94 mostra a variação da ECM para as simulações nos períodos de chuva e seca, se marés. Podemos observar que para a estação de chuva a estabilização da ECM ocorreu logo após 5 dias de simulação, a partir de quando sua oscilação limitou-se a $0,0033 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. Entretanto, durante a estação de seca, a estabilização da ECM ocorreu após 5 dias e 4 horas, quando sua oscilação limitou-se a $0,0040 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

Podemos observar ainda na Figura 4.94 que a ECM durante a estação de seca apresentou maiores valores em relação aos observados na estação de chuva. Podemos associar os maiores valores de ECM obtidos durante a estação de seca, a uma diferença no

campo de massa entre as duas estações, provocada por uma maior mistura de águas (água costeira e tropical) na região da PCCE.

Figura 4.94: Variação da energia cinética média por unidade de massa ao longo de 30 dias de experimento, para as estações de chuva (linha cheia) e seca (linha tracejada).

4.3.2 Variação Espacial do Campo de Correntes e Elevação do Nível do Mar forçados por vento Uniforme.

4.3.2.1 - Estação de Chuva.

A Figura 4.113, mostra a resposta das águas da PCCE ao vento uniforme em diferentes instantes de tempo. No início, a resposta é inercial, quando podemos observar aceleração das águas na direção de atuação do campo de vento. Após 3 horas da integração do modelo (Figura 4.113 A), já podemos observar, na porção leste da PCCE, um empilhamento de água nas proximidades da costa, fenômeno concordante com o transporte de deriva do vento associado a correntes de aproximadamente $8 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$. Com a evolução no tempo da integração numérica, podemos observar que as maiores variações de η ocorreram nas primeiras 18 horas (Figuras 4.113 A-C). Após 24 horas de simulação, os efeitos da rotação da terra passaram a atuar de forma mais efetiva nos movimentos, ocasionando um processo de ajuste e um transporte na direção quase-paralela à costa. O campo de correntes também apresentou diferenças em relação ao instante $t=3\text{hs}$, chegando a velocidades de até $0,18 \text{ m s}^{-1}$.

Como vimos nas Figuras 4.113 A, B e C, a elevação do nível do mar junto à costa é provocada pelo fluxo de água em direção à costa devido ao transporte de Ekman em superfície e, conseqüentemente, as velocidades paralelas, geradas pelo gradiente do nível do mar normal à costa, estão em equilíbrio geostrófico com este gradiente. Logo, as Figuras 4.113 D, E e F evidenciam o fluxo paralelo às isóbatas, onde após 7 dias de simulação as velocidades chegaram a $0,43 \text{ m s}^{-1}$.

A evolução temporal do nível do mar (η) e das componentes paralela (v) e normal (u) da velocidade, foram obtidas em três perfis, ao largo do Rio Jaguaribe, Fortaleza e Itapajé. As séries temporais da variação de η para a estação de chuva (Figura 4.114), mostram que a elevação do nível do mar próximo à costa é maior, decaindo em direção ao largo. Podemos observar que o estado estacionário foi atingido, em média, com 24 horas de simulação, quando η tende a valores constantes da ordem de $0,04 \text{ m}$ na costa e pouco mais de $1,5 \times 10^{-2} \text{ m}$ na região da quebra da plataforma continental.

As Figuras 4.115 e 4.116 mostram o comportamento das componentes normal e paralela da corrente, respectivamente. Podemos observar que a componente paralela é mais energética que a componente normal, chegando ambas a valores de $0,30 \text{ m s}^{-1}$ e $6 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. Note que a velocidade normal, não anulou-se em todos os pontos de grade quando o estado estacionário foi atingido, muito provavelmente, devido à variação da topografia na direção y , somando-se ao efeito da costa não apresentar-se como uma reta, podendo sua curvatura gerar gradientes de pressão. A soma destes fatores pode induzir o aparecimento de movimentos na direção x .

A evolução no tempo da componente paralela mostra que, depois de chegar ao estado estacionário, as velocidades tendem a valores constantes no tempo. Este comportamento se deve à utilização do campo de vento uniforme. As velocidades chegam a valores de $0,30 \text{ m s}^{-1}$. As Figuras 4.114, 4.115 e 4.116 mostram a existência de um confinamento das correntes e das elevações do nível do mar na região da plataforma continental mais próxima à costa, decaindo com a distância da mesma.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de chuva.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de chuva.

Figura 4.113: A - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 3$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de chuva.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de chuva.

Figura 4.113: **B** - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 6$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de chuva.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de chuva.

Figura 4.113: C - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 12$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de chuva.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de chuva.

Figura 4.113: **D** - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 24$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de chuva.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de chuva.

Figura 4.113: E - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 48$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de chuva.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de chuva.

Figura 4.113: F - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 168$ hs.

Figura 4.114: Evolução temporal da altura do nível do mar (η) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de chuva. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).

Figura 4.115: Evolução temporal da componente da velocidade normal à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de chuva. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).

Figura 4.116: Evolução temporal da componente da velocidade paralela à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de chuva. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).

4.3.2.2 - Estação de Seca.

Assim como demonstrado na estação de chuva, as Figuras 4.117 de A até F, mostram a resposta da PCCE a um vento uniforme, durante a estação de seca. Novamente, a resposta nos primeiros momentos é inercial, pois as correntes tendem a fluir na direção do vento forçante. Nas três primeiras horas de simulação (Figura 4.117 A) o escoamento mostra deslocamento na direção média das isóbatas, com valores de correntes chegando a $0,10 \text{ m s}^{-1}$, e um empilhamento de água na região da costa da ordem de $0,03 \text{ m}$.

Entre os instantes de tempo $t=0$ e $t=24$ horas observamos intensificação do campo de correntes, com os maiores valores ocorrendo na região mais próxima à costa, chegando a $0,34 \text{ m s}^{-1}$, associado a um empilhamento de água de $0,05 \text{ m}$ na região ao largo do rio Jaguaribe, e $0,04 \text{ m}$ na região ao largo de Itapajé (Figuras 4.117 A, B, C e D).

O mesmo mecanismo físico que ocasionou a elevação do nível do mar durante a estação de chuva e um fluxo de água em direção à costa provocada pelo transporte de Ekman de superfície, foi responsável pelo empilhamento de água durante a estação de seca junto à costa, onde os valores de η variaram entre $0,04 \text{ m}$ e $0,05 \text{ m}$. Diante deste comportamento, as Figuras 4.117 D, E e F mostram um fluxo preferencial para NW, paralelo às isóbatas, com velocidades que variaram de $0,30 \text{ m s}^{-1}$ a $0,55 \text{ m s}^{-1}$.

As velocidades normal (Figura 4.119) e paralela (Figura 4.120) mostram que a componente paralela, assim como observado na estação chuvosa, foi a mais energética para o período de seca, chegando a valores de $0,23 \text{ m s}^{-1}$. As velocidades normais foram da ordem de $0,12 \text{ m s}^{-1}$, chegando a $0,16 \text{ m s}^{-1}$ na radial ao largo de Itapajé.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de seca.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de seca.

Figura 4.117: A - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 3$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de seca.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de seca.

Figura 4.117: **B** - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 6$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de chuva.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de seca.

Figura 4.117: C - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 12$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de seca.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de seca.

Figura 4.117: **D** - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 24$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de seca.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de seca.

Figura 4.117: E - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 48$ hs.

(a) Campo de temperatura e vetores de velocidade de corrente durante a estação de seca.

(b) Elevação do Nível do mar na estação de seca.

Figura 4.117: F - Variação espacial do campo de correntes em superfície (m s^{-1}) e isolinhas de altura do nível do mar (em metros), para $t = 168$ hs.

Figura 4.118: Evolução temporal da altura do nível do mar (η) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de seca. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).

Figura 4.119: Evolução temporal da componente da velocidade normal à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de seca. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).

Figura 4.120: Evolução temporal da componente da velocidade paralela à costa (média vertical) para os perfis situados ao largo do Rio Jaguaribe (superior), Fortaleza (meio) e Itapajé (inferior), durante a estação de seca. Dados da proximidade da costa (linha cheia); do meio da plataforma continental (linha traço-ponto) e da quebra da plataforma continental (linha tracejada).

4.4 Correntes de Maré.

As Figuras 4.121 e 4.122 mostram as amplitudes e fases das componentes da maré modeladas. Como podemos observar, as maiores amplitudes para as componentes semi-diurna da maré, M_2 (Figura 4.121 a) e S_2 (Figura 4.121 b), ocorrem na região da foz do Estuário do Rio Jaguaribe, chegando a 1,02 m e 0,36 m, respectivamente. Em relação às componentes diurnas da maré, K_1 (Figura 4.122 c) e O_1 (Figura 4.122 d), as maiores amplitudes foram observadas na região ao largo da cidade de Itapajé (região oeste do domínio), chegando a 0,86m e 0,85 m, respectivamente.

As amplitudes para as componentes semi-diurna (M_2 e S_2) mostram que as maiores elevações ocorreram próximas da costa e as menores foram observadas nas proximidades da quebra da plataforma continental (PC), junto à isóbata de 100 m, na ordem de 0,86 m e 0,29 m, respectivamente. Para as componentes diurnas (O_1 e K_1), observa-se que as menores amplitudes ocorreram na porção SE do domínio, 0,70 m para ambas as componentes, e as maiores ocorreram na porção NW do domínio, 0,86 m e 0,83 m, respectivamente.

Podemos observar um padrão similar para as elipses de maré das componentes S_2 e O_1 quando comparados com M_2 e K_1 , respectivamente (Figuras 4.123 e 4.124). Em regiões profundas, as correntes de maré são menores, da ordem de $0,02 \text{ m s}^{-1}$ para M_2 e de $0,05 \text{ m s}^{-1}$ para K_1 , onde as elipses apresentam uma grande excentricidade. Em regiões rasas, as elipses assumem magnitudes maiores, sendo que as correntes de maré para M_2 podem chegar a $0,10 \text{ m s}^{-1}$, na porção leste da PCCE. As componentes S_2 e O_1 apresentam elipses com sentido de rotação horário, enquanto que M_2 e K_1 apresentam rotação anti-horária.

Em relação aos eixos principais das elipses de maré das componentes M_2 , S_2 , K_1 e O_1 podemos separar duas regiões distintas na PCCE: a porção leste, onde os eixos principais das elipses estão orientados normais à direção média das isóbatas, com exceção da componente K_1 , e a porção oeste, onde os eixos principais das elipses estão orientados na direção média das isóbatas locais. A orientação do eixo principal das elipses na direção normal as isóbatas no leste da PCCE acompanha intensificação das correntes de maré na região da quebra da plataforma continental.

(a) Componente semi-diurna, M2.

(b) Componente semi-diurna, S2.

Figura 4.121: Amplitude (m) representadas pelas cores, e fase em Greenwich (graus), representadas pelas isolinhas, das componentes semi-diurna da maré. a - M_2 esquerda; b - S_2 direita.

(a) Componente diurna, K_1 . (b) Componente diurna, O_1 .

Figura 4.122: Amplitude (m) representadas pelas cores, e fase em Greenwich (graus), representadas pelas isolinhas, das componentes diurna da maré. a - K_1 esquerda; b - O_1 direita.

(a) Elipse de maré da componente semi-diurna M2.

(b) Elipse de maré da componente semi-diurna S2.

Figura 4.123: Elipses da corrente de maré para a PCCE. a - M_2 esquerda; b - S_2 direita.

(a) Elipses de maré da componente diurna O1.

(b) Elipses de maré da componente diurna K1.

Figura 4.124: Elipses da corrente de maré para a PCCE. a - O₁ esquerda; b - K₁ direita.

4.5 Interações Continente-Oceano.

4.5.1 Vazões nas Estações de Chuva e Seca.

A variabilidade sazonal do campo de correntes nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC foi descritas no capítulo 4, Seção 4.2.2.6. Calculamos a variação da seção molhada obtida através da realização dos perfis de velocidade com o uso do ADCP, para cada hora amostral. Baseados na variação temporal das correntes e das seções molhadas, calculamos as vazões nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC para as estações de chuva e seca, durante o ano de 2009.

A Figura 4.125 mostra a variação das vazões, nas duas interfaces, durante a estação chuvosa. Na interface ZR/ZM, as vazões variaram entre 1108,4 a 1563,4 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, com valores médios de 1326,6 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 158,1 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, enquanto que, na interface ZM/ZC a variabilidade das vazões observadas foram de 1721 a 2664,9 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, com média de 2195,1 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 347,2 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$.

Figura 4.125: Variação das vazões no sistema estuarino do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM (cinza escuro) e ZM/ZC (cinza claro), durante a estação de chuva de 2009.

Para a estação de seca, a distribuição temporal das vazões pode ser observada na Figura 4.126. Na interface ZR/ZM durante um ciclo completo de maré semi-diurna a variação da vazão foi de 72,4 a 174,6 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, com média de 132,8 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e desvio padrão

de $\pm 41,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e de $-181,9$ a $-287,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com média de $-238,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 34,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, para os eventos de maré vazante e enchente, respectivamente. Entretanto, na interface ZM/ZC, em evento de maré vazante, os valores variaram de $109,4$ a $578,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com valor médio de $335,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e desvio de $\pm 184,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto que em evento de maré enchente, a variação observada foi de $-445,2$ a $-617,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com variação média de $-567,2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e desvio padrão de $\pm 64,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Figura 4.126: Variação das vazões no sistema estuarino do Rio Jaguaribe, nas interfaces ZR/ZM (cinza escuro) e ZM/ZC (cinza claro), durante a estação de seca de 2009.

A Figura 4.127 mostra o balanço das vazões nas estações de chuva e seca, para o ano de 2009. Podemos observar fluxo de caráter unidirecional estuário abaixo na estação de chuva. Entretanto, na estação de seca, as maiores vazões foram observadas em evento de maré enchente, devido à maior atuação da maré, gerando aporte de água no estuário de $328,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, dos quais $202,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ saíram do sistema estuarino em evento de maré vazante, o que ocasionou uma retenção de 38% do volume que entrou em maré enchente.

Figura 4.127: Balanço líquido das vazões ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC no estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva e seca de 2009. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m. Os números são as vazões medidas.

4.5.2 Volumes de Água, Prisma de Maré e Taxas de Descarga nas Estações de Chuva e Seca.

Durante o período de chuvas, quando observamos as maiores descargas fluviais (Figura 4.125), a bacia de drenagem exportou para o estuário um volume total de água de $55 \times 10^6 \text{ m}^3$, que somado aos $42 \times 10^6 \text{ m}^3$ presentes no sistema estuarino (ZM), exportaram $97 \times 10^6 \text{ m}^3$ para a plataforma continental interna (PCI), associados a um volume de água doce de 99%, em ambas as interfaces. As taxas de descarga observadas na estação chuvosa, em ambas as interfaces, foram de aproximadamente 12 horas. O reflexo direto do volume de água exportado do estuário para a PCI foi a formação da pluma estuarina, que chegou a distância de 6 km da costa, ocupando os três primeiros metros de coluna de água e gerando rebaixamento do topo da AC.

Para a estação de seca, com a diminuição das chuvas e um menor aporte de águas continentais no sistema estuarino, passamos a observar fluxo bidirecional nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 4.126). Nesta estação do ano, o volume de água exportado pela bacia de drenagem ao estuário variou entre $5,9 \times 10^6$ e $11 \times 10^6 \text{ m}^3$, sendo os percentuais de água doce de 80% e 75,7% em eventos de maré vazante e enchente,

respectivamente. Na interface ZM/ZC, os volumes de água observados variaram entre $15 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $25 \times 10^6 \text{ m}^3$, com percentuais de água doce variando entre 27% e 9,7%, em eventos de maré vazante e enchente, respectivamente, mostrando maior atuação de águas marinhas nesta interface. O caráter bidirecional do fluxo, associado a elevados percentuais de água doce para esta época do ano, se refletiu nas taxas de descarga, quando em evento de maré vazante os valores variaram entre 10 e 3,4 horas, enquanto que em maré enchente a variação observada foi de 9,4 a 1,2 horas, para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, respectivamente.

A Figura 4.128, construída com base no modelo LOICZ, mostra o balanço do prisma de maré durante as estações de chuva e seca. Podemos observar que, durante a estação de chuva, o estuário do Rio Jaguaribe comportou-se como um exportador de água, pois os fluxos apresentaram caráter unidirecional enquanto que, na estação de seca, os maiores volumes foram associados a eventos de maré enchente, gerando uma retenção de $4,9 \times 10^6 \text{ m}^3$, que em percentual representa 36% do volume de entrada, caracterizando o estuário, para esta época do ano, como importador de água. A diferença entre o volume de água que entrou em maré enchente e o retido na ZM contribuiu para o transporte para a ZC em maré vazante. Houve ainda, redução do volume transportado sazonalmente, pois na estação de seca observamos redução média de 84% na interface ZR/ZM, enquanto que na interface ZM/ZC a redução observada foi de 52%, ressaltando a grande influência fluvial na estação de chuva. Com a redução do volume fluvial, fica claro a redução do volume de água transportado estuário abaixo, entre as estações de chuva e seca, pois estas reduções chegaram a 89% na ZR/ZM e 64% na ZM/ZC. Uma maior influência de águas marinhas no período de seca é notada quando analisamos os volumes de entrada nas duas interfaces, onde os volumes transportados são maiores, em média de 40 a 47%, respectivamente.

Figura 4.128: Prisma de maré nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC no estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva e seca de 2009. Prisma de maré (m³) e as taxas de descarga (FT) em horas. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m. Os valores numéricos se referem ao volume de água, e os números associados a FT, se referem a taxa de descarga.

4.5.3 Hidrodinâmica e Classificação do Estuário nas Estações de Chuva e Seca.

Para a estação de chuva, podemos observar que a variação temporal média da velocidade ($\bar{u}(t)$) na coluna de água chegou a valores próximos a 1 m s^{-1} , enquanto o nível de água apresentou decréscimo de 0,25 m ao longo do dia (Figura 4.129), quadro superior esquerdo). Na interface ZM/ZC, mesmo com um elevado volume fluvial, observamos que a velocidade média e a variação do nível apresentaram variação diária ligada à modulação da maré semi-diurna: o nível de água variou entre 5,18 m e 5,58 m, enquanto que as velocidades chegaram a $0,9 \text{ m s}^{-1}$ (Figura 4.129), quadro superior direito). Podemos observar, também, defasagem média de 1 h entre os picos de enchente e vazante, entre a velocidade e o nível de água.

Para a estação de seca, a variação da velocidade e do nível de água esteve muito mais atrelada à variação semi-diurna da maré local, enquanto que na interface ZR/ZM a altura média da maré foi de 1,4 m, apresentando defasagem média de 1 h entre os picos de máximo e mínimo, em maré vazante e enchente, respectivamente (Figura 4.129, quadro inferior esquerdo). Entretanto, na interface ZM/ZC, devido à assimetria das

curvas de velocidade e nível, a determinação de defasagem entre os eventos ficou comprometida, devido às curvas não apresentarem os pontos de inflexão entre os eventos de maré vazante e enchente (Figura 4.129, quadro inferior direito).

Figura 4.129: Variação temporal da velocidade $[\bar{u}(t)]$ média na coluna de água (linha pontilhada) e da profundidade $[h(t)]$ (linha cheia). Os dois painéis superiores referem-se às interfaces ZR/ZM (superior esquerdo) e ZM/ZC (superior direito) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se às interfaces ZR/ZM (inferior esquerdo) e ZM/ZC (inferior direito) na estação de seca.

A Figura 4.130 mostra a propagação da onda de maré, e sua influência no campo de salinidade para as estações de chuva e seca. Podemos observar nos painéis superiores, assimetria entre as curvas em ambas as interfaces, gerada pelo fluxo fluvial observado na estação chuvosa, evidenciado pelos baixos valores de salinidade.

Entretanto, na estação de seca, quando os fluxos fluviais apresentaram menor atuação no sistema estuarino, podemos observar uma defasagem média de 3 h entre os picos de mínimo e máximo para a interface ZR/ZM (Figura 4.130, quadro inferior esquerdo), enquanto que na interface ZM/ZC a diferença de fase entre as curvas foi de aproximadamente 40 min (Figura 4.130, quadro inferior direito). Esse comportamento mostra

que a propagação das altas salinidades ao adentrar no estuário sofre os efeitos do fluxo fluvial estuário abaixo, provocando defasagem em relação à maré dinâmica.

A interação entre a onda de maré propagando-se estuário acima e a morfologia local é responsável pela elevação da altura da maré e pelo aumento das intensidades das correntes. O aumento da altura da maré está atrelado ao afunilamento do canal estuarino na ZR/ZM e à menor atuação do atrito que promove a elevação da maré nesta região.

Figura 4.130: Variação temporal da salinidade $[S(t)]$ média na coluna de água (linha pontilhada) e da profundidade $[h(t)]$ (linha cheia). Os dois painéis superiores referem-se às interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se às interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de seca.

A Figura 4.131 mostra a influência da propagação da maré barotrópica através da análise da salinidade, obtida a partir da equação da continuidade e da componente longitudinal da equação do movimento simplificadas, afim de que se possa obter a componente longitudinal da força de gradiente de pressão, por unidade de massa reduzida à parcela barotrópica (Miranda et al., 2002). Da mesma forma como observado

na Figura 4.130, durante o período de chuva ocorre forte assimetria entre a maré e a variação de salinidade gerada pelo grande fluxo fluvial enquanto que, na estação de seca, a modulação semi-diurna da maré controlou a entrada da onda de maré no canal estuarino. Logo, o comportamento observado nos faz sugerir que a redistribuição de salinidade decorre exclusivamente do efeito advectivo da maré, pois em maré enchente a salinidade aumenta gradativamente estuário acima até o limite interior da ZM, enquanto que, em maré vazante, a salinidade diminui devido ao maior aporte de água fluvial represada na maré enchente.

Sendo assim, a onda salina, em uma dada posição longitudinal, apresentará defasagem de aproximadamente 3 h em relação à maré e às correntes, fato observado em período de baixa vazão fluvial para a ZM do estuário do Rio Jaguaribe.

Figura 4.131: Variação temporal da salinidade de natureza barotrópica $[S(t)]$ média na coluna de água e da profundidade $[h(t)]$. Os dois painéis superiores referem-se às interfaces ZR/ZM (superior esquerda) e ZM/ZC (superior direita) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se às interfaces ZR/ZM (inferior esquerda) e ZM/ZC (inferior direita) na estação de seca.

O diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1986) mostra que, durante a estação de chuva, devido à pequena salinidade observada, não foi possível a classificação do sistema estuarino (Figura 4.132). Entretanto, para a estação de seca, o sistema estuarino foi classificado como do tipo 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical), onde a circulação gravitacional é praticamente inexistente e o transporte de substâncias estuário acima é basicamente realizado por difusão turbulenta. O valor $\gamma=0,99$ indica transição entre os tipos 2a e 1a (bem misturado).

Figura 4.132: Classificação do estuário do Rio Jaguaribe para o ano de 2009. Stratification parameter é o parâmetro de estratificação e circulation parameter é o parâmetro de circulação.

4.5.4 Número de Richardson Estuarino e por Camada nas Estações de Chuva e Seca.

Durante a estação de chuva não foi possível calcular o número de Richardson estuarino (R_{ie}) devido ao grande volume fluvial. Entretanto, para a estação de seca, o número de R_{ie} calculado foi de 6,1 durante meio ciclo de maré. Este valor denota que o estuário na estação de chuva é fortemente dominado por elevadas descargas fluviais, enquanto que no período de seca a energia cinética da maré foi a principal forçante, com uma pequena participação da descarga fluvial.

A Figura 4.133 mostra uma comparação da variação temporal do número de Richardson por camada (Ri_L). Na estação de chuva, o comportamento do Ri_L mostrou uma condição de fraca estabilidade vertical (em geral $Ri_L > 2$), quando o estuário foi fortemente dominado pela descarga fluvial, enquanto que, durante a estação de seca, os valores observados para Ri_L foram em geral menores que 2, indicando condições de instabilidade vertical, período em que o estuário foi forçado predominantemente pela maré.

Analisando a distribuição dos números de Ri_L para cada interface, observamos que na ZR/ZM durante a estação de chuva (Figura 4.133, painel superior esquerdo) não temos nenhum valor que indique uma condição de alta estabilidade ($Ri_L > 20$). Entretanto, a maioria dos resultados obtidos oscila dentro da faixa de fraca estabilidade vertical ($2 < Ri_L < 20$) e, em determinados momentos, até mostram indicativos de instabilidade ($Ri_L < 2$), comportamento também observado na ZM/ZC. A variação observada para Ri_L em ambas as interfaces corroboram a afirmativa da unidirecionalidade do fluxo fluvial na estação de chuva e sua homogeneidade. Para a estação de seca todos os valores são menores que 2 ($Ri_L < 2$), indicando instabilidade vertical devido a uma maior atuação da maré no período.

Para a estação de seca, quando a energia cinética da maré apresentou papel preponderante na dinâmica estuarina, os números de Ri_L apresentaram valores que oscilaram dentro da faixa de elevada instabilidade vertical, mostrando uma condição de elevada mistura vertical, com um amplo domínio dos processos de mistura turbulenta.

Figura 4.133: Variação temporal do número de Richardson por camada. As linhas tracejadas delimitam: $Ri_L > 20$ mostra uma condição de alta estabilidade (linha superior); $2 < Ri_L < 20$ as condições são de fraca estabilidade vertical; e $Ri_L < 2$ mostram uma instabilidade vertical (linha inferior). Os dois painéis superiores referem-se as interfaces ZR/ZM (superior esquerdo) e ZM/ZC (superior direito) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se as interfaces ZR/ZM (inferior esquerdo) e ZM/ZC (inferior direito) na estação de seca.

4.5.5 Transporte de Sal nas Estações de Chuva e Seca.

A corrente de maré, a circulação gravitacional e a descarga fluvial são as três forçantes responsáveis pelo transporte advectivo de sal nos sistemas estuarinos: as duas primeiras atuam no transporte estuário acima e a terceira faz o transporte para a plataforma continental, ao largo. Entretanto, nos estuários parcialmente misturados e com fraca estratificação vertical (do tipo 2a) e os bem misturados (tipo 1a), o transporte de sal estuário acima é predominantemente gerado pela circulação gravitacional e pela difusão da maré.

Para a estação de chuva (Figura 4.134), o transporte de sal esteve predominantemente ligado aos processos de natureza advectiva (descarga fluvial), para as interfaces

ZR/ZM e ZM/ZC, demonstrando a forte influência fluvial durante a estação de chuva. Na estação de seca, a componente fluvial apresentou transporte de sal estuário acima ($1,6 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) na ZR/ZM, enquanto que na ZM/ZC o transporte foi estuário abaixo, com valores semelhantes. O transporte relacionado à componente da deriva de Stokes foi muito maior na interface ZM/ZC, chegando a valores de $3,5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, embora sua orientação estivesse apontando um transporte estuário acima (natureza difusiva), enquanto que o comportamento teórico esperado seria no sentido oposto. O transporte relacionado à deriva de Stokes, corresponde ao transporte de massa gerado pela propagação da onda de maré progressiva no estuário.

Figura 4.134: Componente do transporte advectivo de sal, associado às seguintes forçantes: descarga fluvial (1); deriva de Stokes (2); correntes de maré (3); circulação gravitacional (4); flutuações turbulentas (5); corrente residual (6) e correlação tríplice (7). Os histogramas (9) e (10) correspondem ao cálculo do transporte resultante da equação 3.38 e a soma de suas componentes. Os dois painéis superiores referem-se às interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de chuva. Os dois painéis inferiores referem-se às interfaces ZR/ZM (a esquerda) e ZM/ZC (a direita) na estação de seca.

O transporte advectivo de sal, estuário abaixo, gerado pela maré na interface ZR/ZM foi de $4,8 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$, enquanto que na interface ZM/ZC o transporte foi estuário acima ($3,7 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$). Nas duas interfaces, o transporte de sal relacionado à maré foi em direção à ZM. O acúmulo de sal na ZM, pode ocasionar em meses de balanço hídrico negativo à hipersalinização da ZM, mudando a orientação da componente longitudinal baroclínica da força de gradiente de pressão, por unidade de massa, que tipicamente é orientada estuário acima.

Outro transporte que devemos considerar está ligado às correntes residuais. Na estação de chuva, devido ao grande volume fluvial, não foi observado transporte ligado à esta componente. Entretanto, durante a estação de seca, as correntes residuais apresentaram transporte da mesma ordem de grandeza das correntes de maré, chegando a $4,8 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ na ZR/ZM e a $4 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ na ZM/ZC. O transporte de sal em direção a ZM do estuário do Rio Jaguaribe fica evidenciado nestas análises.

O transporte resultante de sal durante a estação de chuva, foi de $0,23 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ na ZR/ZM e de $0,65 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ na interface ZM/ZC. Para a estação de seca, o transporte resultante foi de aproximadamente $8 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ estuário abaixo, enquanto que na ZM/ZM os valores chegaram a $9 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. O transporte de sal associado à descarga fluvial mostrou maior atuação da maré na ZR/ZM na estação de seca, devido a um maior represamento de água fluvial, gerado ao longo de um ciclo de maré, enquanto que na ZM/ZC, o comportamento esteve intimamente atrelado à modulação da maré, fato corroborado pelo transporte gerado pelas correntes de maré.

4.5.6 Transporte de Material Particulado em Suspensão nas Estações de Chuva e Seca.

A distribuição espacial de material particulado em suspensão (MPS) no estuário do Rio Jaguaribe na estação chuvosa (Figura 4.135) mostra que as maiores concentrações de MPS ocorreram ao longo do canal estuarino, variando de $66,8$ a $75,4 \text{ mg l}^{-1}$, com média de $72,3 \text{ mg l}^{-1}$ para a interface ZR/ZM. Para a interface ZM/ZC, as concentrações observadas de MPS foram de $54,8$ a $81,4 \text{ mg l}^{-1}$, com média de $74,8 \text{ mg l}^{-1}$. Na PCI, as concentrações variaram entre $21,9$ e $62,2 \text{ mg l}^{-1}$, com valores médios de

39,7 mg l⁻¹. A elevada concentração de MPS está associada ao elevado volume hídrico observado nesta estação, resultando na formação de uma pluma de MPS na PCI, que alcançou aproximadamente 6 km de extensão, fato já observado por Dias et al. (2010) em estudo realizado sobre as massas de água presentes nesta região.

Durante a estação de seca, as concentrações de MPS variaram entre 11,7 e 20,6 mg l⁻¹, com média de 18,2 mg l⁻¹, e de 15,2 a 52,9 mg l⁻¹, com média de 29,6 mg l⁻¹, para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, respectivamente. Na PCI as concentrações de MPS variaram entre 18,7 e 47,7 mg l⁻¹, com média de 28 mg l⁻¹. Analisando as concentrações de MPS em eventos de maré vazante e enchente, podemos observar que os menores valores foram observados na interface ZR/ZM (Figura 4.136), chegando a 58,5 mg l⁻¹ na interface ZM/ZC. Entretanto, em maré enchente (Figura 4.137), devido a um menor aporte fluvial e a uma maior atuação de águas marinhas, as concentrações de MPS variaram entre 52,8 e 58,5 mg l⁻¹.

Um comportamento interessante em relação às concentrações de MPS foi a diminuição de suas concentrações na estação de seca, ficando a variação do MPS atrelada à modulação da maré local. As Figuras 4.136 e 4.137 mostram que em evento de maré vazante as maiores concentrações de MPS então localizadas próximas a foz do Rio Jaguaribe, dentro da região de influência da ZC. Quando a maré começa a encher, podemos observar que a zona onde encontramos as maiores concentrações de MPS se estende até a parte interior da ZM. Na transição entre as interfaces ZR/ZM, existe uma região onde as velocidades resultantes de movimentos convergentes, descarga fluvial e propagação da onda de maré, foram praticamente nulas, estando associada à elevadas concentrações de MPS, formando a *zona de máxima turbidez*, mapeada pela primeira vez no estuário do Rio Jaguaribe.

Figura 4.135: Transporte do material particulado em suspensão (MPS), em mg l^{-1} , no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante a estação de chuva de 2009. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''$ W / $4^{\circ}32'20''$ S) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''$ W / $4^{\circ}27'00''$ S).

Figura 4.136: Transporte do material particulado em suspensão (MPS), em mg l^{-1} , no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante evento de maré vazante, para a estação de seca de 2009. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''$ W / $4^{\circ}32'20''$ S) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''$ W / $4^{\circ}27'00''$ S).

Figura 4.137: Transporte do material particulado em suspensão (MPS), em mg l^{-1} , no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante evento de maré vazante, para a estação de seca de 2009. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''$ W / $4^{\circ}32'20''$ S) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''$ W / $4^{\circ}27'00''$ S).

O balanço das concentrações de MPS entre o estuário do Rio Jaguaribe e a plataforma continental interna pode ser observado na Figura 4.138. Assim como para a variação espacial do MPS nas estações de chuva e seca (Figuras 4.135, 4.136 e 4.137), quantificamos o balanço de MPS no estuário, observando retenção de $40,3 \text{ mg l}^{-1}$ na ZM, entre eventos de maré vazante e enchente, durante a estação de seca. Ao observarmos as concentrações médias de MPS na PCI e na interface ZM/ZC em maré enchente, sugerimos que grande parte do MPS presente na ZM tem origem marinha ou é resultado da erosão de margens e retrabalhamento de material de fundo.

Figura 4.138: Balanço das concentrações de MPS (mg l^{-1}) no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante as estações de chuva e seca de 2009. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m. Os valores numéricos se referem as concentrações de MPS, os valores entre parênteses são as médias dessas concentrações.

Podemos observar também que as concentrações de MPS diminuíram em média 72% na ZR/ZM e 21% na ZM/ZC na estação de seca em relação à estação de chuva. Este comportamento se deve ao menor aporte fluvial e à maior atuação das águas marinhas durante a estação de seca, quando pudemos observar a formação da zona de máxima turbidez na região interna da ZM. Mesmo durante estação de seca, quando normalmente as concentrações de MPS são muito próximas às encontradas em áreas oceânicas, medimos valores de MPS na ZM muito próximos aos encontrados na estação de chuva, devido à resuspensão de material de fundo ou erosão de margens como destacado anteriormente.

Calculando os fluxos de MPS (Figura 4.139) podemos observar que durante as maiores descargas fluviais a bacia de drenagem levou ao estuário um fluxo médio de

$2,9 \times 10^6 \text{ ton ano}^{-1}$, enquanto que na interface ZM/ZC a descarga média foi de $2,0 \times 10^6 \text{ ton ano}^{-1}$, resultando em contribuição média para a plataforma continental interna de aproximadamente $4,9 \times 10^6 \text{ ton ano}^{-1}$. O balanço na estação de seca nos mostra que, em evento de maré vazante, as descargas de MPS na interface ZR/ZM foram de $1 \times 10^5 \text{ ton ano}^{-1}$, enquanto que na ZM/ZC chegaram a $4,1 \times 10^5 \text{ ton ano}^{-1}$. Em evento de maré enchente, a contribuição observada foi de $1,1 \times 10^6 \text{ ton ano}^{-1}$ na interface ZM/ZC e de $1,3 \times 10^5 \text{ ton ano}^{-1}$ na ZR/ZM.

Do fluxo total de MPS que entra no sistema estuarino durante a maré enchente na ZM/ZC, 32% contribui com a descarga de MPS em maré vazante, enquanto que o restante, fica retido na ZM. Este comportamento nos faz sugerir que o estuário do Rio Jaguaribe para o período avaliado foi um exportador de materiais na quadra chuvosa e importador no período de menor domínio fluvial, sendo que mais de 60% do fluxo de MPS ficou retido na ZM, fato já evidenciado na distribuição espacial de MPS.

Figura 4.139: Descargas de MPS (ton ano^{-1}) no estuário do Rio Jaguaribe (ZR/ZM e ZM/ZC) e na PCI, durante as estações de chuva e seca de 2009. A distância entre ZR/ZM e ZM/ZC é da ordem de 25 km, com uma profundidade média de 4 m.

Figura 4.140: Variação morfológica de fundo do estuário do Rio Jaguaribe entre os anos de 2004 (à esquerda) e 2009 (à direita), períodos de grandes descargas fluviais para o sistema estuarino do Rio Jaguaribe. ZR/ZM ($37^{\circ}47'22''$ W / $4^{\circ}32'20''$ S) e ZM/ZC ($37^{\circ}47'35''$ W / $4^{\circ}27'00''$ S). Os valores numéricos referen-se as descargas de MPS, e os valores entre parênteses são os valores médios.

Capítulo 5

Discussões.

5.1 As Regiões da Plataforma Continental.

Seguindo o proposto por Castro (1996) para a plataforma continental norte do estado de São Paulo, os resultados apresentados nesta tese sugerem a divisão da plataforma continental leste do estado do Ceará, mais especificamente ao largo do Rio Jaguaribe, em três regiões: **Externa**, **Média** e **Interna**.

A Plataforma Continental Externa (PCE) localiza-se entre a quebra da plataforma continental e a frente térmica de fundo. O limite interno da PCE fica a uma distância média de 50 km da linha de costa, entre as isóbatas de 50 e 100 m. A PCE apresenta pequena estratificação vertical para os níveis abaixo de 50 m embora a termoclina seja mais pronunciada na estação chuvosa. Outra característica marcante da PCE é a pequena variação sazonal de temperatura e salinidade superficiais, chegando a valores de 28,2 °C e 35,5, para a estação de chuva, e de 27,0 °C e 36,2 durante a estação seca, respectivamente. Junto ao fundo, os valores de temperatura e salinidade observados praticamente não variaram durante o ano: foram de 24,6 °C e 36,4 para a estação de chuva e de 24,9 °C e 36,4 para a estação seca, respectivamente. A densidade convencional superficial variou de 22,6 a 23,5, para as estações de chuva e seca, respectivamente. Junto ao fundo, σ_t foi de 23,6 para as duas estações. Durante a estação seca, observamos a presença de águas mais salinas ($S \geq 36$) e frias próximas a superfície, resultando na inversão do gradiente superficial de salinidade devido à presença da AT. Ainda na estação de seca, a intrusão da AT atinge a Plataforma Continental Média

(PCM).

Fisicamente, podemos caracterizar a PCM como uma região relativamente homogênea na estação de chuva, apresentando intrusão mais acentuada de água da termoclina na estação de seca. Em geral, a variação das temperaturas e salinidades em superfície foi de 28,3 °C a 27,3 °C e de 35,3 a 36, respectivamente, enquanto que no fundo a variação observada ficou entre 28 °C e 27 °C e 35,5 e 36,2, para as estações de chuva e seca, respectivamente. A densidade convencional variou de 22,9 a 23,6 em superfície, e de 23 a 23,7 no fundo, para as estações de chuva e seca, respectivamente. Durante a estação de chuva a PCM foi tomada, em quase toda sua extensão, pela presença de uma massa de água mais quente e menos salina (AC), com pequena atuação da AT no limite externo da PCM.

Localizada entre o limite interno da FTF e o limite externo da FHS, a PCM apresentou pequena variação espacial entre as estações. Na estação de chuva, os limites interno e externo encontram-se a uma distância média de 20 a 50 km da linha de costa dura, enquanto que, na época de seca, esta distância fica entre 20 e 40 km. Normalmente, o limite interno da PCM situa-se horizontalmente próximo a isóbata de 10 m, para a estação de chuva e seca, enquanto seu limite externo localiza-se horizontalmente nas proximidades da isóbata de 50 m na estação de chuva e sobre a isóbata de 30 m na estação de seca.

A presença mais pronunciada da AT na PCCE pode ser explicada pelo estudo realizado por Marin (2009). O autor observou a presença de 3 massas de água ao largo da plataforma continental do Rio Grande do Norte (RN): AT entre 0-300 m, ACAS entre 300-600m e Água Intermediária Antártica (AIA) entre 600-1000m. Ainda em seu estudo, o autor observou a presença de uma estrutura frontal de mesoescala (vórtice ou meandro), que seria uma resposta da CNB e SNB à mudança abrupta da linha de costa no Cabo do Calcanhar, denominada de *Vórtice de Macau* (VM) (Figura 5.1).

Figura 5.1: Mapa de velocidade de correntes observadas para o nível de 100 m, ao longo da isóbata de 1000 m. Podemos notar a presença do Vórtice de Macau, localizado entre Fortaleza e Natal. Figura gentilmente cedida por Marin (2009).

A presença desta feição de mesoescala foi observada por vários autores (Silveira, 1990; Goni e Johns, 2001; Krelling, 2010) em estudos realizados na Plataforma Continental Nordeste (PCNE) e na Plataforma Continental Norte (PCN). Goni e Johns (2001) identificaram a formação de 40 feições típicas de mesoescala (vórtices e anéis) entre os anos 1992 e 1998, sendo 24 destas feições claramente identificadas e associadas à CNB e à região da sua retroflexão. O autor enfoca que a trajetória destas estruturas foi preferencialmente para NW, podendo ser observadas em profundidades de até 3000 m, com frequência anual de ocorrência de 4 anéis e 1,5 vórtices. Krelling (2010) observou a formação de vórtices em diferentes níveis da coluna de água. Segundo a autora, grande parte destas estruturas de mesoescala pode adentrar a plataforma continental, transportando águas mais frias à mesma. Os vórtices e anéis observados por Goni e Johns (2001), Marin (2009) e Krelling (2010), são responsáveis pelo transporte do talude

continental para PCE e PCM.

A Plataforma Continental Interna (PCI) localiza-se entre a linha de costa e o limite interno da PCM. A largura da PCI varia principalmente em escala sazonal, sendo maior durante a estação de chuva e mais estreita, ou praticamente não existindo, durante o período de seca. Durante a estação de chuva, a PCI apresentou seu limite externo a uma distância média de 6 km da linha de costa, atingindo a isóbata de 10 m enquanto que, na estação de seca, a PCI ficou limitada ao primeiro quilômetro pós linha de costa. A acentuada variação da pluma estuarina na PCI, entre estações, indica que na estação de seca o fluxo hídrico é minimizado de forma drástica, impossibilitando, quase que por completo, a formação da pluma estuarina, com a AC dominando toda a região da PCI. Entretanto, durante a estação de chuva, observou-se a presença de águas mais quente e menos salinas (AR) na PCI, sobrepondo-se às águas mais salinas e frias (AC) da plataforma continental.

A principal característica da PCI é apresentar elevada estratificação na estação de chuva e quase-homogeneidade na estação de seca. Para a estação de chuva, a temperatura e a salinidade em superfície foram de 29,2 °C e de 30, enquanto que no fundo chegaram a 29 °C e 33,8, respectivamente. Para a estação de seca, a homogeneidade nos campos de temperatura e salinidade observado apresentou valores em superfície de 27,7 °C e 36,6 e no fundo, os valores observados foram de 27,6 °C e 36,8, respectivamente. A densidade convencional, da superfície ao fundo, variou entre 18,2 e 21,1 na estação de chuva, e de 23,7 a 23,8 na estação de seca. A frente da pluma estuarina delimita a Camada Limite Costeira, que é o limite externo da zona costeira, segundo os critérios definidos por Miranda et al. (2002).

A flutuação da pluma sobre a AC depende basicamente de dois parâmetros: a diferença de densidade entre a pluma e camada de água logo abaixo e o número densimétrico de Froude. Se não há mistura significativa das massas de água através da interface, a pluma tende a ficar mais delgada, ao mesmo tempo em que se espalha lateralmente. Este comportamento foi observado nas distribuições horizontal (Figura 4.36) e vertical (Figura 4.38, A e B) da pluma estuarina na região da PCI. Ou seja, durante a estação de chuva, a PCI apresentou águas mais quentes e menos salinas, devido ao intenso aporte fluvial, promovendo a formação de variações verticais maiores de tem-

peratura e salinidade (termoclina e haloclina). Na estação de seca, a homogeneidade dos campos termohalinos foi a principal característica observada. A falta de estudos sobre a influência da descarga fluvial, na região da PCI, de outros estuários cearenses não nos permite afirmar que este é o comportamento típico para a costa cearense.

Em uma analogia com o estuário do rio Amazonas, resguardando as devidas proporções do volume fluvial aportado na PCI, (Curtin, 1986; Curtin e Legeckis, 1986; Limebuerner e Beardsley, 1991; Linhares, 1995; Silva et al., 2005), estudaram a resposta da plataforma continental a intrusão de massas de águas continentais e oceânicas. Linhares (1995) e Silva et al. (2005) mostram em distribuições verticais realizadas na PCI, que a AC ocupa a porção superficial (0-30m) da coluna de água e, logo abaixo, encontra-se a AT, que apresenta sua interface de mistura com a ACAS entre 70 e 80 m. Os autores ressaltam que as profundidades das interfaces variam com a época do ano, com a descarga fluvial e com o transporte associado à CNB. Ressaltamos que as descargas líquidas entre os dois estuários são completamente distintas, pois o estuário do Rio Amazonas apresenta um fluxo médio de $180.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, podendo chegar a $220.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no período de chuvas, e o estuário do Rio Jaguaribe, segundo Dias et al. (2009) e Dias et al. (2011) nos períodos de elevadas descargas fluviais apresenta descarga média de água doce de $1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, com picos de até $1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

As frentes são caracterizadas como zonas em que ocorre a intensificação do gradiente quase-horizontal de uma ou mais propriedades físicas, embora muitas vezes separem massas de águas com diferentes origens e propriedades físico-químicas. Os resultados apresentados neste trabalho mostram a presença de três frentes na plataforma continental, conforme esquematizado na Figura 5.2. A Frente Térmica de Fundo (FTF) associada às intrusões, mais ou menos intensas das águas transportadas pela CNB ao longo da quebra da PC, em direção à costa. Segundo Silveira et al. (1994), a CNB em seu escoamento natural, sobre o talude continental, transporta em superfície AT e, na camada subsuperficial ACAS, em uma coluna de água de aproximadamente 600 m. Durante a estação de chuva, o transporte da CNB é da ordem de $13 Sv$, chegando a $27 Sv$ na estação de seca. O aumento do transporte da CNB no segundo semestre do ano faz com que a parte superficial dessa coluna de água tenha maior penetração na PC em direção à costa, promovendo maior mistura entre AT e AC, como pode-

mos observar nas Figuras 4.40 e 4.42, A e B. A FTF é formada na região que separa a água relativamente fria, identificada como AT, da água mais quente característica da zona mais interna da PC, que denominamos de AC. Como consequência, a FTF separa, na camada profunda, águas de origem oceânica (AT) de águas com origem costeira (AC), caracterizando a intersecção com o fundo da termoclina. A variação espacial e sazonal da FTF no limite interno da PCE, sugere que a escala de intrusão da AT sobre a plataforma é maior na estação de seca. Como não existem estudos na literatura para a PCCE que expliquem a variação sazonal do fluxo de fluatibilidade devido às trocas de calor e massa na interface oceano-atmosfera, sugerimos que a localização da FTF está associada à penetração de água mais fria oriunda da CNB em direção à costa. Este fato também foi observado por Castro (1996) para PCSE, evidenciando maior transporte da CB, de água mais fria, em direção à costa, caracterizando nesta região a presença da ACAS.

A Frente Halina Superficial (FHS), principalmente durante a estação de chuva, apresentou características de frente de quebra de plataforma continental, localizada, para esta estação, sobre a Quebra da Plataforma Continental (QPC). Na região da QPC, a FHS delimita a área de atuação de duas massas de água de origens diferentes. Do lado externo da frente, situa-se à AC, como resultado da mistura da própria AC com à AT, enquanto que no lado interno da frente ocorre o predomínio da água de continental (AR). Desta forma, sugerimos que a FHS em seu limite externo, separa águas de origem oceânica (AT) de águas costeiras (AC), e no limite interno define a área de influencia da massa de água continental (AR) sobre a PCI. A variação da FHS na região da QPC depende do volume de água transportado pela CNB em direção à costa ou da presença de estruturas frontais de mesoescala presentes na região, como as descritas por (Silveira, 1990; Goni e Johns, 2001; Krelling, 2010). Na região da PCI, essa variação depende da intensificação ou minimização do aporte fluvial oriundo da drenagem continental.

Figura 5.2: Representação esquemática das regiões da Plataforma Continental Leste do Ceará durante a estação de chuva (superior) e seca (inferior). FHS significa frente halina superficial; FTF significa frente térmica de fundo; PCI, PCM e PCE as regiões interna, média e externa da plataforma continental, respectivamente. As profundidades estão expressas em m e as distâncias horizontais em km.

O comportamento das frentes e a disposição das massas de água sobre a plataforma continental leste do estado do Ceará, é similar ao comportamento descrito por Miranda (1982), Silva (1995), Castro (1996), Amor (2004) e Godoi (2005) para a PCSE, e por Curtin (1986), Curtin e Legeckis (1986), Limebuerner e Beardsley (1992), Linhares (1995) e Silva et al. (2005) para a plataforma continental Amazônica (PCA), onde as frentes térmica e halina variam espacial e sazonalmente com a intensificação da intrusão da ACAS, na PCSE e da AT mais ACAS sobre a PCA, aumentando ou não o processo de mistura entre as massas de água.

5.2 Correntes.

5.2.1 Plataforma Continental.

5.2.1.1 - Correntes Submaregráficas.

O padrão de vento para a PCCE foi evidenciado por Camelo et al. (2008) em estudo sobre a variabilidade sazonal do vento na costa cearense. Os autores mostram que a intensidade média do vento é de 5 m s^{-1} durante o dia, e entre 2 e 4 m s^{-1} durante a noite, corroborando os resultados obtidos neste estudo. Em uma comparação da variação sazonal do vento local, Camelo et al. (2008) mostraram que os ventos observados no segundo semestre do ano (estação de seca) são frequentemente mais fortes que os observados na estação chuvosa. Em termos quantitativos, os autores mostram que, a diferença de magnitudes entre as estações pode chegar a 3 m s^{-1} , corroborando com a maior intensidade do vento médio observado neste estudo para a estação de seca.

Como uma das possíveis causas da maior intensidade da velocidade média do vento na estação de seca, podemos mencionar os fenômenos meteorológicos locais, de características semelhantes ao vento Aracati que, apresenta maior intensidade no período de balanço hídrico negativo, atuando de forma constante na região costeira e ao longo do Rio Jaguaribe. Esse fenômeno provoca máximos de velocidade no período noturno. Segundo Camelo et al. (2008) e Silva et al. (2010) este fenômeno local está associado à de brisas marinhas e terrestre.

Ao analisarmos os dados de vento nas direções paralela e normal à batimetria para as estações de chuva e seca, a componente normal no período diurno apresentou maior variância do que a componente paralela nos períodos sinóticos. Este comportamento sugere a presença de brisa marinha, corroborando os resultados obtidos por Camelo et al. (2008) e Silva et al. (2010). Silva et al. (2010) analisaram a velocidade média horária do vento entre os anos de 2003 e 2009, verificando um ciclo diário bem definido, com amplitude próxima de $4,2 \text{ m s}^{-1}$. Os autores mostraram que os valores médios foram maiores no período diurno e menores no período noturno e início da manhã, em concordância com os resultados observados por Camelo et al. (2008). Ainda, Silva et al. (2010) observaram que o ciclo diário sugere interação entre a circulação de grande

escala (ventos alísios) e a circulação local (brisa marinha e terrestre), com velocidades máximas horárias ocorrendo entre 14 e 17 horas, com valores que podem chegar a $6,9 \text{ m s}^{-1}$. As velocidades mínimas ocorrem entre 7 e 9 horas, com valores de até $2,6 \text{ m s}^{-1}$. Silva et al. (2005) em estudo realizado na PCA observou que os ventos são predominantemente de SE de junho a novembro e de NE nos meses de dezembro a maio, mostrando o mesmo padrão observado na PCCE.

Em conclusão, utilizando os dados apresentados por Camelo et al. (2008) e Silva et al. (2010) para a região da PCCE, podemos dizer que a brisa marinha é a variabilidade mais energética na série temporal do vento local, sendo responsável por mais de 65% da variância total. Para as duas séries de vento (chuva e seca) que analisamos, a direção média preferencial observada foi para NW, ressaltando a passagem da ZCIT sobre o estado do Ceará em direção ao hemisfério Norte, o que gera nesta região um vento típico de leste, devido aos ventos alísios de SE. Isto mostra que, para a PCCE, o vento remoto pode ser um importante agente na transferência de momentum para o oceano e que, na PCI, a brisa marinha e terrestre pode exercer influência nas correntes.

Uma característica marcante da variação espacial do campo de correntes na área não costeira da PCCE é a ocorrência das maiores velocidades na região mais próxima à costa, diminuindo monotonicamente suas intensidades em direção ao largo. Para a PCI, observamos um comportamento oposto: as maiores velocidades foram observadas na região mais ao largo da foz do estuário, diminuindo com a proximidade da costa. Este fato se deve, muito provavelmente, à intrusão de águas continentais na região da pluma estuarina, fazendo com que as velocidades resultantes, movimento norte-sul para AR e leste-oeste para AC, fossem menores que as observadas ao largo. Entretanto, não observamos inversão das correntes na PCI, ao longo da direção vertical, pois as velocidades diminuíram monotonicamente com o aumento da profundidade, chegando a valores mínimos junto ao fundo.

Diante do quadro exposto até aqui, calculamos a espessura da camada de Ekman (D) para a PCCE, usando a equação seguinte Csanady (1982).

$$D = 0,1 * \frac{u_*}{|f_0|} \quad (5.1)$$

onde u_* , a velocidade do atrito, foi calculado como:

$$u_* = \sqrt{\left(\frac{\tau_s}{\rho}\right)} \quad (5.2)$$

sendo τ_s calculado de acordo com a equação 3.16 para um vento de 8 m s^{-1} ; f_0 é o parâmetro de Coriolis ($f_0 = 2\omega \sin \theta_0$, onde ω é a velocidade angular de rotação da Terra e θ_0 é a latitude) e ρ é a densidade da água do mar. Na equação 3.16 usamos o valor $1,4 \times 10^{-3}$ para o coeficiente de arrasto com o fundo e $1,22 \text{ Kg m}^{-3}$ para a densidade do ar.

A espessura calculada da camada de Ekman para a PCCE, para esses valores numéricos foi de aproximadamente 100 m ($D \approx 100 \text{ m}$). Aplicando a mesma equação, com os mesmos valores numéricos para a PCSE obtemos 18 m.

No oceano profundo, a TCV transfere energia para a coluna de água gerando correntes que diminuem de intensidade com o aumento da profundidade dentro da camada de Ekman. Na PCCE o vento local apresentou direção de máxima variância aproximadamente paralela às isobatimétricas, para as estações de chuva e seca, com direção preferencial para NW. A ação contínua do vento para NW, associado a velocidades quase-constantes durante todo o período, transfere momentum das camadas superficiais até as mais profundas, ocasionando ainda empilhamento de água na região mais próxima à costa, elevando a altura da superfície livre do mar nesta região, devido à convergência do transporte de deriva do vento com a costa. Essa elevação gera FGP normais, apontando para o largo, as quais são balanceadas, em maior ordem, pela força de Coriolis, resultando num movimento geostrófico paralelo às isóbatas, com mesma direção e sentido que o vento forçante, chamado corrente de inclinação. Este fato é evidenciado na distribuição espacial do campo de correntes na PCCE pois, para as estações de chuva e seca, as maiores velocidades ocorreram na região da isóbata de 10 m, onde a inclinação da superfície do mar é maior e, conseqüentemente a FGP também é maior.

Pela nossa estimativa, a espessura da camada de Ekman foi maior que a profundidade local máxima da PCCE. Nestas circunstâncias, as correntes de deriva do vento fluem quase que na direção do vento, somando-se às correntes de inclinação. Nossas

observações mostraram correntes fluindo preferencialmente para NW, em resposta a ventos praticamente de E para ambas as estações. Nota-se que a corrente gerada é essencialmente barotrópica, pois depende da inclinação da superfície livre do mar e do fluxo quase-unidirecional das correntes de deriva do vento.

Logo, o modo barotrópico se torna mais importante da superfície ao fundo. Os movimentos paralelos são dominados pelo modo barotrópico, o qual explica mais de 91% da variância em qualquer profundidade (Figuras 4.66 e 4.68). Na direção normal, a estrutura vertical das correntes é complicada, pois nenhum dos três modos isoladamente tem energia suficiente para explicar mais de 90% dos registros. Castro (1996) e Dottori e Castro (2009) observaram comportamento semelhante para a PCSE.

As estações de chuva e seca na PCCE se diferenciaram devido à menor variação espacial do campo de correntes que, na estação de chuva, chegou de maneira quase uniforme a distâncias de cerca de 60 km da linha de costa enquanto que, na estação de seca, limitou-se espacialmente entre as isóbatas de 10 e 30 m, a aproximadamente 35 km da costa. Essa pequena variação horizontal do campo de correntes, em superfície, meia água e fundo, também comprova a resposta essencialmente barotrópica da PCCE à forçante do vento. Para a PCI, as maiores velocidades ocorreram na região ao largo da foz do Rio Jaguaribe, diminuindo gradativamente em direção à costa.

Nossa discussão até aqui mostra que as correntes paralelas às isobatimétricas são uma resposta das águas da PCCE ao vento forçante, sugerindo para as estações de chuva e seca de 2009, o caráter barotrópico da mesma. A análise dos diagramas vectoriais progressivos (DVP) (Figuras 4.63 e 4.61) confirmaram esse deslocamento preferencial para NW. Castro (1996) em estudo realizado na PCSE, também observou que o deslocamento médio foi para S-SE, aproximando-se da direção paralela às isóbatas, seguindo a direção de atuação do vento.

Os espectros de coerência entre a componente paralela das correntes e a TCV mostrou picos significativos entre 0,2 cpd e 0,4 cpd, mostrando que as atividades nos períodos curtos ($T < 5$ dias), estiveram sempre presentes como as mais energéticas para as componentes paralelas das correntes, sendo observadas em todas as profundidades. Comportamento também observado nos gráficos de fase, onde os picos mais significativos foram encontrados nos períodos de curta oscilação. Signorini e Miranda

(1983) em estudo realizado na PCCE, mostraram que as correntes submaregráficas são localmente impulsionadas pelo vento. A baixa defasagem observada nos curtos períodos em ambas estações de seca e chuva, mostra que os fluxos costeiros são fortemente correlacionados com o vento local. Desta maneira, os resultados observados neste trabalho confirmam que o vento paralelo local é o principal mecanismo gerador das correntes submaregráficas na PCCE.

Na região da PCI a descarga estuarina acarreta a geração de uma força de gradiente de pressão baroclínica normal à costa. Esta última induz movimentos para a esquerda da descarga fluvial a fim de que o equilíbrio geostrófico na direção normal à costa seja mantido. Além disso, os ventos provenientes de E-NE confirmam a descarga fluvial do estuário do Rio Jaguaribe nas proximidades da costa e contribuem com as correntes baroclínicas para NW. Isto é, na PCI durante a época chuvosa, a corrente de inclinação devido ao vento E-NE, impulsionada pela FGP barotrópica, ela própria essencialmente barotrópica e para NW, soma-se a corrente devida à descarga estuarina, impulsionada pela FGP baroclínica, também essencialmente baroclínica e para NW.

O comportamento das águas da PCCE a um vento uniforme oriundo de NE no experimento numérico realizado para a estação de chuva e de SE na estação seca, mostrou elevação do nível do mar de até 0,05 m nas proximidades da costa, valor que pode ser considerado pequeno para o vento utilizado (8 m s^{-1}), caso não levemos em consideração a baixa latitude da região modelada. Este comportamento também foi observado por Soares e Castro (1996) em seus experimentos numéricos na mesma PC. Os resultados encontrados pelos autores mostraram empilhamento de água na costa para vento de NE, chegando a valores de 0,02 m para a elevação do nível do mar e velocidades paralelas associadas que variaram entre 0,03 e $0,14 \text{ m s}^{-1}$, além de velocidades normais muito pequenas. Ainda em seu estudo, Soares e Castro (1996) construíram um modelo com profundidade constante e com grade regular, utilizando as mesmas tensões de cisalhamento do vento dos experimentos com batimetria variando no espaço. Essa grade foi forçada em duas latitudes médias: ($f = -6,4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), resultando em elevações do nível do mar de 0,20 m e para baixas latitudes ($f = -9,7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$), apresentando elevações de 0,03 m confirmando a importância do parâmetro de *Coriolis* na elevação ou rebaixamento do nível do mar, via ajuste geostrófico.

Os resultados dos experimentos realizados na estação de seca apresentam grande semelhança com aqueles da estação de chuva, com a componente paralela da TCV maior que a componente normal, induzindo processos físicos associados à componente paralela do vento. A distribuição espacial do campo de correntes modelada nos faz sugerir que, próximo à costa, o balanço na direção normal é geostrófico, entre as componentes da força de gradiente de pressão devida à inclinação da superfície do mar e a força Coriolis associada à velocidade paralela à costa e, na direção paralela, o atrito com o fundo pode ser um fator controlador das velocidades. Este aparente comportamento corrobora os resultados encontrados por Soares e Castro (1996) na PCCE.

A elevação do nível do mar, nas primeiras horas de integração do modelo numérico, para os experimentos de chuva e seca é desordenada (Figuras 4.113 e 4.117). Após o estado quase-estacionário ser atingido ($t = 24$ horas), as isolinhas da elevação da superfície do mar tendem a se manter paralelas à costa. Ou seja, os maiores valores para η , durante a estação de seca, se devem à componente paralela à costa da TCV ser maior nesta época do ano.

De modo geral podemos sugerir que os resultados obtidos nos experimentos numéricos realizados durante as estações de chuva e seca são semelhantes, pois a altura da superfície do mar e as velocidades das correntes após 7 dias de integração do modelo numérico são parecidas.

Em relação à variação espacial do campo de correntes, observa-se durante os dois experimentos que o fluxo dominante é predominante para NW, praticamente paralelo à direção média das isóbatas em todo o domínio do modelo, concordando com o padrão de vento local e com o cenário sinótico das correntes observadas na região, como demonstrado no Capítulo 4, Seção 4.2. Os resultados observados e modelados para o campo de correntes nas estações de chuva e seca, estão sintetizados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Valores médios do campo de corrente observada e modelada (m s^{-1}) para a PCCE.

	Observada		Modelada	
	Velocidade	Direção	Velocidade	Direção
Chuva	0,67	W-NW	0,43	W-NW
Seca	1,04	NW	0,55	NW

Em termos quantitativos, as velocidades modeladas chegaram a 64% do valor total das velocidades observadas na estação de chuva e a 52% na estação de seca. Os menores valores das correntes modeladas em relação às correntes observadas se devem, muito provavelmente, à utilização de um vento estacionário que embora represente as velocidades e direções médias dos períodos de chuva e seca, podem induzir o modelo a gerar correntes subestimadas.

5.2.1.2 - Correntes de Maré.

A distribuição de energia entre as correntes de maré e as correntes de maior período mostram que, para a componente paralela à batimetria as correntes na frequência submaregráfica são dominantes, contribuindo com mais de 70% da variância, enquanto que, para a componente normal, observa-se um aumento significativo da energia relativa às correntes de maré, em todas as profundidades observadas, pois estas contribuem com cerca de 55% da variância total.

A análise harmônica e espectral das séries de tempo das correntes de maré para as estações de chuva e seca, mostraram que as componentes semidiurnas (M_2 e S_2) apresentaram comportamento tipicamente barotrópico, com elipses girando no sentido horário e polarizadas na direção normal à batimetria, com maiores intensidades na PCE e PCM, corroborando resultados apresentados por Castro (1996) para a costa brasileira. A componente de corrente semidiurna, M_2 , é a principal responsável pelas oscilações do nível do mar na PCCE, seguida pelas componentes S_2 , K_1 e O_1 .

O resultado da modelagem numérica para as principais componentes da maré indica equilíbrio hidrodinâmico em aproximadamente 24 horas de integração numérica. Isto significa que foram necessários no máximo dois ciclos das componentes semidiurnas para a obtenção do equilíbrio hidrodinâmico. As elipses das correntes de maré que representam as componentes semi-diurnas M_2 e S_2 mostram alta intensidade e polarização elevada, cujas orientações são comumente na direção normal à direção média das isobatimétricas, principalmente na região leste do domínio. Como podemos observar nas Figuras 4.121 e 4.122, as elipses das correntes de maré, em geral, se degeneram em segmentos de reta, devido à desproporção observadas entre os semi-eixos maior e menor (Maior $\gg$ Menor).

A componente semi-diurna da maré M_2 representa a principal componente da maré nesta região. De fato, esta onda apresenta amplitudes de 1,02 m na região ao largo do Rio Jaguaribe, e de 0,8 m na região da isóbata de 100 m. As componentes diurnas, O_1 e K_1 , apresentaram o mesmo comportamento, com as maiores amplitudes ocorrendo na porção NW do domínio. O sistema de propagação das principais componentes da maré semi-diurna e diurna é basicamente de NE para SW.

Na PCCE a maré apresentou um caráter de co-oscilação com o oceano profundo, na forma de ondas estacionárias transversais, comportamento corroborado pelas fases e pelo eixo maior das elipses de maré modeladas e observadas, orientado na direção normal.

A Tabela 5.2 mostra amplitudes e fases para as componentes semi-diurna e diurna da maré. Podemos observar que os resultados modelados para a inclinação das elipses das correntes de maré são sistematicamente menores que os valores observados para a região, embora a diferença não exceda 22° , exceto para a componente diurna O_1 , onde a fase modelada foi maior que a observada. Este comportamento também foi observado por Fontes (2000) para a Plataforma Continental Amazônica.

Tabela 5.2: Amplitudes (m) e fase em Greenwich ($^\circ$) observada e modelada, durante as estações de chuva e seca de 2009.

Frequência	Modelada		Observada	
	Amplitude	Fase	Amplitude	Fase
M2	1,02	275	0,92	297
S2	0,36	290	0,29	305
K1	0,078	277	0,071	298
O1	0,075	345	0,068	330

Foi realizada uma série temporal das correntes de maré no ponto de grade correspondente ao ponto no qual foi instalado o fundeio do ADCP, de forma a possibilitar a comparação das correntes de maré modelada e observada. A Figura 5.3 mostra que as correntes de maré modelada apresentaram um comportamento muito semelhante às correntes medidas na região, embora em eventos extremos os valores modelados não tenham acompanhado esta tendência.

Para quantificarmos a concordância entre as correntes de maré observadas e modeladas, calculamos a quantidade adimensional *Skill* segundo o método proposto por Willmott (1981):

$$Skill = 1 - \frac{\sum |X_{mod} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{mod} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2} \quad (5.3)$$

onde X_{obs} e X_{mod} representam as correntes de maré observadas e modeladas, respectivamente. $\bar{X}_{obs}$ é a média temporal das correntes de maré observadas.

A oscilação das correntes de maré simuladas com o modelo numérico para a estação de chuva foi considerada satisfatória, com valor médio do parâmetro *Skill* superior a 0,9. Quando o *Skill* tende ao valor 1 o modelo representa bem as características observadas.

Figura 5.3: Comparação entre as correntes de maré observada e modelada, durante 10 dias do mês de junho, para a posição 4° 5' S e 37° 35' W, na profundidade aproximada de 30 m.

A modelagem numérica se mostrou como uma importante ferramenta na análise das correntes geradas pelo vento e pelas marés na PCCE. As correntes na frequência submaregráfica foram polarizadas para NW ao largo do Rio Jaguaribe, corroborando os dados observados enquanto que, para as correntes de maré, a componente mais

energética foi a M_2 assim como observado nos dados observacionais. Ao assumirmos que as correntes submaregráficas e maregráficas foram reproduzidas de forma satisfatória pelo modelo numérico, podemos sugerir que para o restante da PCCE os valores das correntes em ambas as frequências sejam muito próximas aos valores observados na natureza, mesmo quando da utilização de um vento estacionário, permitindo a utilização desta ferramenta em estimativas, a priori, das correntes à luz da inexistência de medidas em uma determinada região da PC.

5.2.2 Estuário do Rio Jaguaribe.

Para o estuário do Rio Jaguaribe durante a estação de chuva o padrão unidirecional observado para ambas as interfaces foi traduzido em elevado fluxo fluvial nesta época do ano. A influência fluvial no sistema estuarino é facilmente identificada na circulação gravitacional, quando calculamos os perfis de velocidades estacionárias u_a para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC (Figura 4.85). Os valores positivos de u_a na ZR/ZM ($0,76 \text{ m s}^{-1}$) e na ZM/ZC ($0,81 \text{ m s}^{-1}$) na estação de chuva, mostram transporte resultante estuário abaixo, caracterizando o sistema, durante o período de fluxos unidirecionais, como exportador de água, corroborando os resultados obtidos por Dias et al. (2011). A circulação gravitacional estuário abaixo, observada na estação de seca, na interface ZR/ZM e, estuário acima na interface ZM/ZC, nos faz sugerir que os volumes de água do mar que entram no sistema estuarino em evento de maré enchente são praticamente os mesmos volumes que saem em maré vazante, haja vista que os valores calculados da velocidade estacionária estão muito próximos de zero, evidenciando a importância da dinâmica da maré na região.

O caráter exportador de água do estuário na estação de chuva pode ser mais uma vez atestado ao compararmos a hidrodinâmica das correntes entre as estações de chuva e seca. Esta comparação mostra elevada contribuição fluvial durante a estação chuvosa, gerando velocidades de correntes sempre positivas (estuário abaixo) nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC, fato também observado na estação de seca, em evento de maré vazante. Entretanto, na estação seca, a circulação gravitacional associada às velocidades de enchente mostraram um balanço entre os fluxos de água de enchente e vazante, ressaltando a importância da componente marinha na renovação da massa de

água estuarina, fato que caracteriza o estuário como importador de água nessa estação.

Nicolite et al. (2009) observaram para o baixo estuário do Rio Paraíba do Sul que, nos períodos de descarga fluvial moderada (dentro da média histórica), o nível da água e as velocidades de corrente do baixo estuário encontravam-se dominados pela co-oscilação da maré, com a descarga fluvial apresentando maior influência nos níveis e nas velocidades de corrente em baixa-mar, fato observado para a estação de seca do estuário do Rio Jaguaribe. Entretanto, os autores ressaltam que nos períodos de elevado volume fluvial ($>1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) o nível da água foi fortemente influenciado pela descarga fluvial e pela variação semi-diurna da maré, fato não observado no estuário do Rio Jaguaribe na estação chuvosa, pois neste período, os processos de mistura foram advectados para além dos limites físicos do mesmo, encontrando-se na PCI.

Comportamento oposto foi observado por Miranda et al. (2005) para o estuário do Rio Curimataú (RN). Devido à elevada variabilidade dos fluxos fluviais, os autores observaram a presença de estratificação em maré de quadratura, associada a pequenas velocidades das correntes de vazante, comportamento que gerou transporte advectivo de sal de $7,3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Entretanto, a fraca estratificação vertical e modulação semi-diurna das correntes de maré em período de sizígia ocorreram em resposta à diminuição da entrada de água doce no sistema estuarino, com escala de tempo da ordem de 6-7 dias.

Como vimos através da análise harmônica das correntes de maré na PCCE, a componente semi-diurna M_2 foi a mais energética, sugerindo que a mesma é responsável pelas velocidades das correntes em maré enchente, nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC durante a seca, enquanto que as velocidades das correntes em maré vazante foram dominadas pelo escoamento fluvial em ambas as estações. A variação temporal do campo de correntes nas estações de chuva e seca nos faz sugerir que na época de maior aporte fluvial o estuário comporta-se como um exportador de águas, transformando esse fluxo no agente responsável pela renovação da água estuarina, enquanto que, durante a estação de seca, os principais agentes na renovação foram: circulação gravitacional (perfis estacionários) variando muito próximo a zero, modulação da maré semi-diurna e pequenos fluxos fluviais.

5.3 Interações Continente-Oceano

Para a estação de chuva, o estuário do Rio Jaguaribe apresentou fluxos unidirecionais nas interfaces ZR/ZM e ZM/ZC resultando na formação de uma pluma estuarina na região da PCI, enquanto que, na estação de seca, observou-se uma maior atuação das águas marinhas no sistema estuarino, que resultou em fluxos de enchente maiores que os de vazante, em ambas as interfaces. Este comportamento nos faz sugerir que os barramentos localizados ao longo do Rio Jaguaribe tiveram um papel fundamental na disponibilização de água para o sistema estuarino durante a estação de seca, associado às menores precipitações observadas no segundo semestre de 2009. A pouca quantidade de água fluvial no estuário, no período de balanço hídrico negativo, proporcionou maior adentramento de águas marinhas no sistema, fato evidenciado pelos maiores fluxos de enchente.

A comparação do estuário do Rio Jaguaribe (CE) com outros estuários localizados no nordeste brasileiro, como os estuários do rio de Contas (BA) e Caravelas(BA), ressalta a importância deste importante ecossistema costeiro para o estado do Ceará, haja vista, sua bacia de drenagem ocupar mais de 50% do território cearense, servindo de berçário para importantes espécies de peixes marinhos e de espaço de lazer e fonte de água potável para a população ribeirinha.

O volume de água observado para o sistema estuarino do Rio Jaguaribe, foi de aproximadamente $97 \times 10^6 \text{ m}^3$ associado a um volume de água doce de 99% e a uma TD de aproximadamente 12 horas, na estação de chuva. Na estação de seca, os volumes exportados em maré vazante foram menores que os importados em maré enchente. Entretanto, em maré vazante, os percentuais de água doce foram da ordem de 78%, enquanto que em maré enchente variaram entre 9 e 27%. As menores TDs foram observadas na interface ZM/ZC em evento de maré enchente, da ordem de 1,2 horas. Dias et al. (2010) em estudo realizado no Rio Jaguaribe durante o evento de maré de sizígia, observaram que o volume total de água na interface ZR/ZM foi de $12 \times 10^6 \text{ m}^3$, com um percentual de água doce de 24% e uma taxa de descarga de 3 horas, enquanto que na interface ZM/ZC, o volume observado foi da ordem de três vezes maior que o observado na ZR/ZM, chegando a $43 \times 10^6 \text{ m}^3$ com um percentual de água doce de apenas 5,9% e uma taxa de descarga de 0,7 horas.

Logo, a variação da curva de salinidade com o tempo em uma dada posição longitudinal apresentará uma defasagem de aproximadamente 3 h em relação à curva de maré dinâmica, fato observado neste estudo em período de baixa vazão fluvial para a ZM do estuário do Rio Jaguaribe. O diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1986) mostra que o sistema estuarino apresentou valores de γ da ordem de 0,99, indicando que o estuário está na transição entre os tipos 2a (parcialmente misturado e com fraca estratificação vertical) e 1a (bem misturado). Esse mesmo comportamento foi observado por Izumi et al. (2011) para o estuário do rio Caravelas (BA), onde os autores ressaltam que o processo de difusão turbulenta é o principal mecanismo no transporte de sal e de materiais. Andutta (2006) em estudo realizado no estuário do Rio Curimataú (RN) observou que o sistema estuarino em maré de quadratura e sizígia, foi classificado como do tipo 2b (altamente estratificado), indicando o predomínio do efeito difusivo da maré em ambos os eventos.

Fazendo uma analogia do comportamento observado para os estuários dos rios Curimataú (RN) e Jaguaribe (CE), observamos características muito semelhantes, haja vista, o domínio da descarga fluvial em maré de quadratura para o Curimataú, e na estação de chuva para o Jaguaribe, no qual o processo de mistura variou entre a estabilidade e a fraca estabilidade vertical, respectivamente. Em maré de sizígia (período de seca) a maior atuação da maré gerou instabilidade vertical nos dois estuários.

Diante deste comportamento, o transporte de sal relacionado à maré, para as interfaces ZR/ZM e ZM/ZC foi em direção à ZM. O acúmulo de sal na ZM, pode ocasionar em meses de balanço hídrico negativo a hipersalinização do estuário. A hipersalinização de algumas áreas do estuário, foi observada por Marins et al. (2003), que classificaram o estuário como negativo. Esta inversão acarreta na maior permanência de águas marinhas que adentram ao sistema estuarino em maré enchente, gerando um aumento dos tempos de residência (TR) de diversas substâncias orgânicas e inorgânicas, proporcionando condições ideais para o aumento de organismos e nutrientes, o que pode gerar a eutrofização destas regiões, afetando assim a qualidade da água. Andutta (2006) mostrou em seu estudo, que o transporte de sal para o estuário do Rio Curimataú foi predominantemente forçado pela descarga fluvial e pelo efeito advectivo da deriva de Stokes. Schettini e Miranda (2010) em estudo realizado no estuário do

rio Caravelas (BA) observaram que no período de maré de sizígia o transporte foi superior ao observado em maré de quadratura, associado principalmente à minimização da descarga fluvial, para a estação de seca. Para a estação de chuva, este transporte esteve principalmente associada à deriva de Stokes. O comportamento observado pelos autores, para o estuário do rio Caravelas(BA) corrobora os resultados obtidos neste estudo, para o transporte de natureza advectiva devido à variação da descarga fluvial.

O balanço das concentrações de MPS entre o estuário do Rio Jaguaribe e na plataforma continental interna, foi observado na Figura 4.138. Assim como observado para a variação espacial do MPS nas estações de chuva e seca (Figuras 4.135, 4.136 e 4.137), quantificamos o balanço de MPS no estuário, sendo observada retenção de $40,3 \text{ mg l}^{-1}$ na ZM, entre eventos de maré vazante e enchente, durante a estação de seca. Ao observarmos as concentrações médias de MPS na PCI e na interface ZM/ZC em maré enchente, sugere-se que grande parte do MPS presente na ZM tem origem marinha ou é resultado da erosão de margens e do retrabalhamento do material de fundo. Desta forma, o resultado do balanço de MPS para o estuário do Rio Jaguaribe mostrou exportação de materiais na estação de chuva e retenção de MPS na ZM, entre eventos de maré vazante e enchente, durante a estação de seca. Este comportamento é corroborado por Soares (2011), ao estudar a qualidade do MPS no estuário do Rio Jaguaribe. Os autores mostram em seu estudo que, durante a estação de chuva, o MPS foi predominantemente de origem continental, devido a elevadas concentrações dos metais Al e Fe, enquanto que na estação de seca as concentrações destes metais no MPS foram de quatro a cinco ordens de grandeza menores que as observadas na estação de chuva, sugerindo uma origem marinha ou fruto do retrabalhamento e erosão das margens. Este comportamento é corroborado pelos estudos realizados por Marins e Dias (2003) e Marins et al. (2003) onde os autores mostram que as concentrações de MPS apresentavam valores elevados na interface ZM/ZC, onde os autores relataram que o aumento subto de MPS na região da ZM, estaria atrelado a resuspensão de sedimento de fundo, haja vista que as concentrações de MPS a época se comparavam a de águas oceânicas adjacentes.

Podemos observar também que, as concentrações de MPS diminuíram em média 72% na ZR/ZM e 21% na ZM/ZC na estação de seca em relação à estação de chuva.

Este comportamento se deve a um menor aporte fluvial e a uma maior atuação das águas marinhas durante a estação de seca, resultando na formação da zona de máxima turbidez na região interna da ZM. Mesmo durante estação de seca, onde normalmente as concentrações de MPS são muito próximas às encontradas em áreas oceânicas, encontramos valores de MPS muito próximos aos encontrados na estação de chuva, sugerindo que este aumento se deve à resuspensão de material de fundo e à erosão de margens, como destacado anteriormente.

Este comportamento foi observado por Lacerda et al. (2010) e Bezerra et al. (2011), mostrando que a morfologia do canal estuarino do Rio Jaguaribe é constantemente retrabalhada devido a grandes volumes fluviais e atuação das marés, modificando de forma significativa a geomorfologia local e a zona costeira adjacente. Segundo estes autores, os processos de erosão, transporte e deposição, provocaram crescimento de até 25 hectares em área de ilhas localizadas na ZM, dificultando a navegação na região. Farias (2008) observou através de seu estudo que, a minimização do aporte de sedimentos continentais na zona costeira do estado do Ceará, acelerou o processo de erosão de praias, associado a obras costeiras que contribuem de forma negativa na dinâmica de sedimentos.

Bezerra et al. (2011) e Gogoy (2011) compararam dados batimétricos com imagens de satélite, para os anos de 2004 e 2009 (Figura 4.140) no estuário do Rio Jaguaribe. Os autores observaram que as maiores profundidades foram encontradas na margem esquerda do canal de navegação do estuário, variando entre 1 e 6,8 m, mostrando que esta é a região de escoamento preferencial. Ao confrontarmos os mapas batimétricos dos anos de 2004 e 2009 obtidos pelos autores, observa-se um aumento das profundidades locais na ordem de 50%, demonstrando que períodos de grandes descargas fluviais, como observado em 2009, tendem a retrabalhar o canal de navegação nas proximidades da interface ZR/ZM, enquanto que a ação continuada da maré é a maior responsável pelo constante retrabalhamento do canal na ZC. O processo erosivo observado na ZR (4° 32' 30" S e 37° 46' 30") e o aumento horizontal da Ilha do Pinto (Figura 4.140) relatadas por Lacerda et al. (2010) e Gogoy (2011) na ZM, evidenciam a complexidade do padrão de circulação no estuário do Rio Jaguaribe (CE), mostrando a necessidade do constante monitoramento da variação da profundidade local, marés,

correntes, vazões e do transporte de materiais, oriundos da bacia de drenagem para o estuário e deste para a PCI.

Diante dos resultados obtidos nesta tese e nos diversos trabalhos citados para o estuário do Rio Jaguaribe, sugerimos que mecanismos análogos (represamento das águas, aumento do tempo de residência, minimização do fluxo fluvial) aos ocorrentes na região Polar Ártica atuam no litoral semi-árido do nordeste brasileiro. Estes resultados sugerem que o reduzido fluxo fluvial, atualmente em diminuição, alimentado por períodos cada vez mais curtos de chuva, resulta em bloqueios dos fluxos fluviais pela entrada da maré, aumentando o tempo de residência das águas nas regiões estuarinas e deltaicas e consequentemente modificando a mobilidade e reatividade de substâncias orgânicas e inorgânicas. A esta hipótese chamaremos de **Paradoxo Ártico**.

O fato a ser observado para a maioria dos estuários localizados no nordeste brasileiro, mesmo aqueles que apresentam um elevado fator de controle do regime fluvial natural, no caso do Rio Jaguaribe, os sucessivos barramentos em seu curso é que, os processos difusivos associados ao efeito baroclínico são os mecanismos responsáveis pelo transporte de substâncias na interface continente-oceano. Para o Rio Jaguaribe, um fator preocupante é a minimização dos fluxos fluviais durante a estação de seca, tendo em vista que a construção de barragens, neste importante rio nordestino, visa o aumento da disponibilidade hídrica regional, alterando de forma significativa o transporte de materiais, sendo necessário um constante monitoramento das propriedades hidrográficas e do campo de correntes, para que um mosaico de condições ambientais possa ser montado visando um melhor gerenciamento deste importante ecossistema costeiro.

Capítulo 6

Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho propõe uma divisão física da Plataforma Continental Leste do Estado do Ceará em: Plataforma Continental **Externa, Média e Interna**. Os critérios estabelecidos identificam a presença de três frentes na PCCE: a Frente Térmica de Fundo (FTF) associada as intrusões da AT transportada pela CNB em direção à costa, a Frente Halina Superficial (FHS) que delimitou a área de mistura entre AR, AC e AT, e a terceira que separa a plataforma média da interna, tendo características de Frente de Pluma (FP).

Um outro fato que deve ser destacado é o comportamento das massas de água na estação de chuva, onde podemos observar intrusões da AT nos níveis verticais maiores que 60 m na PCE e a presença da pluma estuarina na região da PCI, ocupando uma distância horizontal de 6 km da linha de costa, provocando o rebaixamento da AC. Para a estação seca, observamos o deslocamento da AT em direção à costa na região da PCM, e a ausência da pluma estuarina na região da PCI.

A análise espaço-temporal das correntes submaregráficas mostra correntes predominantes para NW fluindo paralelas à direção média das isóbatas, em resposta ao empilhamento de água gerado pela componente paralela da TCV na região mais próxima à costa. Este comportamento, associado à espessura da camada de Ekman muito maior que a profundidade local, mostra que a dinâmica do primeiro modo de oscilação (barotrópico) é dominante, gerando correntes na direção do vento atuante, comportamento visto nas correntes modeladas e observadas.

Os pequenos valores de elevação do nível do mar modelados são devido à proxi-

midade da PCCE ao equador, evidenciando a importância do parâmetro de *Coriolis* na elevação do nível do mar, via ajuste geostrófico. As maiores amplitudes das componentes semi-diurnas das correntes de maré ocorrem na região mais próxima à costa, como resultado da co-oscilação com o oceano profundo, evidenciada pelas linhas de fase. As elipses das correntes de maré apresentaram sentido de rotação horário na direção normal, para os resultados modelados e observados.

Para o estuário do Rio Jaguaribe, durante a estação de chuva, o sistema estuarino foi fortemente controlado por águas de origem continental, gerando elevado transporte líquido que advectou os processos estuarinos para a PCI, fora dos limites físicos do estuário. Na seca, as águas marinhas passaram a ter uma maior influência, controlando a posição espacial da *zona de máxima turbidez* em eventos de maré vazante e enchente, classificado o estuário como do tipo 2a.

Referências

- AMOR, C. C. *Intrusões da água Continental do Atlântico Sul sobre a Plataforma Continental situada entre a Ilha de São Sebastião (SP) e o Cabo de São Tomé (RJ)*. 200 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ANA. Vazões históricas para a bacia de drenagem do rio jaguaribe (ce). In: *Relatório interno*. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2006. p. 20 pp.
- ANDUTTA, F. P. *Experimentos e Modelagem Numérica com Aplicação ao Estuário Tropical do Rio Curimataú, RN*. 140 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- AURENHAMMER, F.; KLEIN, R. *Voronoi diagrams*. 1^a. ed. FernUniversität Hagen: Technical Report, 1989. 92 p.
- BERGAMO, A. L.; MIRANDA, L. B.; CORREA, M. A. Estuário: Programas para processamento e análise de dados hidrográficos e correntográficos. *Relatório Técnico do Instituto Oceanográfico*, v. 49, p. 1–16, 2002.
- BEZERRA, L. J. C.; DIAS, F. J. S.; GODOY, M. D. P.; LACERDA, L. D.; MAIA, L. P. Levantamento hidrográfico da região estuarina do rio jaguaribe (ne-brasil) entre os anos de 2004 e 2009. In: *Anais do V Simpósio Brasileiro de Oceanografia*. Universidade de São Paulo - Santos, 2011. p. 1–4.
- BLUMBERG, A. F.; MELLOR, G. L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. In: *Three-dimensional coastal ocean models*, N. S. Heaps (editor). Washington: American Geophysical Union, 1987. p. 1–16.
- BRETHERTON, F. P.; RUSS, E. D.; FANDRY, C. B. A. Technic for objetive analysis and design of oceanographic experiments applied to mode-73. *Deep-Sea Res.*, v. 23, n. 7, p. 559–582, 1976.

- CAMELO, H. N.; CARVALHO, P. C. M.; JUNIOR, J. B. V. L.; FILHO, G. B. P. A. Análise estatística da velocidade do vento do estado do ceará. *Revista Tecnológica.*, v. 29, n. 2, p. 211–223, Dezembro 2008.
- CAMPOS, A. A. *A zona costeira do Ceará: Diagnóstico para a gestão integrada*. 1ª. ed. Fortaleza: Aquasis, 2003. 248 p.
- CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M.; LUNA, R.; FRANCO, S. Hydrological transformations in jaguaribe river basin during 20th century. In: *Proceedings of the 20th Annual American Geophysical Union*. Hydrology Days Publications, 2000. p. 221–227.
- CASTRO, B. M. *Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo*. São Paulo: , 1996. 200 p. Tese de Livre Docência.
- CASTRO, B. M.; LORENZZETTI, J. A.; SILVEIRA, I. C. A.; MIRANDA, L. B. *Estrutura termohalina e circulação na região entre Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS)*. IN: *O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil*. Universidade de São Paulo, São Paulo: EDUSP, 2006. 472 p.
- CAVALCANTE, A. A. *Impactos ambientais na região do baixo Jaguaribe, CE*. 317 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.
- COCHRANE, J. Equatorial undercurrent and related currents off brazil in march and april 1963. *Science*, v. 142, p. 669–671, 1983.
- CSANADY, G. T. *circulation in the coastal ocean*. USA: D. Reidel Publishing Co., 1982.
- CURTIN, T. B. Physical observations in the plume region of the amazon river during peak discharge-ii. water masses. *Continental shelf research*, v. 6, n. 1/2, p. 53–71, 1986.
- CURTIN, T. B.; LEGECKIS, R. V. Physical observations in the plume region of the amazon river during peak discharge-i. surface variability. *Continental shelf research*, v. 6, n. 1/2, p. 31–51, 1986.
- DIAS, F. J. S. *Avaliação da descarga e geoquímica do material em suspensão no estuário do rio Jaguaribe – CE*. 107 p. — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005. Monografia. Universidade Federal do Ceará. 100 pp.
- DIAS, F. J. S. *Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE)*.

- 125 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará - Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR, Fortaleza, 2007.
- DIAS, F. J. S.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D. Hydrological dynamics in a tropical estuary during a spring tide cycle: The jagaribe river case (northeast-brazil). **In: *Abstracts The Meeting of the Americas, 2010***. Foz do Iguaçu - Paraná - Brasil, 2010. p. 1–2.
- DIAS, F. J. S.; LACERDA, L. D.; MARINS, R. V.; PAULA, F. C. F. Comparative analysis of rating curve and adp estimates of instantaneous water discharge through estuaries in two contrasting brazilian rivers. *Hydrological Process.*, DOI:10.1002/hyp.7972. 25, n. 2, p. 2188–2201, 2011.
- DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P. Modelo de funcionamento hidrológico para o estuário do rio jaguaribe – ce. **In: *Anais do X Congresso Brasileiro de Limnologia. Sociedade Brasileira de Limnologia***. Universidade Estadual de Santa Cruz - Ilhéus, 2005. p. 1.
- DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P. Dependência do tempo de residência da água no estuário do rio jaguaribe (ne, brasil), em relação à entradas de águas marinhas e a descarga de água doce. **In: *XII Congresso Latino Americanos de Ciências do Mar***. Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis., 2007. p. 1–4.
- DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P. Descargas de material particulado em suspensão para o estuário do rio jaguaribe (ce). **In: *3º Congresso Brasileiro de Oceanografia e Congresso Íbero-Americano de Oceanografia***. Universidade Federal do Ceará, 2008. p. 1–4.
- DIAS, F. J. S.; MARINS, R. V.; MAIA, L. P. Hydology of a well-mixed estuary at the semi-arid notheastern brazilian coast. *Acta Liminológica Brasiliensia*, v. 21, n. 4, p. 377–385, 2009.
- DOTTORI, M.; CASTRO, B. M. The response of the sao paulo continental shelf, brazil, to synoptic winds. *Ocean Dynamics*, v. 59, n. 4, p. 603–614, 2009.
- EGBERT, G.; BENNETT, A.; FOREMAN, M. Topex/poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal Geophysical Research*, v. 99, n. C12, p. 24821 – 24852, 1994.

- EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. *Data analysis methods in physical oceanography*. Great Britain: Pergamon, 1998. 634 p.
- FARIAS, E. G. G. de. *Aplicação de técnicas de geoprocessamento para análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do estado do Ceará*. 103 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, 2008.
- FONTES, R. F. C. *Estudo numérico da circulação na Plataforma continental Amazônica (PCA)*. 198 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- FRANCO, A. S. *Tides: Fundamentals, Analysis and Prediction*. 2^a. ed. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica: Universidade de São Paulo, 1998. 249 p.
- FUNCEME. Precipitações históricas para o baixo jaguaribe. *Eletronic Journal - (www.funceme.br/monitoramento/graficosdechuvvas)*, 2004.
- FUNCEME. Precipitações históricas para o baixo jaguaribe. *Eletronic Journal - (www.funceme.br/monitoramento/graficosdechuvvas)*, 2010.
- GODOI, S. S. *Dinâmica quase-geostrófica do sistema Corrente do Brasil no embanhamento de São Paulo (23,5°-27°S)*. 133 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- GOGOY, M. D. P. *Mudanças na sedimentação do estuário do rio Jaguaribe(CE) devido a mudanças do uso do solo*. 131 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará., <http://www.inct-tmcocean.com.br>, 2011.
- GONI, G. J.; JOHNS, W. E. A census of north brazil current rings observed from topex/poseidon altimetry: 1992-1998. *Geophysical Research Letters*, v. 28, n. 1, p. 1–4, January 2001.
- HANSEN, D.; RATTRAY, M. J. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanography*, v. 11, n. 3, p. 319–325, 1986.
- HSU, S. A. Correction of land-based wind data offshore applications: A further evaluation. *J. Phys. Oceanogr.*, v. 16, p. 390–394, 1986.
- IZUMI, V. M.; DIAS, F. J. S.; MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; LACERDA, L. D. Circulação hidrodinâmica dos estuários de duas importantes bacia de drenagem do nordeste brasileiro: Rios caravelas (ba) e jaguaribe (ce). In: *XIV Congresso Latino*

- Americanos de Ciências do Mar*. Universidade Federal do Paraná - Blaneário Camburiú., 2011. p. 1–4.
- JENKINS, G. M.; WATTS, D. G. Spectral analysis and its application. *Holden-Day*, v. 525, p. 525, 1968.
- JOHNSON, D.; BOYER, T.; GARCIA, H. E.; LOCARNINI, R. A.; BARANOVA, O. K.; ZWENG, M. M. World ocean database 2009 documentation. In: *Internal Report*, 20. Edited by sydney levitus. U.S.A.: Silver Springer-Verlag, 2009. p. 175.
- KETCHUM, B. H. Hydrografic factors involved in the dispersion of pollutants introduced into tidal wateres. *Journal Boston Society Civil Engineering*, v. 37, p. 296–314, 1950.
- KJERFVE, B. Velocity averaging in estuaries characterized by a large tidal range to depth ratio. *Estuarine Coastal Marine Science*, v. 3, p. 311–323, 1975.
- KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast brazil. *Mon. Wea. Rev.*, v. 107, p. 1140–1153, 1979.
- KOUSKY, V. E. Diurnal rainfall variation in northeast brazil. *Mon. Wea. Rev.*, v. 108, p. 488–498, 1980.
- KRELLING, A. P. *A estrutura vertical dos vórtices da Corrente Norte do Brasil*. 74 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- KROL, M.; JAEGER, A.; BRONSTERT, A.; GUNTNER, A. Integrated modelling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: A general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of brazil. *Journal of Hydrology*, v. 328, p. 417–431, 2006.
- LACERDA, L. D.; GODOY, M. D. P.; MAIA, L. Mudanças climáticas globais: Caçando indicadores no nordeste brasileiro. *Ciência Hoje*, v. 46, n. 272, p. 32–37, 2010.
- LACERDA, L. D.; MARINS, R. V. River damimng and changes in mangrove distribution. *ISME/Glomis. Eletronic Journal*, v. 2, n. 1, p. 1–4, 2002.
- LEUDMANN, E. F. Preliminary results of the drift-bottle realeses and recoveries in the western tropical atlantic. *Boletim do Instituto Oceanográfico.University of Sao*

- Paulo*, v. 16, p. 13–22, 1967.
- LEUDMANN, E. F.; PEREIRA, S. G. Some results of the drift-bottle releases in the western equatorial waters during gate, 1974. *Boletim do Instituto Oceanográfico. University of Sao Paulo*, v. 4, p. 22, 1976.
- LIMBUERNER, R.; BEARDSLEY, R. C. Ctd observations off northern brazil during a multidisciplinary amazon shelf sediment study, amasseds, february-march 1990. *Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report*, WHOI-91, p. 343, 1991.
- LIMBUERNER, R.; BEARDSLEY, R. C. Ctd observations off northern brazil during a multidisciplinary amazon shelf sediment study, amasseds, november 1991. *Woods Hole Oceanographic Institution Technical Report*, WHOI-92, p. 267, 1992.
- LINHARES, V. P. *Circulação e massas de água na plataforma continental externa amazônica*. 1-190 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, www.teses.usp.br, 1995.
- LUKETINA, D. Simple tidal prism models revisited. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, n. 46, p. 77–84, 1998.
- MAIA, L. P. *Controle tectônico e Evolução Geológica Sedimentológica da Região da Desembocadura do Rio Jaguaribe* – Ce. 144 p. Dissertação (Mestrado) — UFPE, Pernambuco, 1993.
- MAMAYEV, O. I. *Temperature-salinity analysis of world ocean waters*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publ., 1975. 374 p.
- MARIN, F. O. *A Subcorrente Norte do Brasil ao Largo da Costa do Nordeste*. 140 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- MARINS, R. V.; DIAS, F. J. S. Alterações na hidrogeoquímica do estuário do rio jaguaribe-ce: Descarga ou retenção de materiais? In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Geoquímica*. Universidade Federal do Pará - Belém, 2003. p. 480–482.
- MARINS, R. V.; LACERDA, L. D. Summary of drivers, pressures and environmental impacts in the jaguaribe river estuary, ne-brazil. *Electronic Journal* www.institutomilenioestuarios.com.br, p. 4, 2007.

- MARINS, R. V.; LACERDA, L. D.; MATANO, I. A.; DIAS, F. J. S. Efeitos da açudagem no rio jaguaribe. *Revista Ciência Hoje*, v. 33, n. 197, p. 66–70, 2003.
- MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B. A.; JUNIOR, R. C. S.; SOUZA, W. L. Aporte fluvial de material em suspensão do rio são francisco (se/al), de novembro de 2000 a março de 2002. In: *Anais do XII Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar*. Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2007. p. 1–4.
- METCALF, W. G. Shallow currents along the northeastern coast of south america. *Journal of Marine Research*, v. 26, p. 232–243, 1968.
- METCALF, W. G.; STALCUP, M. C. Origin of the atlantic undercurrent. *Journal of Geophysics Research*, v. 72, p. 4959–4975, 1967.
- MIRANDA, L. B. *Análise de Massas de Água de Plataforma Continental e da Região Oceânica Adjacente: Cabo de S. Tomé (RJ) à Ilha de São Sebastião (SP). Tese de Livre Docência*. Universidade de São Paulo, São Paulo: , 1982. 194 p.
- MIRANDA, L. B. Forma da correlação ts de massas de água das regiões costeira e oceânica entre cabo de são tomé (rj) e a ilha de são sebastião (sp), brasil. *Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo*, v. 33, n. 2, p. 105–119, 1985.
- MIRANDA, L. B.; BÉRGAMO, A. L.; CASTRO, B. M. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary,ne brazil. *Ocean Dynamics*, v. 55, p. 430–440, 2005.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. Aplicação do diagrama ts estatístico-volumétrico à análise das massas de água da plataforma continental do rio grande do sul. *Boletim do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo*, v. 28, n. 1, p. 185–200, 1979.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M. Arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis. *National Geophysical Data Center*, v. 28, n. 1, p. 100, 2008.
- MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Universidade de São Paulo, São Paulo: , 2002. 414 p.
- NICOLITE, M.; TRUCOLLO, E. C.; SCHETTINI, C. A. F.; CARVALHO, C. E. V.

- Oscilação do nível de água e co-oscilação da maré astronômica no baixo estuário do rio paraíba do sul, rj. *Revista Brasileira de Geofísica.*, v. 27, n. 2, p. 225–239, 2009.
- NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. parcerias estratégicas. *Parcerias estratégicas*, v. 12, p. 239–258, 2003.
- OFFICER, C. B. *Physical Oceanography of Estuaries and Associated Coastal Waters*. Wiley London, 1976. 546 p.
- ORLANSKI, I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. *Journal Computational Physical*, v. 21, p. 251–269, 1976.
- OWENS, W. B. A statistical description of the vertical and horizontal structure of eddy variability on the edge of the gulf stream recirculation. *J. Phys. Oceanogr.*, v. 15, n. 2, p. 195–205, 1985.
- OWENS, W. B. Observations and eof analysis of low-frequency variability in the western part of the gulf-stream recirculation. *J. Phys. Oceanogr.*, v. 20, n. 5, p. 646–656, 1990.
- PALMA, E. D.; MATANO, R. P. On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: The barotropic mode. *J. Geophys. Res.*, v. 103, p. 1319–1341, 1998.
- PALMA, E. D.; MATANO, R. P. On the implementation of open boundary conditions for a general circulation model: The three-dimensional case. *J. Geophys. Res.*, v. 105, p. 8605–8627, 2000.
- RIEHL, H. *Meteorologia Tropical*. Ao livro técnico sa. [S.l.: s.n.], 1965.
- SANTOS, M. *Descrição dos corpos arenosos de grande escala na zona costeira e na plataforma continental norte do Rio Grande do Norte por imagem TM-Landsat*. 123 p. Dissertação (Mestrado) — Instituto nacional de pesquisas espaciais, 1999.
- SCHETTINI, C. A. F.; MIRANDA, L. B. Circulation and suspended particulate matter transport in a tidally dominated estuary: Caravelas estuary, bahia, brazil. *Brazilian Journal Oceanography*, v. 58, n. 1, p. 1–11, 2010.
- SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional ocean modeling system: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. *Ocean*

- Modelling*, v. 9, p. 347–404, 2005.
- SIGNORINI, S. R.; MIRANDA, L. B. Tidal and low-frequency currents near the shelf-break: Northeastern coast of Brazil. *Journal Physics Oceanography*, v. 13, p. 2107–2115, 1983.
- SILVA, A. C. D.; ARAUJO, M.; BOURLES, B. Variação sazonal da estrutura de massas de água na plataforma continental do Amazonas e área oceânica adjacente. *Rev. Bras. Geofis.*, v. 23, n. 2, p. 145–157, 2005.
- SILVA, L. C. F.; ALVARENGA, J. B. R. *Levantamento do estado da arte dos recursos vivos marinhos do Brasil - Oceanografia Física da Região Nordeste*. Ministério do Meio Ambiente, 1994. 200 p.
- SILVA, M. P. *Caracterização físico-química das massas de água da Baía de Santos durante o projeto COROAS. Verão e Inverno de 1993*. 135 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- SILVA, P. K. O.; ARAGAO, M. R. S.; MAGALY, M. F.; SILVA, A. B. Caracterização da variabilidade do vento no aeroporto internacional de Fortaleza, Ceará: Análise de velocidade. In: *XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Universidade Federal do Pará - Belém, 2010. p. 1–4.
- SILVEIRA, I. C. A. *Contribuição ao estudo da circulação na troposfera oceânica: Região oeste do oceano Atlântico equatorial*. 185 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- SILVEIRA, I. C. A.; BROWN, W. S.; FLIERL, G. R. Dynamics of the north Brazil current retroflexion from the westrax observations. *J. Geophys. Res.*, v. 105, n. C12, p. 28559–28583, 2000.
- SILVEIRA, I. C. A.; MIRANDA, L. B.; BROWN, W. S. On the origins of the north Brazil current. *J. Geophys. Res.*, v. 99, n. C11, p. 22501–22512, 1994.
- SOARES, J. R.; CASTRO, B. M. Numerical modeling of the response of Ceará continental shelf waters to wind stress forcing. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 44, n. 2, p. 135–153, 1996.
- SOARES, T. C. M. *Variação Sazonal, Transporte e Partição de Hg no gradiente Fluvio-marinho*

- do Rio Jaguaribe-CE*. 130 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará., <http://www.inct-tmcocean.com.br>, 2011.
- SRH. *Plano estadual de recursos hídricos do estado do Ceará*. 2^a. ed. Superintendência de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, 1991. 244 p. Relatório Técnico.
- TEIXEIRA, R. F. B. O fenômeno da brisa e sua relação com a chuva sobre fortaleza-ce. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 23, n. 3, p. 282–291, 2008.
- VERISSIMO, L. S.; MEDEIROS, M. F.; SOUZA, J. E.; ANDRADE, F. T. B. *Avaliação das potencialidades hídrica e mineral do médio-baixo Jaguaribe (Ce)*. 1^a. ed. Fortaleza: CPRM, 1996. 89 p.
- VIANNA, M.; A, C.; F, G. Tm-landsat imagery applied to the study of the impact of global climate change on a tropical coastal environment during the last deglaciation. *Internal Journal Remote Sensing*, v. 14, p. 2971–2983, 1993.
- VIANNA, M.; R, S.; A, C.; V, T. Sandstream on the northeast brazilian shelf. *Continental Shelf Research*, v. 11, p. 509–524, 1991.
- WALTERS, R. A.; HESTON, C. Removing tidal-period variations from time-series data using low-pass digital filters. *Journal Physical Oceanography*, v. 12, n. 1, p. 112–115, 1982.
- WILLMOTT, C. J. On the validation models. *Physical Geography*, v. 2, p. 184–194, 1981.
- ZEMBRUSKI, S. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. In: *PROJETO REMAC. Geomorfologia da margem continental brasileira e das áreas oceânicas adjacentes*. Rio de Janeiro: PETROBRAS. CENPES. DINTEP (Série REMAC no. 7), 1979. p. 129–177.