VITOR MASSAKI IZUMI

COMPARAÇÃO ENTRE AS DESEMBOCADURAS DO COMPLEXO ESTUARINO DO CASSURUBÁ (BA): CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS E HIDRODINÂMICAS

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Física.

Orientador:

Prof. Dr. Luiz Bruner de Miranda

São Paulo

Novembro de 2011

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

Comparação entre as desembocaduras do

Complexo Estuarino do Cassurubá (BA):

Características hidrográficas e hidrodinâmicas

Vitor Massaki Izumi

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Oceanografia Física.

Julgada em _____ / _____ / _____

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

Prof. Dr.

Conceito

AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao Prof. Miranda: imensa gratidão pela atenção e paciência, nem sempre tão merecidas por mim. Foi e continuará sendo um exemplo de pessoa a ser seguido, dentro e fora da vida acadêmica. Referência de orientador, professor, pesquisador, é unanimidade em todo o Instituto Oceanográfico. Sendo seu último orientado, sinto-me na obrigação e, ao mesmo tempo, à vontade de dedicar-lhe este trabalho, em nome de todos os que tiveram a honra de conviver com o senhor, seja por orientação, aula, trabalho ou por uma simples conversa. Muito Obrigado!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas concessões de bolsa durante o projeto e dos dados utilizados neste trabalho, os quais foram coletados no projeto PRO-ABROLHOS (Institutos do Milênio).

Aos Professores da Pós-Graduação, pelo costumeiro bom relacionamento e pelos conhecimentos transmitidos durante o curso, úteis não apenas para este trabalho, mas também para todos os que virão pela frente.

À empresa SALT Ambiental, pelo inestimável aprendizado, apoio e imensa tomada de tempo.

A todas as criaturas malucas que, durante todo ou pouco tempo, fizeram parte da marcante e sensacional turma de 2009 do mestrado.

A toda galera dos trabalhos de campo estuarinos do PRO-ABROLHOS, por compartilhar risadas, aventuras e experiências.

À eterna Turma Light, cada vez mais espalhada pelo Brasil e pelo mundo, sempre nos incentivando e enchendo de orgulho.

À família e aos amigos, por motivos certamente sabidos.

E à Ana, que cobrou um agradecimento nominal aqui, mesmo não tendo me ajudado em nada. Pelo contrário, só atrapalhou. Na verdade, sem você este trabalho não sairia. Obrigado por simplesmente estar em minha vida durante esse tempo.

SUMÁRIO

Lista de Figuras e Tabelas	i
Lista de Siglas e Símbolos	Х
Resumo	xiv
Abstract	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Tema e Área de Estudo	1
1.2. Problema	20
1.3. Importância	21
1.4. Hipótese e Obietivos	24
2. MATERIAIS E MÉTODOS	26
2 1 Dados Oceanográficos	26
2.2. Variabilidade Espacotemporal (Velocidade, Salinidade	20
Temperatura Profundidade)	30
2 3 Fenômenos Forcantes e Estabilidade da Coluna	00
d'áqua	32
2.4. Classificação da Zona de Mistura	35
2.5. Transporte Residual de Volume	39
2.6. Ventos	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
3.1 Dados Oceanográficos	
3.1.1. Relação de densidade com salinidade e temperatura	70 //3
3.1.2 Direção sentido e intensidade dos vetores de velocidade	18
3.1.2. Direção, servido e interisidade dos vetores de velocidade 3.1.3. Decomposição dos vetores	51
3 2 Variabilidade Espacotemporal	54
3.2. Valiasindade Espaçotemporar	54
3.2.7. Velocidade	65
3.2.2. Callinadade	74
3.2.4 Profundidade	70
3 3 Equômenos Forcentes o Estabilidade da Coluna d'áqua	85
3.3. 1 enomenos i orçantes e Estabilidade da Coluna d'agua 3.4. Classificação da Zona de Mistura	00
3.4. Olassincação da Zona de Inistara	100
3.5. Transporte Residual de Volume	100
J.V. VEHIUJ	102
	100
4. CUNCLUQUED E CUNDIDERAÇUED FINAID	106
5. KEFEKENCIAS BIBLIUGKAFICAS	110

Lista de Figuras e Tabelas

- Figura 1. Área sob estudo: Complexo Estuarino do Cassurubá, entre os municípios de Caravelas e Nova Viçosa, na região do Extremo Sul da Bahia. Fonte: Autor; adaptado da carta náutica 1310 da marinha. Pag. 4
- Figura 2. Canais estuarinos e desembocaduras adjacentes aos municípios de Caravelas e Nova Viçosa, na região do Extremo Sul da Bahia. Fonte: Autor; adaptado das cartas náuticas 1302 e 1312 da marinha e de imagem de satélite da Google. Pag. 5
- Figura 3. Tensão de cisalhamento do vento na região oeste do Oceano Atlântico Sul para verão/janeiro (esquerda) e inverno/julho (direita). Fonte: Adaptada de Mazzini (2009), desenhada por Castro (1996) com base nos dados interpolados por Samuels & Cox (1987). Pag. 7
- Figura 4. Topografia geral do território brasileiro. Fonte: Adaptado de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brazil_topo_en2.PNG; figura gerada em GMT (http://gmt.soest.hawaii.edu), com dados dos domínios públicos: ETOPO2 (topography/bathymetry) http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html; GLOBE (topography) - http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/gltiles.html; SRTM (topography) http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/. Pag. 8
- Figura 5. Variação mensal da vazão do rio Caravelas, estimada através do método indireto de P. Schreiber. Fonte: Izumi (2007). Pag. 9
- Figura 6 Variação mensal (esquerda) e anual (direita) da descarga fluvial do rio Peruípe, Bahia. Fonte: ANA (Agência Nacional de Águas).
 Pag. 10
- Figura 7. Esquema representativo das bacias hidrográficas interligadas dos rios Caravelas e Peruípe. Fonte: Adaptada de Sarmento-Soares, et al (2006). Pag. 11

- Figura 8. Topografia de fundo da margem continental brasileira e trecho da planície abissal adjacente à área de estudo. Fonte: Soutelino (2008).
 Pag. 13
- Figura 9. Principais canais, feições submarinas e arcos costeiros presentes na Plataforma Continental adjacente à região em estudo. Fonte: Adaptado de Leão (2002). Pag. 14
- Figura 10. Descrição faciológica dos Bancos de Abrolhos e Royal Charlote. Fonte: Marchioro et al., (2005). Pag. 15
- Figura 11. Esquema do sistema de correntes de contorno oeste ao longo da margem continental brasileira. Fonte: Soutelino (2008). Pag. 17
- Figura 12. Esquema da porção superficial da Corrente do Brasil e seu núcleo acompanhando a linha de quebra da Plataforma Continental. Fonte: Soutelino (2008). Pag. 18
- Figura 13. Maré variação do nível da superfície livre, ao longo de aproximadamente um mês. Fonte: Izumi (2008). Pag. 19
- Figura 14. Equipamentos e embarcações utilizadas nas diversas estações oceanográficas fixas do projeto pro-abrolhos. Fonte: autor, fotos adaptadas de http://ldc.io.usp.br e http://www.valeport.co.uk. Pag. 26
- Figura 15. Localização das estações oceanográficas fixas A e C, próximas às cidades de Caravelas (CA) e Nova Viçosa (NV), respectivamente, na região do Extremo Sul da Bahia. Fonte: Autor, a partir das Cartas Náuticas 1302, 1310 e 1312 da Marinha do Brasil. Pag. 27
- Figura 16. Exemplo de decomposição da velocidade medida em componente u (paralelo ao canal, Ox) e v (transversal ao canal, Oy), para um canal qualquer. Fonte: Autor. Pag. 29

- Figura 17. Diagrama de Hansen & Rattray (1965) com as áreas delimitadas para classificação. Pag. 37
- Figura 18. Estação meteorológica automática de Caravelas (BA). Fonte: INMET. Pag. 41
- Figura 19. Localização da estação meteorológica automática de Caravelas (BA). Fonte: adaptado de imagens de satélite da Google.
 Pag. 41
- Figura 20. Estação A variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no inverno (agosto) de 2007. Pag. 44
- Figura 21. Estação A variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no inverno (agosto) de 2007. Pag. 45
- Figura 22. Estação C variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no verão (janeiro) de 2008. Pag. 46
- Figura 23. Estação C variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no verão (janeiro) de 2008. Pag. 47
- Figura 24. Estação A vetores velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de

maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no inverno (agosto) de 2007; a direção dos ângulos de 90° e 270° é paralela ao canal estuarino. **Pag. 49**

- Figura 25. Estação C vetores velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no verão (janeiro) de 2008; a direção dos ângulos de 90º e 270º é paralela ao canal estuarino. Pag. 50
- Figura 26. Estação A componente longitudinal u (azul) e componente transversal v (vermelho) da velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no inverno (agosto) de 2007. Pag. 52
- Figura 27. Estação C componente longitudinal u (azul) e componente transversal v (vermelho) da velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no verão (janeiro) de 2008. Pag. 53
- Figura 28. Estação A perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Limites fixos de velocidade. Pag. 55
- Figura 29. Estação A perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Sem limites fixos de velocidade. Pag. 56
- Figura 30. Estação C perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas),

para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Limites fixos de velocidade. **Pag. 57**

- Figura 31. Estação C perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Sem limites fixos de velocidade. Pag. 58
- Figura 32. Comparação entre os perfis verticais de velocidade longitudinal obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008). Pag. 61
- Figura 33. Diagramas de Hovmöller comparação entre as evoluções temporais das isopletas de velocidade longitudinal obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008). Pag. 62
- Figura 34. Estação A e C variação temporal de velocidade longitudinal u, em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as fases de quadratura e sizígia no inverno (agosto de 2007), e quadratura e sizígia no verão (janeiro de 2008). Pag. 64
- Figura 35. Estação A perfis verticais de salinidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas:
 a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão;
 d) sizígia de verão. Pag. 66
- Figura 36. Estação C perfis verticais de salinidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas:

a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão;
d) sizígia de verão. Pag. 67

- Figura 37. Comparação entre os perfis verticais de salinidade obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008). Pag. 70
- Figura 38. Diagramas de Hovmöller comparação entre as evoluções temporais das isopletas de salinidade obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008). Pag. 71
- Figura 39. Estação A e C variação temporal de salinidade, em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as fases de quadratura e sizígia no inverno (agosto de 2007), e quadratura e sizígia no verão (janeiro de 2008). Pag. 73
- Figura 40. Comparação entre os perfis verticais de temperatura obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008). Pag. 75
- Figura 41. Diagramas de Hovmöller comparação entre as evoluções temporais das isopletas de temperatura obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008). Pag. 76
- Figura 42. Estação A e C variação temporal de temperatura, em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as fases de quadratura e sizígia no inverno (agosto de 2007), e quadratura e sizígia no verão (janeiro de 2008). Pag. 78

- Figura 43. Variações temporais das profundidades nas estações fixas A e C, localizadas nos canais estuarinos do RCA e do RPE. Pag. 80
- Figura 44. Estação A e C variações temporais do componente longitudinal de velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9) sobrepostas às curvas de variação do nível da superfície livre (azul), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), nas quatro campanhas, de cima pra baixo: quadratura de inverno; sizígia de inverno; quadratura de verão; sizígia de verão. Pag. 82
- Figura 45. Estação A e C variações temporais da salinidade em diferentes profundidades adimensionais e do nível médio da superfície livre (azul), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: quadratura de inverno; sizígia de inverno; quadratura de verão; sizígia de verão. Pag. 83
- Figura 46. Estação A e C variações temporais de temperatura em diferentes profundidades adimensionais e do nível médio da superfície livre (azul), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: quadratura de inverno; sizígia de inverno; quadratura de verão; sizígia de verão. Pag. 84
- Figura 47. Estação A variação temporal do Número de Richardson por Camada (RiL), para ciclos completos de maré semidiurna (~13 horas), durante as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Pag. 87
- Figura 48. Estação C variação temporal do Número de Richardson por Camada (RiL), para ciclos completos de maré semidiurna (~13 horas), durante as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Pag. 88
- Figura 49. Estações A (esquerda) e C (direita) perfis residuais do componente longitudinal de velocidade (linha fina) e velocidades residuais (linha grossa), para um ciclo completo de maré semidiurna

(~13 horas), durante as quatro campanhas: de cima pra baixo, quadratura de inverno, sizígia de inverno, quadratura de verão e sizígia de verão. Limites fixos de velocidade para cada estação. **Pag. 91**

- Figura 50. Estações A (esquerda) e C (direita) perfis residuais de salinidade (linha fina) e velocidades residuais (linha grossa), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as quatro campanhas: de cima pra baixo, quadratura de inverno, sizígia de inverno, quadratura de verão e sizígia de verão. Limites fixos de salinidade para cada estação. Pag. 93
- Figura 51. Estação A diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para as quatro campanhas: quadratura de inverno (Q/ago), sizígia de inverno (S/ago), quadratura de verão (Q/jan) e sizígia de verão (S/jan). Pag. 95
- Figura 52. Estação C diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para as quatro campanhas: quadratura de inverno (Q/ago), sizígia de inverno (S/ago), quadratura de verão (Q/jan) e sizígia de verão (S/jan). Pag. 96
- Figura 53. Estação A Valores do parâmetro v (ni) no diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para as quatro campanhas: quadratura de inverno (Q/ago), sizígia de inverno (S/ago), quadratura de verão (Q/jan) e sizígia de verão (S/jan). Pag. 98
- Figura 54. Estação C Valores do parâmetro v (ni) no diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para as quatro campanhas: quadratura de inverno (Q/ago), sizígia de inverno (S/ago), quadratura de verão (Q/jan) e sizígia de verão (S/jan). Pag. 99
- Figura 55. Estações A (azul) e C (vermelho) Transportes Residuais de volume através da seção transversal das estações fixas calculados para

ciclos completos de maré (~13 horas), durante as quatro campanhas: quadratura e sizígia de inverno, quadratura e sizígia de verão. **Pag. 101**

- Figura 56. Variação temporal dos vetores de velocidade do vento em Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em agosto de 2007. Fonte: autor. Dados: INMET. Pag. 103
- Figura 57. Histograma circular de ocorrência de ventos vindos dos sentidos E, NE, N, NW, W, SW, S, SE, para a região de Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em agosto de 2007. Fonte: autor. Dados: INMET. Pag. 103
- Figura 58. Variação temporal dos vetores de velocidade do vento em Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em janeiro de 2008. Fonte: autor. Dados: INMET. Pag. 104
- Figura 59. Histograma circular de ocorrência de ventos vindos dos sentidos E, NE, N, NW, W, SW, S, SE, para a região de Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em agosto de 2008. Fonte: autor. Dados: INMET. Pag. 105
- Tabela 1. Datas e horários de coleta dos dados nas estações analisadas. Pag.27
- Tabela 2. Coordenadas das estações oceanográficas fixas. Pag. 28
- Tabela 3. Valores dos números de Richardson Estuarino e seus significados. Pag. 33

Lista de Siglas e Símbolos

- \overline{h} altura média
- $\overline{\rho}$ densidade média
- \overline{S} Salinidade média
- u velocidade média
- ° grau
- °C Graus Celsius
- β Coeficiente de contração salina
- δS gradiente vertical de salinidade
- ΔS_v gradiente vertical de salinidade
- ΔZ intervalo de profundidade adimensional
- $\Delta \rho_H$ gradiente horizontal de densidade
- v parâmetro ni
- ρ densidade
- ρ₀ densidade na cabeceira do estuário
- ρ_b densidade na boca do estuário
- σ_t Sigma-t
- A Área de seção transversal
- AAS Anticiclone do Atlântico Sul
- ADCP Acoustic Doppler Current Profiler
- Af Clima Tropical Úmido
- A_m Área média de seção transversal
- ANA Agência Nacional de Águas
- APA Área de Proteção Ambiental
- B Largura da seção transversal
- BA Bahia
- BC Banco de Abrolhos
- BT Boca do Tomba
- BV Barra Velha
- CB Corrente do Brasil
- CEC Complexo Estuarino do Cassurubá
- CLC Camada de Limite Costeira

- CR Caravelas
- CTD Conductivity, Temperature, Depth
- E Leste
- EIE Equação Internacional de Estado da Água do Mar
- EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EPS Escala Prática de Salinidade
- g aceleração da gravidade
- h espessura da coluna d'água
- h hora
- IBAMA Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
- Renováveis
- IBJ Instituo Baleia Jubarte
- IC Ilha do Cassurubá
- INMET Instituto Nacional de Meteorologia
- IOUSP Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo
- JOPS Joint Oceanographic Projects
- K1 Componente luni-solar diurna
- kg quilo
- km quilômetro
- km² quilômetro quadrado
- m metro
- M2 Componente lunar principal
- m² metro quadrado
- m³ metro cúbico
- mm milímetros
- MPS Material Particulado em Suspensão
- N Norte
- NE Nordeste
- Nf Número de Forma
- NO Noroeste
- NV Nova Viçosa
- O Oeste
- O1 Componente lunar principal diurna
- Ox eixo das abscissas

Oxyz - eixo cartesiano xyz

Oxz – plano xz

Oy - eixo dos oordenadas

pc - parâmetro circulação

pe – parâmetro estratificação

PNMA - Parque Nacional Marinho dos Abrolhos

PRO-ABROLHOS – Produtividade, Sustentabilidade e Utilização do

Ecossistema do Banco de Abrolhos

Q – Transporte de Volume

Q_f – Vazão da descarga fluvial

RCA – Rio Caravelas

Ri_e – Número de Richardson Estuarino

Ri_L – Número de Richardson por Camada

RPE – Rio Peruípe

S - Salinidade

s – segundo

S – Sul

S2 – Componente solar principal

SE – Sudeste

SERCP – Sistema Estuarino dos Rios Caravelas e Peruípe

S_f – Salinidade no fundo

SO – Sudoeste

S_s – Salinidade na superfície

Sv – Sverdrup

SW - Sudoeste

T - Temperatura

t - tempo

ton - tonelada

u - componente longitudinal da velocidade

uf – velocidade gerada pela descarga fluvial

UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

UNIVALI - Universidade do Vale do Itajaí

ups - unidade prática de Salinidade

- u_{rmq} velocidade raiz média quadrática
- us velocidade superficial
- v componente transversal da velocidade
- W-Oeste
- Z profundidade adimensional
- z profundidade dimensional
- ZC Zona Costeira
- ZM Zona de Mistura
- ZR Zona de maré do Rio

RESUMO

Os principais fenômenos físicos que atuam como forçantes de movimento nos estuários são descarga fluvial, maré e vento. As diferentes intensidades com que cada um pode atuar proporcionam uma vasta gama de combinações e condições distintas, às quais estão submetidos os estuários de todo o mundo. O Complexo Estuarino do Cassurubá (CEC) está sujeito a descargas fluviais com vazões da ordem de 10¹ m³/s, a mesomarés variando entre 2 e 4 m, e a ventos de E/NE de ordem 10¹ m/s com algumas entradas de S/SO também de ordem 10¹ m/s. Contudo, seus canais Norte e Sul apresentam diferentes características hidrográficas e hidrodinâmicas. O objetivo deste trabalho foi confirmar e explicar esta distinção, através de dados de velocidade, temperatura, salinidade e profundidade, com suas respectivas variações temporais. Os objetivos específicos foram direcionados para se testar a hipótese de que a pequena diferença entre as vazões dos rios Caravelas e Peruípe (sendo a deste maior) pode criar configurações estruturais distintas e, consequentemente, gerar alterações no transporte de massa e volume. A análise dos dados demonstrou que ambos os canais estuarinos são influenciados principalmente por fenômenos marinhos, neste caso a maré. Os padrões estruturais e a ciclicidade das variações dos parâmetros estudados foram determinados predominantemente pela maré e a velocidade de suas correntes, com leve influência da descarga fluvial nas estruturas termohalina e hidrodinâmica. Como previsto, a pequena diferença observada a favor do rio Peruípe, associada a características geográficas e batimétricas locais, mostraram-se determinantes para os processos físicos que correm no CEC.

Síntese dos resultados: Velocidades máximas de 0,5 m/s nas quadraturas e 1 a 1,5 m/s nas sizígias, em ambos os canais. Circulação estuarina clássica observada nitidamente nas quadraturas. Sizígias mostram mesmo sentido ao longo da coluna d'água. Maior simetria entre correntes de vazante e enchente durante sizígias, menor durante quadraturas. Nova Viçosa com assimetria mais evidente devido à maior descarga fluvial. Salinidades mínimas de 32 em Caravelas e 17 em Nova Viçosa. Salinidades superiores a 36 em toda a coluna d'água durante fases de sizígia, associadas às temperaturas de 28°, constatase a intrusão da Água Tropical em ambos os canais estuarinos. Temperatura passou de 25 °C no inverno para 28 °C no verão, em ambos. O canal de Caravelas mostrou-se importador durante três campanhas e exportador em apenas uma, porém com maior intensidade. O canal de Nova Viçosa mostrou-se exportador durante as quatro campanhas. Onda de maré comportou-se como progressiva em Caravelas no inverno, e como estacionária no verão. Em Nova Viçosa foi como estacionária o tempo todo. Processos de mistura dominaram na maior parte do tempo. Estratificações formadas mais em quadratura e em torno de estofas. Classificações estação A – transição entre 1a e 2a – colunas bem misturadas, com fraca estratificação vertical; estação C – transição entre 1a, 2a, 1b e 2b – com apreciável estratificação nas quadraturas e colunas bem misturadas nas sizígias. Predomínio da difusão turbulenta no transporte de sal rio acima em A. Em C, boa participação da advecção nas quadraturas.

Palavras-chave: Estuário, Cassurubá, Caravelas, Peruípe, hidrodinâmica, estratificação.

ABSTRACT

River discharge, tidal currents and wind stress are the main physical phenomena that drive estuarine circulation. Each of these parameters can act in different intensities, resulting in a vast diversity of estuary characteristics. Cassurubá Estuarine Complex (CEC) is influenced by river discharges on the order of 10 m³/s, mesotides ranging between 2 and 4 m, NE wind speeds of around 10 m/s, and occasionally SW winds of around 10 m/s. An interesting feature of the CEC is the distinct hydrographic and hydrodynamic characteristics between its north and south channels. In this way, the objective of this study is to corroborate and explain this dissimilarity, using data of depth, water and wind velocities, water temperature and salinity, as well as their temporal variations. Specific objectives are to test the hypothesis that small differences between Caravelas and Peruípe rivers discharges (where the latter is the largest one) can create different structural configurations of those parameters and, consequently, cause variations in mass and volume transport. Data analysis showed that both channels are mainly influenced by in this tides. Patterns of structural and marine phenomenon, case cyclical variations of studied parameters were determined mainly by tides and speed of their currents, with slight river discharge influence in thermohaline structure and hydrodynamics. As expected, the small difference observed in favor of Peruípe River, associated with local geographic and bathymetric characteristics, proved to be decisive for the physical processes that occur in CEC.

Summary of results: maximum speed of 0.5 m/s in neaps and 1 to 1.5 m/s in springs, in both channels. Classical estuarine circulation observed clearly in neaps. Springs show same direction along the water column. Greater symmetry observed between ebb and flood currents during spring. Nova Viçosa showed more evident asymmetry due to higher river discharge. Minimum of salinity was 32 and 17, in Caravelas and Nova Viçosa, respectively. It reached values greater than 36 through water column during springs, associated with 28°C temperatures, it indicates de intrusion of Tropical Water in both channels. Temperatures varied from 25 ° C in winter to 28 ° C in summer. Caravelas

channel was importer during three campaigns and exporter during one, but this one with greater intensity. Nova Viçosa channel was exporter during four campaigns. Tidal wave behaved as progressive in Caravelas estuary during winter and stationary in summer. Peruípe estuary showed stationary characteristics all campaigns. Mixing processes dominated most of time. Stratifications formed mainly in neap and around tide inversions. Classification station A – between 1a and 2a – well mixed, with weak vertical stratification; station C – between 1a, 2a, 1b, 2b – appreciable stratification in neaps and well mixed in springs. There was predominance of turbulent diffusion in upestuary transport of salt in station A. In station C, a greater role of advection appeared in neaps.

Keywords: Estuary, Cassurubá, Caravelas, Peruípe, hydrodynamics, stratification.

Título: Comparação entre as desembocaduras do Complexo Estuarino do Cassurubá (BA): Características hidrográficas e hidrodinâmicas

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho contempla os resultados do projeto de pesquisa relacionado ao programa de pós-graduação - nível mestrado - do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP).

O estudo investigou características físicas essenciais para compreensão do funcionamento do Complexo Estuarino do Cassurubá (CEC), região de grande importância ambiental e que tem presenciado diversas atividades antrópicas relevantes como instalações portuárias, obras de dragagem, turismo ecológico e pesca. Além destas atividades, a região e seus arredores estão, cada vez mais, sendo mira de novos empreendimentos como carcinicultura e exploração de recursos minerais.

O entendimento deste sistema costeiro é fundamental tanto para o planejamento de projetos e atividades realizadas pelo homem quanto para o monitoramento ambiental e conservação da área.

1.1. Tema e Área de Estudo

Estuários são basicamente ambientes de transição entre o continente e o oceano, onde rios encontram o mar. A palavra é originada do latim *aestus,* que pode significar maré ou calor. Ambos os significados são citados em trabalhos científicos, com o primeiro fazendo referência direta à influência da maré nestes ambientes, e o segundo referindo-se à dinamicidade destes ambientes (*aestuarium*: local onde a água ferve).

Algumas das principais definições de estuário utilizadas em trabalhos científicos obtidos na literatura e resumidos em Miranda *et al* (2002) são:

- Pritcthard (1954, 1967), Cameron e Pritchard (1963): "Estuário é um corpo de água costeiro semifechado com interligação livre com o oceano adjacente, no interior do qual a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce originada da descarga continental".
- Kjerfve (1989): "Estuário é um ambiente costeiro com conexão restrita com o oceano adjacente à qual permanece aberta pelo menos intermitentemente. Pode ser subdividido em três zonas distintas:

- Zona de Maré do Rio (ZR): corresponde à parte fluvial com salinidade inferior a 1, mas ainda sujeita à influência da maré;

- Zona de Mistura (ZM): onde ocorre a mistura da água doce proveniente da drenagem continental com a água da região costeira adjacente;

- Zona Costeira (ZC): corresponde à região costeira adjacente, delimitada pela pluma de maré vazante. A extensão dessa 'frente' estuarina delimita a 'Camada Limite Costeira' (CLC)."

 Dyer (1997): "Um estuário é um corpo de água costeiro semi-fechado com interligação livre com o oceano adjacente, estendendo-se rio acima até o limite de influência da maré, sendo que em seu interior a água do mar é mensuravelmente diluída pela água doce oriunda da drenagem continental".

Estes corpos são influenciados por fenômenos físicos que atuam como forçantes de movimento da água. Os principais forçantes são descarga fluvial, maré e vento. As diferentes intensidades com que cada uma pode atuar proporcionam diversas combinações e, consequentemente, múltiplas condições distintas e peculiares, às quais estão submetidos os estuários de todo o mundo.

O Brasil apresenta, por si só, com suas dimensões e configurações geográficas, uma extensa linha de costa sujeita aos mais diversos tipos de maré, clima e regimes de ventos, além das diferentes formas topográficas que configuram os mais variados tipos de rio.

Dimensionando essas quantidades que forçam a hidrodinâmica estuarina, os intervalos de valores aproximados que encontramos em todo o país são:

- Descargas fluviais: de 10⁰ a 10⁵ m³/s;
- Marés: de 0 a 7 m;
- Ventos: de 0 a 15 m/s.

O tema do presente trabalho aborda as características hidrográficas e hidrodinâmicas do complexo estuarino localizado entre os municípios de Caravelas (CA) e Nova Viçosa (NV), conhecido oficialmente como Complexo Estuarino do Cassurubá (CEC) ou, de acordo com Pereira *et al* (2010) e Andutta (2011), como Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (SERCP), na região do extremo sul do estado da Bahia (latitude 17°45' S) (**Fig.** 1). O CEC é um ambiente de planície costeira, que forma um sistema de transição entre o continente e o oceano Atlântico Sul, constituído por canais rasos ao redor da Ilha do Cassurubá (IC).

Esse complexo estuarino ou simplesmente estuário de acordo com a definição de Perillo (1995), apresenta três bocas ou desembocaduras: duas localizadas ao norte da IC (Barra Velha - BV e Boca do Tomba - BT) próximas à cidade de Caravelas (CA), e uma ao sul, adjacente à cidade de Nova Viçosa (NV) (**Fig. 2**). Os domínios interiores dos canais estuarinos das regiões norte (N) e sul (S) estão interligados por um sinuoso canal orientado aproximadamente na direção N-S, posicionado entre a IC e o continente.



Figura 1. Área sob estudo: Complexo Estuarino do Cassurubá, entre os municípios de Caravelas e Nova Viçosa, na região do Extremo Sul da Bahia. Fonte: Autor; adaptado da carta náutica 1310 da marinha.



Figura 2. Canais estuarinos e desembocaduras adjacentes aos municípios de Caravelas e Nova Viçosa, na região do Extremo Sul da Bahia. Fonte: Autor; adaptado das cartas náuticas 1302 e 1312 da marinha e de imagem de satélite da Google.

Clima e regime de ventos

O clima da região sul da Bahia é o Tropical Úmido, do tipo Af (Peel *et al*, Köppen-Geiger, 2007), quente e úmido durante o ano todo, com variação de temperatura entre 20 °C e 29 °C e amplitude térmica maior à medida que se avança em direção ao Sul. A temperatura média do mês mais frio é aproximadamente 20 °C e nos meses mais quentes (janeiro e fevereiro) a temperatura chega a 28,2 °C. Temperaturas médias anuais ficam na faixa dos 24,5 °C.

Sem estação seca, o total das chuvas do mês mais seco é superior a 60 mm, com precipitações maiores de março a agosto, ultrapassando o total de 1.500 mm anuais. Esse tipo de clima predomina no noroeste do Amazonas; arredores de Belém, no Pará; litoral do Paraná, do Estado de São Paulo, parte do litoral do Rio de Janeiro (Golfari *et al.*, 1978), e litoral da Bahia, desde o extremo sul da Bahia até arredores de Salvador (Mello, 1973).

Em relação aos ventos, a região é influenciada pela parte sul dos ventos alísios e pelo anticiclone do Atlântico Sul (AAS). Devido à migração sazonal da célula do AAS para o norte e para o sul, o vento resultante possui direção nordeste (NE) entre os meses de novembro a fevereiro e de sudeste (SE) entre março e agosto (Fig. 3). O tempo na região pode também ser influenciado pela penetração de frentes frias e pela liberação de vórtices ciclônicos com variabilidade interanual. Um grande número de frentes frias chega à região durante o outono e o inverno, enquanto que um menor número ocorre durante o verão (Andrade, 2000). Estudos recentes confirmam um ciclo anual bem demarcado da direção e velocidade do vento: no verão os ventos prevalecentes e dominantes são de NE com intensidade média que podem atingir 11,0 m.s⁻¹ e no inverno, sopram do quadrante S/SE com intensidades máximas próximas a 9,0 m.s⁻¹, com intervalos relativos de calmarias próximos a 1,8% a 2,0%. O vento resultante nessas épocas sazonais tem direção NE e SE e o componente transversal à linha de costa não apresenta um padrão sazonal bem demarcado com intensidades médias que variaram no período analisado em geral de -2,0 m.s⁻¹ a -0,5 m.s⁻¹ (Teixeira, 2006).





Figura 3. Tensão de cisalhamento do vento na região oeste do Oceano Atlântico Sul para verão/janeiro (esquerda) e inverno/julho (direita). Fonte: Adaptada de Mazzini (2009), desenhada por Castro (1996) com base nos dados interpolados por Samuels e Cox (1987).

Descargas Fluviais

A parte norte do sistema recebe descarga fluvial do rio Cupido (denominado de rio Caravelas (RCA) ao passar pela cidade de mesmo nome), cujos principais tributários são o rio do Poço (na margem direita) e os rios Jaburuna, do Massangano e do Macaco (na margem esquerda). Na parte sul em NV, os tributários do estuário são os rios Peruípe (RPE), Barra Velha e Pituaçu, tendo o primeiro como principal contribuinte. As três desembocaduras deságuam na porção norte do Banco dos Abrolhos (BC), nome dado ao alargamento da plataforma continental brasileira entre o extremo sul da Bahia e o norte do Espírito Santo (16°40' – 19°30' S e 38°00' – 39°30' W), onde há a presença de arquipélagos e recifes de corais.

Assim como diversos outros rios desta região hidrográfica da Bacia do Atlântico Leste, os rios Caravelas e Peruípe possuem relativamente baixas vazões fluviais devido à configuração geográfica da região. As feições topográficas chamadas de Serra do Espinhaço e Chapada Diamantina formam um "paredão" que limita a área de drenagem dos rios desta região a uma faixa estreita (**Fig. 4**), fazendo com que captem um montante de volume de água

relativamente baixo. A vazão para o RCA foi estimada em 4 a 5 m³/s por Pereira *et al* (2010) e em 3,5 a 5,5 m³/s por Andutta (2011).



Figura 4. Topografia geral do território brasileiro. Fonte: Adaptado de: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brazil_topo_en2.PNG Figura gerada em GMT (http://gmt.soest.hawaii.edu), com dados dos domínios públicos: ETOPO2 (topography/bathymetry) - http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html; GLOBE (topography) - http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/gltiles.html; SRTM (topography) - http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/.

A descarga fluvial do RCA não é monitorada rotineiramente pela Agência Nacional de Águas (ANA), muito provavelmente devido à pequena área da bacia de drenagem (apenas 600 km²). Esta vazão foi estimada por



Izumi (2008), através do método indireto de P. Schreiber e é apresentada a seguir (**Fig. 5**).

Figura 5. Variação mensal da vazão do rio Caravelas, estimada através do método indireto de P. Schreiber. Fonte: Izumi (2008).

Já para o RPE, a ANA realiza medidas de vazão através da estação linimétrica Helvetia # 55510000, que abrange grande parte da área da bacia de drenagem de aproximadamente 2.840 km². Como a bacia de drenagem à jusante da estação linimétrica é aproximadamente 1.760 km², totalizando 4.600 km², pode-se obter a vazão total do RPE extrapolando os dados dessa estação.

Aplicando-se essa correção, a média mensal da descarga fluvial é relativamente mais alta (mais que 40 m³/s) no verão (dezembro a janeiro) e mais baixa (24 m³/s) no fim do inverno (agosto a setembro), podendo atingir valores extremos próximos a 45 m³/s (**Fig. 6 - esquerda**). A série temporal das médias anuais (**Fig. 6 - direita**) correspondentes a esse período apresenta uma variação quase decadal, com mínimos nos anos de 1983, 1988 e 1998 e

máximos nos anos de 1985, 1992 e 2002 e, portanto com intervalos de tempo que variam de 6 a 10 anos.



Figura 6 – Variação mensal (esquerda) e anual (direita) da descarga fluvial do rio Peruípe, Bahia. Fonte: ANA (Agência Nacional de Águas)

As bacias hidrográficas dos dois rios possuem interligações na região média dos rios, antes mesmo de atingirem a região do complexo estuarino, onde também, estão interligados como mencionado anteriormente (**Fig. 7**), formando praticamente uma única bacia hidrográfica.



Figura 7. Esquema representativo das bacias hidrográficas interligadas dos rios Caravelas e Peruípe. Fonte: Adaptada de Sarmento-Soares, *et al* (2006).

Região estuarina e Plataforma Continental Adjacente

A água do mar que entra no estuário é diluída pela água da descarga fluvial, por processos de mistura (advecção e difusão turbulenta) gerados pela oscilação cíclica da maré, por atrito interno e tensões de cisalhamento no fundo (Miranda *et al*, 2002). Portanto, com base nos trabalhos de Pritchard (1955, 1967) e de outros estuários tropicais pesquisados na costa leste brasileira como os estuários de Itamaracá (Medeiros e Kjerfve, 1993), do rio Jaboatão (Araújo *et. al*, 1999), do rio Curimataú (Miranda *et al.*, 2005 e 2006; Andutta, 2006; Andutta *et al.*, 2006) e dos próprios rios Caravelas (Pereira, 2010; Andutta, 2011) e Peruípe (Chagas *et al* 2011; Andutta, 2011), é prevista a ocorrência de movimentos gerados por influência baroclínica, que podem transportar concentrações de substâncias e sedimentos em suspensão para o interior do estuário. Esse movimento, associado à difusão turbulenta causada

pela maré, tende a contrabalançar o transporte estuário abaixo gerado pela descarga fluvial.

Considerando toda a região de influência da maré, a área do complexo estuarino é da ordem de algumas centenas de quilômetros quadrados, dos quais apenas 60 correspondem à área do estuário do RCA, enquanto o restante corresponde ao do RPE. O canal estuarino na região norte do complexo apresenta largura variando entre algumas dezenas de metros até um quilômetro, chegando às desembocaduras com aproximadamente 500 m na BT e 1000 m na BV. Já na região sul do complexo, o canal estuarino apresenta larguras entre 200 m e 500 m, com uma desembocadura variando entre 700 m na porção mais interna e aproximadamente 3000 m na porção mais externa. As profundidades chegam a 13 m no norte e a 11 m no sul. O canal de CA tem sua orientação variando entre NO-SE (noroeste-sudeste), passando por E-O (leste-oeste) e terminando com suas bocas voltadas para NE (nordeste) na BV e SE (sudeste) na BT. O canal de NV possui orientação geral NE-SO, mas chega ao oceano com sua desembocadura voltada para SE.

A circulação, o transporte de volume e a concentração do material particulado em suspensão do sistema dual de bocas da região norte do estuário (BV e BT), foram estudados recentemente por Schettini e Miranda (2010) com base em medidas quase sinóticas realizadas na maré de sizígia. Nesse experimento, a BV e a BT foram classificadas como *Bem Misturado* (Tipo 1a) e *Parcialmente Misturado com Fraca Estratificação Vertical* (Tipo 2a), respectivamente, com transportes de volume muito próximos variando entre 3.500 m³.s⁻¹ e 3.100 m³.s⁻¹, na vazante e enchente, com uma taxa de transporte residual de Material Particulado em Suspensão (MPS) para fora do estuário igual a 18,0 ton/ciclo de maré.

Recentemente, a hidro e a morfodinâmica da região estuarina e costeira foram estudadas através de modelagem numérica. Assim como os autores acima, Pianca (2009) e Samaritano (2010) constataram a dominância da maré nos processos físicos que ocorrem nos canais estuarinos. O canal de CA mostrou-se hiperssincrônico (convergência > fricção), com a concentração de sedimento diminuindo estuário acima, enquanto o de NV foi hipossincrônico (fricção > convergência) e a concentração de sedimento aumentou estuário acima (Samaritano, 2010).

A hidrodinâmica da região costeira adjacente também pode ter uma importante contribuição no funcionamento hidrodinâmico do estuário e em particular no comportamento da pluma estuarina. As ondas que atingem a linha de costa na região são determinantes para a dinâmica do pontal e dos bancos arenosos, e são bastante influenciadas pela numerosa presença de recifes de corais sobre a topografia da plataforma continental local (Pianca, 2009).

Entre as latitudes de 16° S e 20° S, a Plataforma Continental Leste brasileira, caracteriza–se por topografia submarina complexa devido à presença de bancos e cadeias submarinas (**Fig. 8**).



Figura 8. Topografia de fundo da margem continental brasileira e trecho da planície abissal adjacente à área de estudo. Fonte: Soutelino (2008).

A topografia do fundo submarino na plataforma continental adjacente apresenta dois canais orientados aproximadamente na direção norte-sul: os canais de Sueste e de Abrolhos, com larguras aproximadamente iguais a 20 e 50 km, respectivamente (**Fig. 9**).



Figura 9. Principais canais, feições submarinas e arcos costeiros presentes na Plataforma Continental adjacente à região em estudo. Fonte: Adaptado de Leão (2002).

Os processos físicos e a circulação das massas d'água que passam por estes canais são essenciais para as trocas de sedimentos em suspensão e substâncias dissolvidas, e atuam como um elo entre a região estuarina e o oceano adjacente. O complexo estuarino em estudo deságua na porção norte do Banco de Abrolhos, o qual apresenta uma variedade de sedimentos que compõem sua textura superficial (**Fig. 10**) (Marchioro *et al.*, 2005).



Figura 10. Descrição faciológica dos Bancos de Abrolhos e Royal Charlote. Fonte: Marchioro *et al.*, (2005).
O comportamento e a advecção da pluma estuarina, que é parte integrante do estuário (de acordo com a definição de Kjerfve, 1989), são governados pelas correntes costeiras geradas pelo vento, pela maré e incursões dos meandros e vórtices da Corrente do Brasil (CB) (Miranda e Castro, 1981; Castro e Miranda, 1998; Silveira *et al.*, 2000; Castro *et al.* 2005).

Com base nos dados das campanhas de cooperação técnico-científicas Brazil/Germany do Joint Oceanographic Projects (JOPS) realizadas em 1995 a bordo do N-Oc. Viktor Hensen, trabalhos pioneiros das principais características da região estuarina e da plataforma continental adjacente a Caravelas foram realizados, dentre os quais podemos destacar: Knoppers *et al.* (1999a), Knoppers *et al.* (1999b), Leipe *et al.* (1999), Gaeta *et al.* (1999). Nestes projetos, foram realizadas medidas de corrente durante quatro ciclos de maré semidiurna nos canais Sueste e de Abrolhos.

De acordo com Knoppers *et al.* (1999b) e Leipe *et al.* (1999), no canal Sueste as correntes longitudinais apresentaram forte correlação com a maré, atingindo intensidades máximas para o sul de -0,80 m.s⁻¹ e -0,60 m.s⁻¹ na superfície e no fundo, respectivamente, e os correspondentes valores das médias temporais iguais a -0,32 m.s⁻¹ e -0,25 m.s⁻¹, advectando a pluma estuarina para o sul. No canal de Abrolhos, as velocidades longitudinais máximas na superfície e fundo foram praticamente iguais (~0,60 m.s⁻¹) e os valores médios na superfície e fundo também foram orientados para o sul com intensidades de -0,19 m.s⁻¹ e -0,13 m.s⁻¹, respectivamente. Os componentes transversais da velocidade da corrente apresentaram forte modulação da maré no canal de Abrolhos, mas não no canal Sueste. Tendo em vista esses resultados os autores concluíram que o transporte advectivo predominante de concentrações de substâncias é ao longo da costa.

Lessa e Cirano (2004), visando à caracterização hidrodinâmica dos canais Sueste e de Abrolhos com séries temporais mais longas de corrente, indicaram um papel secundário da maré e dos eventos de alta freqüência, uma

vez que a série temporal analisada indicou que a variabilidade das correntes é predominantemente gerada por processos subinerciais (>72 h).

Um importante fenômeno que pode ter grande influência na região em estudo é a CB, cuja origem ocorre a partir do ramo mais meridional da Corrente Sul Equatorial (**Fig. 11**), o qual gira anticiclonicamente para o sul em torno da latitude 9°S (Soutelino, 2008) ou 10°S (Peterson e Stramma, 1990), alimentando o início da CB com cerca de 4 Sv (1 Sv = 10⁶ m³/s) (Peterson e Stramma, 1990). Esse transporte flui para o sentido sudoeste, com seu núcleo tendendo a acompanhar a linha de quebra da plataforma continental, como uma corrente superficial rasa (**Fig. 12**). Miranda e Castro (1981) estimaram um transporte de 6,5 Sv através do paralelo 19°S, ao largo da isóbata de 200 m. Conforme Stramma *et al.* (1990), ao sul de 15°S parte substancial do transporte da CB pode ocorrer na própria plataforma continental, em profundidades menores do que 200 m, devido ao alargamento desta última. Este fato também pode ter influência na hidrodinâmica dos canais sobre o Banco de Abrolhos e, consequentemente, na região da pluma estuarina.



Figura 11. Esquema do sistema de correntes de contorno oeste ao longo da margem continental brasileira. Fonte: Soutelino (2008).



Figura 12. Esquema da porção superficial da Corrente do Brasil e seu núcleo acompanhando a linha de quebra da Plataforma Continental. Fonte: Soutelino (2008).

Através de dados observados, Teixeira (2006) mostrou que as correntes que passam através do canal Sueste apresentaram sentido predominantemente para Sul/Sudoeste durante grande parte do tempo, o que pode estar relacionado com a entrada de uma parcela da CB na plataforma continental pelo lado norte do Banco de Abrolhos.

<u>Maré</u>

Estudos anteriores utilizando dados obtidos de um marégrafo instalado num terminal de barcaças da empresa Aracruz (atulamente Fíbria), mostraram que a variação cíclica da maré tem periodicidade semidiurna e desigualdades diurnas (**Fig. 13**) (Izumi, 2008). A altura da maré varia e é modulada quinzenalmente pelas fases da Lua: nas marés de quadratura e de sizígia a altura da maré varia entre 2 m e 4 m, respectivamente, o que a classifica como mesomaré, de acordo com o critério de Davis (1964). O número de forma (Nf), calculado pela razão entre a soma dos principais componentes diurnos (O1+K1) e a soma dos componentes semidiurnos (M2+S2), é igual a 0,19 (Lessa e Cirano, 2004; Teixeira, 2006; Andutta, 2011), confirmando a classificação como maré semidiurna.



Figura 13. Maré – variação do nível da superfície livre, ao longo de aproximadamente um mês. Fonte: Izumi (2008).

1.2. Problema

Todo o CEC está sujeito aos mesmos fenômenos forçantes. Sintetizando as informações anteriores, temos:

- Marés com variações de 2 a 4 m, classificadas como mesomaré;
- Descargas fluviais com vazões da ordem de 10¹ m³/s;
- Ventos de NE/E da ordem de 10 m/s atuando dominantemente durante boa parte do ano, com ocorrência de S/SO relacionados a passagens de frentes frias, também da ordem de 10 m/s.

Contudo, os canais apresentam diferentes características hidrográficas. Em estudo recente, Pereira *et al* (2010) encontraram, utilizando também dados do projeto Produtividade, Sustentabilidade e Utilização do Ecossistema do Banco de Abrolhos (PRO-ABROLHOS), resultados que demonstraram a alternância do transporte residual de volume no canal estuarino do RCA (região norte do complexo) de ciclos completos de maré, ora apresentando características importadoras, ora exportadoras. Contudo, Samaritano (2010), Schettini e Miranda (2010) e Andutta (2011) verificaram características exportadoras para este canal. Chagas *et al* (2011) encontraram, também com dados do PRO-ABROLHOS e modelos teóricos, apenas velocidades residuais com sentido estuário abaixo (oceano) para o canal estuarino do RPE.

Desta forma, apesar de ambos os canais estuarinos estarem sujeitos aos mesmos fenômenos forçantes e com intensidades de mesma ordem de grandeza, já se constatou características distintas entre os canais. Considerando-se o fato de uma boca poder atuar como importadora e a outra apenas como exportadora, surgiu o problema investigado neste trabalho.

1.3. Importância

Importância ecológica

A bacia hidrográfica do RCA além de assegurar a manutenção de uma das maiores áreas de manguezal da Bahia, com 19,5 mil hectares de área, possui potencial para o desenvolvimento de diversos roteiros ecoturísticos. Na IC, em seu vasto território de aproximadamente 120 km², são encontrados ecossistemas dos mais representativos da paisagem brasileira: manguezal, restinga e Mata Atlântica. Na ilha já foram catalogados por biólogos, centenas de espécies de árvores e aves.

A região costeira adjacente é uma Área de Proteção Ambiental (APA) na qual se encontra o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (PNMA) (**Fig.9**), criado pelo decreto 88.218 de 06 de abril de 1983, e que recebe anualmente mais de 15 mil visitantes monitorados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Instituto Baleia Jubarte (IBJ). O Banco dos Abrolhos apresenta o maior banco de corais e a maior biodiversidade marinha do Atlântico Sul. Em 1987, durante os trabalhos de implantação do PNMA, foi redescoberta a presença de uma pequena população remanescente de baleias Jubarte e sugeriu-se a importância de Abrolhos como principal "berçário" da espécie no Oceano Atlântico Sul Ocidental.

Em função de suas características estruturais e funcionais, e de sua localização geográfica, o estuário tem uma grande importância ambiental, como podendo atuar filtro natural, ou até como regulador da exportação/importação de substâncias e energia por processos de transporte de natureza advectiva e difusiva. A influência dessas concentrações advectadas pela pluma estuarina e pelas correntes costeiras pode atingir formações biogênicas (recifes) e feições vulcânicas aflorantes do PNMA, tais como a Coroa Vermelha, o Parcel das Paredes e o Parcel dos Abrolhos mais distante.

Importância econômica

Os estuários são ambientes bastante favoráveis à presença humana e ao crescimento de centros urbanos, o que os tornam vulneráveis, constantemente sujeitos a variações ambientais, tanto de origem natural ocasionadas por eventos meteorológicos locais e remotos, com escala temporal variando em amplos intervalos de tempo, quanto de origem antrópica, provocadas pelas diversas atividades realizadas pelo homem.

Esses sistemas ambientais tiveram uma grande importância histórica e continuam a ter uma contribuição fundamental para o desenvolvimento de todas as atividades humanas. Estão entre as principais razões para o estabelecimento, desenvolvimento e instalação de importantes cidades localizadas na costa brasileira:

- Capacidade natural desses sistemas de renovarem periódica e sistematicamente suas águas sob a influência da maré;
- Facilidades para instalações portuárias comerciais e navais;
- Comunicação natural com regiões de manguezais;
- Abundante comunidade biológica;
- Facilidade para a captação de água doce;
- Proximidade para as atividades econômicas e de lazer.

Por serem receptáculos naturais, não só da drenagem dos efluentes da região adjacente, como também de substâncias patogênicas dos centros urbanos, são essenciais a capacidade de renovação de suas águas e a assimilação de substâncias antrópicas lançadas no seu interior, sendo ambas determinadas por processos de natureza física, química, biológica e geológica que interagem entre si de forma complexa.

O diagnóstico de impactos ambientais e o estabelecimento de um programa de gestão ambiental demandam a caracterização física do sistema costeiro e estuarino em seus vários compartimentos e processos. Questões científicas relevantes ao conhecimento atual do comportamento morfodinâmico das desembocaduras também demandam o conhecimento hidrodinâmico dos canais estuarinos.

Os canais estuarinos do RCA e do RPE testemunham importantes atividades socioeconômicas como navegações relacionadas com a pesca local e atividades de turismo. Além disso, são realizados transportes de produtos a partir de terminais e portos localizados dentro do canal do RCA para outros estados e, consequentemente, são executadas obras de dragagem para segurança da navegação.

Os municípios de CA e NV são os principais portões de entrada para o PNMA (**Fig.9**), atrativo maior da Costa das Baleias, distante do arquipélago 36 milhas náuticas, cerca de 66 km, e que reúne as melhores condições de navegação em mar aberto, protegida pelos recifes de corais.

Como visto, existem alguns estudos e trabalhos científicos realizados neste complexo estuarino relacionados às diversas áreas da oceanografia, mas poucos estudos sobre as características hidrodinâmicas, principalmente da parte estuarina. Este estudo pretende, portanto, colaborar com este ramo da ciência, fornecendo subsídios e informações relevantes para questões futuras, seja dentro do próprio meio acadêmico ou no planejamento de atividades e empreendimentos humanos.

1.4. Hipótese e Objetivos

A hipótese científica que orienta este trabalho é: embora os dois canais estuarinos sejam influenciados basicamente pelos mesmos fenômenos geradores de movimento (descarga fluvial, gradiente longitudinal de salinidade, tensão de cisalhamento do vento e maré), suas características hidrográficas e hidrodinâmicas apresentam diferenças estruturais, devido à maior atuação da descarga fluvial (RPE) na parte sul do CEC, influenciando o transporte estuarino durante determinados períodos do ano.

<u>Objetivos</u>

Com base nessa hipótese e através da utilização de dados experimentais e modelos analíticos, este trabalho corresponde a uma tentativa de explicar essa distinção em questão, descrevendo e comparando as características hidrográficas e hidrodinâmicas nas regiões norte e sul do complexo estuarino, para quatro condições hidrodinâmicas distintas: quadratura e sizígia de inverno, e quadratura e sizígia de verão.

Deste modo, o estudo se realizou através das seguintes etapas:

- Avaliação e comparação das variações temporais de características hidrográficas (salinidade e temperatura) e hidrodinâmicas (velocidade, transporte e maré) dos canais estuarinos de CA e NV, durante ciclos completos de maré, em quatro condições ambientais distintas, envolvendo estações do ano opostas e fases de maré opostas;
- Estabelecimento das principais forçantes da circulação estuarina e suas variações nas escalas temporais acima, com base no cálculo do número de Richardson Estuarino;

- Estabelecimento das características estruturais da coluna d'água quanto aos processos de estratificação e mistura ao longo dos ciclos de maré, com base no cálculo do número de Richardson por Camadas;
- Classificação da zona de mistura com o Diagrama Estratificaçãocirculação, em condições de maré de quadratura e de sizígia, estabelecendo a importância relativa dos processos advectivo e de difusão turbulenta para transporte de sal;
- Determinação do transporte residual de volume de água ao longo das seções dos canais estuarinos para cada uma das quatro campanhas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Dados Oceanográficos

Os dados hidrográficos e de corrente utilizados para este estudo foram coletados durante o projeto PROABROLHOS. Este envolveu equipes interdisciplinares do Instituto Oceanográfico da USP (IOUSP), da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI) e da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com medições *in situ* através de diversos equipamentos como CTD's (Conductivity, Temperature, Depth), ADCP's (Acoustic Doppler Current Profiler), correntômetros mecânicos, turbidímetros e marégrafos de pressão (**Fig. 14**). Foram coletadas também amostras de água para análises físico-químicas e biológicas.



Figura 14. Equipamentos e embarcações utilizadas nas diversas estações oceanográficas fixas do projeto pro-abrolhos. Fonte: autor, fotos adaptadas de http://ldc.io.usp.br e http://www.valeport.co.uk.

Essas propriedades foram medidas em diversas estações oceanográficas fixas durante o inverno (agosto de 2007) e o verão (janeiro de 2008) (**Tabela 1**), épocas climatológicas relacionadas à baixa e à alta descarga

fluvial, respectivamente. Para cada época, realizaram-se medidas de meia em meia hora durante um ciclo completo de maré (~13 h) nas fases de quadratura e sizígia, totalizando 26 perfis verticais em cada campanha para cada estação fixa simultaneamente.

Campanhas	Estações A e C
Quadratura no Inverno	22/08/2007 - 07:30 h às 20:30 h
Sizígia no Inverno	28/08/2007 - 04:30 h às 17:30 h
Quadratura no Verão	16/01/2008 - 05:00 h às 18:00 h
Sizígia no Verão	23/01/2008 - 04:30 h às 17:30 h

 Tabela 1. Datas e horários de coleta dos dados nas estações analisadas.

Para o presente trabalho, utilizaram-se apenas os dados de temperatura, salinidade, pressão e velocidade, perfiladas ao longo da coluna d'água, amostradas simultaneamente nas estações A e C (**Fig. 15**) (**Tabela 2**).



Figura 15. Localização das estações oceanográficas fixas A e C, próximas às cidades de Caravelas (CA) e Nova Viçosa (NV), respectivamente, na região do Extremo Sul da Bahia. Fonte: Autor, a partir das Cartas Náuticas 1302, 1310 e 1312 da Marinha do Brasil.

Coordenadas	Estação A	Estação C
Latitude	17º 45' 13,7" S	17º 33' 01,2" S
Longitudinal	039° 13' 52,5'' W	039º 11' 31,5" W

Tabela 2. Coordenadas das estações oceanográficas fixas.

Estes mesmos dados já foram utilizados por outros autores para realização de estudos na própria área, porém, com outros objetivos em foco. Além disso, diferentes tratamentos de filtragem e interpolação foram aplicados por cada autor, resultando, inclusive, em resultados ligeiramente diferentes.

Por opção, escolheu-se não passar qualquer tipo de filtro a não ser aquele para eliminação de *spikes* com valores duvidosos. Esta decisão foi influenciada pelo fato de que este trabalho teve, especificamente, a intenção de explicar uma pequena diferença de comportamento hidrodinâmico dos canais estuarinos. Desta forma, qualquer alisamento poderia mascarar ou suavizar esta pequena alteração de padrão comportamental. Além disso, a adoção da profundidade adimensional em diversas análises detalhadas mais a frente já envolve uma interpolação dos dados, o que pode suavizar algum sinal observado.

A salinidade foi determinada a partir dos dados de condutividade com o algoritmo da Escala Prática de Salinidade (EPS-1978) (UNESCO, 1981). A densidade foi calculada através da Equação Internacional de Estado da Água do Mar (EIE-1980). Ambas as propriedades foram obtidas através do processamento dos dados em tempo real pelos próprios programas dos equipamentos.

O algoritmo da EPS-1978 é um conjunto de equações que são funções da temperatura, da razão de condutividade elétrica sob pressão e da própria pressão. Já a EIE-1980 são funções não lineares das variáveis de estado salinidade (S) e temperatura (T), obtidas em experimentos picnométricos em condições controladas de S e T, com altíssima precisão. Nesta sessão foram demonstradas as relações entre as propriedades em questão (densidade, temperatura e salinidade), através dos padrões de variação dos valores obtidos. Nas figuras, utilizaram-se valores de Sigma-t (σ_t) pela maior simplicidade (**Eq. 1**).

 $\sigma_t = [\rho(S,T) - 1] \times 10^3$. (Equação 1)

Em relação aos dados de velocidade, o primeiro passo foi realizar a correção magnética, quando necessária. Diversos aparelhos e equipamentos consideram o norte magnético ao invés do geográfico na medição dos dados, o que deve ser levado em conta no processamento. Após isto, foi feita a decomposição dos vetores de velocidade de acordo com a orientação dos canais estuarinos em estudo, em relação a um referencial local Oxyz, com Ox sempre orientado na direção paralela ao canal estuarino (**Fig. 16**) e com sentido estuário abaixo. A decomposição é feita simplesmente utilizando-se de relações trigonométricas de seno e cosseno (Miranda *et al*, 2002). Neste estudo, esses componentes são denotados por u e v, respectivamente.



Figura 16. Exemplo de decomposição da velocidade medida em componentes u (paralelo ao canal, Ox) e v (transversal ao canal, Oy), para um canal qualquer. Fonte: Autor.

A fim de minimizar as influências das variações da maré na profundidade de coleta, optou-se pela utilização da profundidade adimensional Z=z/|h(t)| (**Eq. 2**), (onde z e |h(t)| denotam a profundidade de coleta e a espessura da coluna de água no instante das medidas, respectivamente), segundo metodologia proposta por Kjerfve (1975). As medidas foram interpoladas ao longo da coluna de água, desde a superfície até o fundo, em intervalos $\Delta Z=Z/10$.

 $Z = \frac{z}{|h(t)|}$. (Equação 2)

2.2. Variabilidade Espaçotemporal (Velocidade, Salinidade, Temperatura, Profundidade)

As informações obtidas nas duas estações oceanográficas fixas foram comparadas objetivamente, avaliando as diferenças nas características estruturais de cada região (N e S) do complexo estuarino.

Desta forma, a variação temporal das estruturas verticais das propriedades foi avaliada em cada estação oceanográfica fixa e, posteriormente, foram comparadas sob três escalas diferentes de tempo:

- Semidiurna, durante ciclo completo de maré de aproximadamente 13 horas;
- Quinzenal, englobando fases de maré de quadratura e sizígia;
- Sazonal, comparando estações do ano secas e chuvosas.

Através destas comparações foi possível observar e determinar padrões de variação temporal das características hidrográficas (salinidade e temperatura) e hidrodinâmicas (velocidade, transporte e maré) dos canais estuarinos de CA e NV, durante ciclos completos de maré, em quatro condições ambientais distintas, envolvendo fases de maré e estações do ano opostas. Para esta análise, foram utilizados basicamente quatro tipos de gráficos:

- Perfis verticais, com limites fixos e variáveis; o primeiro possibilitou verificar a diferença entre intensidades ao longo da coluna d'água e entre as distintas condições hidrodinâmicas; o segundo permitiu melhor visualização da inclinação dos perfis e da simetria dos perfis de vazante em relação aos de enchente;
- Diagramas de Hovmöller ou gráficos de Isopletas linhas que representam um mesmo valor da propriedade; a partir destes gráficos foi possível visualizar a evolução das estruturas verticais ao longo tempo e também determinar se houve algum padrão cíclico na variação das propriedades;
- Gráficos de variação temporal por camada, onde as propriedades e suas variações foram analisadas em três profundidades adimensionais distintas: superfície (Z=0), meio (Z=-0.5) e fundo (Z=-0.9); este tipo de gráfico permitiu averiguar as relações de dependência em diferentes profundidades;
- Gráficos de variação temporal da espessura da coluna d'água; este último tipo possibilitou determinar não apenas os períodos de enchente, vazante e estofa, mas também a relação entre estes instantes e as características estruturais observadas; além disso, a relação entre a variação de altura da superfície livre e a de velocidade fornece informações sobre como a onda de maré se comporta ao longo do canal estuarino (progressiva ou estacionária) (Miranda *et al*, 2002).

Para a confecção das figuras, foram utilizados códigos em linguagem computacional no Matlab, desenvolvidos pelo autor, com base no programa criado por Bérgamo e Miranda (2002), adaptado por Andutta (2011).

2.3. Fenômenos Forçantes e Estabilidade da Coluna d'água

Energia Potencial e Cinética da Coluna d'água

A importância relativa da descarga fluvial em relação à maré foi determinada com o número de Richardson estuarino, Ri_e (**Eq. 3**), definido por Fischer (1976) com base em medidas semi-empíricas realizadas em laboratório:

$$Ri_{e} = \frac{g\Delta\rho_{H}Q_{f}}{\bar{\rho}u_{rmq}^{3}B}.$$
 (Equação 3)

As quantidades físicas do numerador g, $\Delta \rho_H e Q_f$ denotam a aceleração da gravidade, a diferença entre a densidade média na boca do estuário (ρ_b) menos a densidade na cabeceira do estuário (ρ_0), e a descarga fluvial, respectivamente, cujo produto representa o ganho de empuxo gerado por essa forçante, por unidade de largura (B). Por sua vez, as quantidades físicas do denominador, ρ , B e (u_{rmq})³ representam a densidade média na coluna de água, a largura do estuário e o cubo da raiz quadrática da velocidade média gerada pela maré, cujo produto representa o ganho de energia cinética. Portanto, Ri_e é a razão entre o ganho de empuxo (energia potencial) da descarga fluvial e a energia cinética da maré que tende a desestabilizar a coluna de água gerando mistura vertical.

Alternativamente, a equação acima pode ser simplificada e reescrita como:

$$Ri_{e} = \frac{g\Delta\rho_{H}hu_{f}}{\overline{\rho}u_{rmq}^{3}}, \qquad (Equação 4)$$

em que \overline{h} e u_f denotam a profundidade média da coluna d'àgua e a velocidade gerada pela descarga fluvial, respectivamente. Das equações (3) e (4) verificase que quando Ri_e é maior ou menor do que 1, o estuário é dominado pela descarga fluvial ou pela maré, respectivamente. Quando Ri_e=1, ambas as forçantes são importantes para a dinâmica do estuário (**Tabela 3**).

Ri _e	Energia dominante	Forçante dominante
< 1	Cinética	Maré
~= 1	Ambas	Ambas
> 1	Potencial	Descarga fluvial

 Tabela 3.
 Valores dos números de Richardson Estuarino e seus significados.

Ao estudar a variação de Rie para diferentes condições de maré do estuário do rio Tweed (Inglaterra) os pesquisadores Uncles e Stephens (1996) verificaram que na quadratura Rie=2,3 o estuário era dominado pela descarga fluvial, apresentando-se estratificado. Entretanto, na maré de sizígia Rie decresceu para 0,3 e o estuário tornou-se parcialmente misturado devido à mistura vertical gerada pela maré. Esse número também foi utilizado por Miranda et al. (2005) para estabelecer a importância dessas forçantes no estuário do rio Curimataú, durante a modulação quinzenal da maré associadas a variações da intensidade da descarga fluvial; na condição de alta estratificação vertical gerada pelo aumento da descarga fluvial e coincidente com maré de quadratura, ocorreu um aumento do empuxo na coluna de água e Ri_e=5,6. Entretanto, na maré de sizígia, associada ao decréscimo da descarga fluvial, o número de Richardson decresceu para 0,1 (Rie=0,1) indicando um acentuado aumento da energia cinética da maré. Durante esses eventos a classificação do estuário variou do Tipo 2b ao Tipo 2a (parcialmente misturado com alta e baixa estratificação vertical, respectivamente).

No estudo do CEC, para as descargas fluviais e velocidades associadas a elas, foram testadas diversas estimativas: velocidades residuais, vazões medidas em estações linimétricas, extrapolação a partir de comparações com rios monitorados e método indireto de Schreiber a partir de dados climatológicos. Os valores mais coerentes foram apresentados e utilizados para estabelecer a relação entre os fenômenos forçantes.

Investigação da Estrutura Interna do Estuário

A competição entre a estabilidade vertical e a mistura desempenha um papel crucial na dinâmica dos fluidos em geral e, em particular, na dinâmica estuarina: se o gradiente vertical de densidade (salinidade) opõe-se às trocas de quantidade de movimento por turbulência, um cisalhamento de velocidade extra é necessário para causar mistura (Dyer, 1997).

A mistura depende da estabilidade vertical da coluna d'água e também da quantidade de turbulência no local. Diversos mecanismos podem produzir turbulência como contornos sólidos, cisalhamento vertical das correntes horizontais, cisalhamento do vento, ondas de gravidade superficiais e internas. A intensidade da turbulência controla a distribuição vertical da concentração das propriedades da massa de água estuarina.

Neste estudo, essas características da coluna do fluido foram analisadas pelo Número de Richardson por Camada (Ri_L) (**Eq. 5**), uma alternativa para o próprio Número de Richardson, o qual apresenta variáveis mais difíceis de medir. Ri_L varia ao longo do ciclo completo de maré e compara a capacidade estabilizadora do gradiente vertical de densidade ($\partial p/\partial z$) com aquela desestabilizadora do cisalhamento de velocidade ($\partial u/\partial z$). Esse número adimensional foi definido pelo meteorologista inglês Lewis Fry Richardson em 1920 para a previsão da ocorrência de movimentos turbulentos, inicialmente na atmosfera. Nos estuários, sua expressão evoluiu para:

$$Ri_L = \frac{g \cdot h \cdot \beta \cdot \Delta S_V}{\frac{1}{u^2}}$$
, (Equação 5)

onde h=h(t) é a profundidade local, ΔS_v é a diferença entre a salinidade no fundo e na superfície, \overline{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 e Ri_L=20) foram introduzidos por Dyer (1986) para estabelecer as condições de estabilidade da coluna d'água:

- Para valores de Ri_L abaixo de 2 os processos de mistura dominam e a coluna d'água é instável;
- Entre 2 e 20, há formação de estratificação relativamente moderada e a coluna é pouco estável;
- Para valores acima de 20 os mecanismos de mistura não foram suficientes para quebrar a estratificação da coluna e há boa estabilidade.

2.4. Classificação da Zona de Mistura

Existem diversas formas de se classificar os estuários. Seguindo a linha de investigação deste trabalho, os canais norte (RCA) e sul (RPE) foram classificados de acordo com suas respectivas estratificações verticais de salinidade e suas circulações através do método conhecido como Diagrama Estratificação-Circulação de Hansen e Rattray (1965; 1966).

O primeiro passo nesta sessão consistiu em calcular os perfis médios estacionários de velocidade e salinidade. Ou seja, eliminaram-se os efeitos da maré, obtendo-se um perfil médio no tempo, durante um ciclo completo de maré. As representações gráficas destes perfis residuais são apresentadas na sessão seguinte (resultados) de uma forma comparativa, com os limites fixos para cada estação, facilitando a verificação da mudança dos valores médios destas quantidades.

Estes perfis médios de salinidade (S) e do componente longitudinal de velocidade (u) foram utilizados para calcular os parâmetros adimensionais Estratificação (p_e) e Circulação (p_c) e classificar o estuário de acordo com o diagrama de Hansen e Rattray (1966). Segundo Miranda *et al* (2002), diversos autores consideram este método o melhor para classificação estuarina. Seus fundamentos teóricos foram confirmados com a introdução de parâmetros alternativos por Fischer (1972), Prandle (1985) e Scott (1993).

O diagrama Estratificação-Circulação foi deduzido com um modelo bidimensional estacionário, lateralmente homogêneo e com seção retangular,

que simula perfis teóricos da velocidade longitudinal e da salinidade (Hansen e Rattray, 1965; 1966). O modelo resolve analiticamente um sistema composto das equações do movimento, da continuidade, da conservação de sal e de estado da água do mar linear, no plano Oxz. Com base nos perfis teóricos de u=u(x,Z) e S=S(x,Z), que se compõem dos modos baroclínico, da descarga fluvial e da tensão de cisalhamento do vento, foi possível o cálculo teórico dos parâmetros estratificação (p_e) e circulação (p_c), definidos da seguinte forma:

$$p_e = \frac{\delta S}{\overline{S}} = \frac{S_f - S_s}{\overline{S}}$$
, (Equação 6)

$$p_c = \frac{u_s}{u_f};$$
 (Equação 7)

onde δS é a diferença entre as salinidades no fundo (S_f) e na superfície (S_s), \overline{S} é a salinidade média na coluna d'água, u_s é a velocidade na superfície e u_f a velocidade gerada pela descarga fluvial.

Com base nos resultados teóricos desse modelo analítico, no trabalho subseqüente de Hansen e Rattray (1966) foi introduzido um parâmetro adimensional v (ni), que representa a proporção relativa do transporte de sal estuário acima, resultante do processo de mistura (difusão + advecção). Nesse trabalho foi também determinada teoricamente a dependência desse novo parâmetro (v) em relação aos parâmetros definidos acima, ou seja, $v=v(p_c,p_e)$, que foi também confirmado por Miranda *et al.* (2002), e é dado pela seguinte expressão:

$$\left(\frac{\delta S}{S}\right)^{-1} \left[210 + 252 \cdot \left(\frac{u_s}{u_f} - 1, 5\right)\right] v^2 + \dots$$
$$\dots + \left[32 - \left(\frac{\delta S}{S}\right)^{-1} \left(210 + 252 \cdot \left(\frac{u_s}{u_f} - 1, 5\right)\right) + 76 \left(\frac{u_s}{u_f} - 1, 5\right) + \frac{152}{3} \left(\frac{u_s}{u_f} - 1, 5\right)^2\right] v = 0$$

(Equação 8).

Essa equação é do segundo grau, incompleta na variável v e somente tem solução no campo real se for eliminada a parcela 32 do termo linear. Com essa simplificação foi possível construir uma família de curvas paramétricas de $v=v(p_c,p_e)$ (**Fig. 17**). Utilizando esse diagrama teórico e resultados experimentais de um grande número de estuários, para os quais foram calculados os parâmetros p_c e p_e , os pesquisadores estabeleceram e delimitaram as áreas para classificar quantitativamente os estuários (Hansen e Rattray ,1966).



Figura 17. Diagrama de Hansen e Rattray (1966) com as áreas delimitadas para classificação.

Como o p_e representa uma medida da estratificação vertical da coluna d'água, o valor 10⁻¹ foi adotado por conveniência para estabelecer a transição entre os tipos altamente (Tipo b) e fracamente estratificados (Tipo a) (**Fig.17**).

Segundo esses pesquisadores, os estuários podem ser classificados de acordo com o diagrama nos seguintes tipos:

- Tipo 1 O fluxo resultante (residual) é estuário abaixo em todas as profundidades, e o transporte de sal estuário acima é devido somente ao processo de difusão turbulenta;
- Tipo 2 O fluxo resultante reverte com a profundidade, e os processos advectivo e dispersivo são importantes para contribuir para o transporte de sal estuário acima;
- Tipo 3 O transporte de sal estuário acima ocorre quase que exclusivamente pelo processo advectivo;
- Tipo 4 A estratificação de salinidade é máxima e corresponde aos estuários já classificados como cunha salina.

As curvas representadas pelas isolinhas do parâmetro ν (ni) também podem ser divididos em três tipos:

- v=1 o transporte de sal estuário acima é realizado inteiramente por difusão turbulenta;
- v→0 a difusão turbulenta é desprezível em relação aos processos advectivos no transporte de sal estuário acima;
- 0 < v ≤ 1 os processos de ambas as naturezas são importantes no transporte de sal estuário acima.

2.5. Transporte Residual de Volume

Foram calculados os transportes residuais para cada campanha de 13 horas nas duas estações oceanográficas. O transporte seria calculado através das seguintes quantidades:

- Velocidade residual, considerada a média para toda a seção transversal e para todo o ciclo de maré;
- Área da seção transversal média no ponto da estação para todo o ciclo de maré.

Aplicando-as na forma simplificada da equação original, temos:

$Q(t) = \iint_A u \cdot dA$, (original),	(Equação 9)
$Q = u_a A_{m_i}$ (simplificada),	(Equação 10)

onde *u* é a velocidade (m/s), *A* é a área de seção transversal (m²), u_a é a velocidade residual (m/s) e A_m é a área média da seção transversal (m²).

Porém, por falta de informações mais detalhadas sobre as larguras e as batimetrias das seções transversais, optou-se por apresentar os transportes de volume por unidade de largura da seção transversal. Considerando, desta forma, as seguintes equações:

 $Q(t) = \int_{h} u \cdot dh$, (original), (Equação 11) Q = u_a.h_m, (simplificada), (Equação 12)

onde h é a altura (ou espessura) da coluna d'água e hm é a altura média da coluna d'água.

Estas estimativas apenas nos informaram valores aproximados e as ordens de grandeza destas quantidades em questão. Foi possível determinar

se, durante as 13 horas de coleta em cada campanha, o estuário atuou como importador ou exportador de volume d'água. Lembrando que as estações fixas foram localizadas aproximadamente no meio dos canais, os canais estuarinos foram considerados como lateralmente homogêneos. Desta forma, os comportamentos dos dois canais estuarinos foram comparados e relacionados com as atuações dos fenômenos forçantes.

2.6. Ventos

Neste estudo, foram analisados também os dados de ventos atuantes na região durante as campanhas realizadas. Com a intenção de observar como os ventos se comportaram sobre os canais estuarinos, os dados foram obtidos na estação meteorológica de superfície (**Fig. 18**), localizada em no município de CA (**Fig. 19**), integrante da Rede de Estações Automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esta estação está 2 e 20 km distante das estações oceanográficas fixas A e C, respectivamente.

As coordenadas desta estação meteorológica são:

- Latitude: 17,73° S;
- Longitude: 39,25° W;
- Altitude: 2,88 m.



Figura 18. Estação meteorológica automática de Caravelas (BA). Fonte: INMET.



Figura 19. Localização da estação meteorológica automática de Caravelas (BA). Fonte: adaptado de imagens de satélite da Google.

Procurou-se analisar o sentido e a intensidade dos ventos exatamente nos instantes das coletas oceanográficas, bem como a variação temporal destas grandezas que qualificam os vetores de velocidade do vento. Desta forma, foram apresentadas sequências de vetores, espaçados de uma em uma hora, com indicação de sentido e intensidade. Os vetores de vento aqui apresentados apontam para o sentido de destino do vento (para onde vai), e as intensidades podem ser verificadas pelos comprimentos dos vetores, escaladas no eixo das ordenadas.

Nesta sessão também foram computadas as frequências com que atuou cada grupo de ventos de mesmo sentido, a saber: E, NE, N, NW, W, SW, S e SE. Os ângulos centrais para cada grupo foram, respectivamente, 0°, 45° 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°, sendo considerados do mesmo grupo vetores com 22,5° a mais ou a menos do que o ângulo central.

As frequências de ocorrências apresentadas são referentes apenas aos períodos considerados:

- De 0 h do dia 22/08/2007 até 0 h do dia 29/08/2007;
- De 0 h do dia 16/01/2008 até as primeiras horas do dia 23/01/2008.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Dados Oceanográficos

3.1.1. Relação da densidade com salinidade e temperatura

Com o objetivo de ilustrar a relação entre estas propriedades, nesta primeira sessão são mostradas as variações temporais, para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), de temperatura, salinidade e densidade, em três profundidades adimensionais diferentes (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9).

Como exemplos bastante típicos dos resultados das quatro campanhas realizadas, são apresentados os gráficos das fases de quadratura e sizígia no inverno (agosto) para estação fixa A (**Figs. 20 e 21**), e de quadratura e sizígia no verão (janeiro) para a estação fixa C (**Figs. 22 e 23**). Foram escolhidos por serem excelentes representantes do padrão predominante nos resultados encontrados para todo o período.

Observando os valores nesses gráficos, onde as propriedades estão representadas no eixo das ordenadas Oy e o tempo no das abscissas Ox, podemos determinar que na estação A (**Figs. 20 e 21**), os valores extremos encontrados foram:

- Mínimos: Temperatura 24,3 °C; Salinidade 33,5; Densidade 22 kg/m³;
- Máximos: Temperatura 26 °C; Salinidade 36,5; Densidade 24,6 kg/m³.

Na estação A, durante fases de quadratura e sizígia e, em todos os níveis de profundidade, os dados analisados demonstraram grande semelhança entre os padrões de variação de σ_t e S. De modo geral, notou-se uma proporcionalidade praticamente direta entre estas grandezas, na qual uma flutuação na salinidade de 1 ups acarretou variação na densidade de aproximadamente 0,78 kg/m³. Entre σ_t e T, não foi possível estabelecer uma

proporção clara, pois um aumento na temperatura ora foi acompanhado por uma diminuição, ora por um aumento na densidade.



Figura 20. Estação A - variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no inverno (agosto) de 2007.



Figura 21. Estação A - variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no inverno (agosto) de 2007.

Os valores extremos encontrados para a estação C (Figs. 22 e 23) foram:

- Mínimos: Temperatura 27 °C; Salinidade 18; Densidade 9 kg/m³;
- Máximos: Temperatura 29,2 °C; Salinidade 36; Densidade 23,5 kg/m³.

Assim como para a estação A, em C, nas fases de quadratura e sizígia e, em todos os níveis de profundidade, verificou-se grande semelhança entre os padrões de variação de σ_t e S, confirmando a mesma proporcionalidade direta entre estas grandezas, de 1 ups de variação na salinidade para 0,78 kg/m³ de variação na densidade. Novamente, entre σ_t e T não foi possível



estabelecer uma proporção clara, pois um aumento na temperatura ora foi acompanhado por uma diminuição, ora por um aumento na densidade.

Figura 22. Estação C - variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no verão (janeiro) de 2008.



Figura 23. Estação C - variação temporal dos parâmetros temperatura (T), salinidade (S) e sigma-t (σ_t), em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no verão (janeiro) de 2008.

Foi possível constatar que, nas quatro condições hidrodinâmicas distintas – quadratura e sizígia no verão e quadratura e sizígia no inverno – os comportamentos das curvas que representam as variações temporais de σ_t e S foram iguais, para todas as profundidades adimensionais analisadas (superfície, meio e fundo) das duas estações oceanográficas (A e C). Já para T, constataram-se padrões de variação temporal distintos aos de σ_t . Este fato confirma a maior importância dada às variações no campo de salinidade em relação às de temperatura na influência sobre a densidade em regiões estuarinas. É importante deixar claro que isto não significa que a propriedade salinidade é mais importante que a temperatura, mas sim que as grandes variações de salinidade em regiões estuarinas exercem maior influência do que

as pequenas variações de temperatura que ocorrem nestas mesmas regiões. Consequentemente, a salinidade exerce um papel predominante sobre a temperatura nos processos hidrodinâmicos em regiões estuarinas, inclusive os que ocorrem no CEC.

3.1.2. Direção, sentido e intensidade dos vetores de velocidade

O objetivo desta sessão é ilustrar as direções, os sentidos e as intensidades das velocidades medidas. São apresentados gráficos com vetores de velocidade dentro de representações da Rosa de Correntes (**Figs. 24 e 25**), com indicações de intensidade (m/s) e direção destes vetores. Nestas figuras, os ângulos de 90º são paralelos à direção longitudinal do canal estuarino (eixo Ox) e apontam para o sentido estuário abaixo (oceano). Consequentemente, os ângulos de 270º apontam para estuário acima (cabeceira).

Como exemplo dos resultados, para a estação A, são apresentados os vetores de velocidade obtidos para diferentes profundidades da coluna d'água (superfície z=0, meio z=-0,5 e fundo z=-0,9), durante um ciclo completo de maré semidiurna da campanha realizada em fase de sizígia no mês de agosto de 2007 (**Fig. 24**). Para a estação C, são apresentados os vetores obtidos durante campanha realizada em fase de quadratura no mês de janeiro de 2008 (**Fig. 25**).

Em relação à direção e ao sentido, verificaram-se, predominantemente, ângulos de 90° e 270°. Os poucos resultados que desviam destes valores ocorreram nas proximidades do fundo e em fases de quadratura. Verificou-se que na superfície, predominam vetores com sentido estuário abaixo. O número de vetores com sentido estuário acima aumenta conforme observamos as camadas mais fundas. Notam-se também intensidades entre 0 e 1,5 m/s aproximadamente. De modo geral, as intensidades foram menores no fundo e maiores na superfície.

A partir da análise destes gráficos, nas três profundidades distintas observadas é possível confirmar a predominância do componente de

velocidade longitudinal ao canal (90º-270º) em relação ao transversal (0º-180º), durante as quatro campanhas realizadas nas duas estações fixas A e C.

Portanto, as orientações espaciais dos canais estuarinos governaram os sentidos das correntes, que foram praticamente sempre paralelos às direções longitudinais. Muito poucas exceções a este fato ocorreram próximas ao fundo e durante fases de quadratura, quando as intensidades das correntes foram menores, ou ainda, no entorno das estofas de preamar e baixamar.



Figura 24. Estação A - vetores velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no inverno (agosto) de 2007; a direção dos ângulos de 90° e 270° é paralela ao canal estuarino.



Figura 25. Estação C - vetores velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no verão (janeiro) de 2008; a direção dos ângulos de 90º e 270º é paralela ao canal estuarino.

3.1.3. Decomposição dos vetores

Fazendo a decomposição dos vetores de velocidade observados, obtiveram-se séries temporais de cada componente (longitudinal u e transversal v) ao longo dos ciclos de maré.

Novamente, a intenção aqui é mostrar a maior importância das correntes paralelas em relação às transversais (secundárias) na influência dos processos hidrodinâmicos nos canais estuarinos, e são apresentados gráficos para diferentes profundidades da coluna d'água (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9). Nesta sessão, continua-se tomando como exemplo os resultados gerados para as campanhas realizadas em fase de sizígia no mês de agosto de 2007 (**Fig. 26**) para a estação A, e em fase de quadratura no mês de janeiro de 2008 (**Fig. 27**) para a estação C.

Em ambas as estações oceanográficas (A e C), raramente o componente transversal atingiu intensidades acima de 0,05 m/s, enquanto o longitudinal chegou a atingir valores de 1,5 m/s. Os componentes longitudinais foram, aproximadamente, duas ordens de grandeza maior do que os transversais.

Tanto para a estação fixa A (**Fig. 26**) quanto para a C (**Fig. 27**), as variações de velocidade longitudinal em diferentes profundidades mostraram padrões bastante semelhantes. As de velocidade transversal não evidenciaram nenhuma semelhança entre as profundidades, dificultando a definição de um padrão de variação.

Mais uma vez, constatam-se intensidades e variações mais significativas nas velocidades longitudinais do que nas transversais. Desta forma, corroborase também a importância das velocidades longitudinais nos processos físicos que ocorrem nos estuários como transporte, estratificação, mistura e renovação das águas.


Figura 26. Estação A - componente longitudinal u (azul) e componente transversal v (vermelho) da velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de sizígia no inverno (agosto) de 2007.



Figura 27. Estação C - componente longitudinal u (azul) e componente transversal v (vermelho) da velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante fase de quadratura no verão (janeiro) de 2008.

3.2. Variabilidade Espaçotemporal

3.2.1. Velocidade

Os perfis verticais do componente longitudinal u de velocidade foram plotados de duas formas: i) gráficos com eixos das abscissas fixos nos limites de -1 m/s e 1,5 m/s (**Figs. 28 e 30**); e ii) gráficos com eixos livres (**Figs. 29 e 31**). Os primeiros permitem melhor visualização das diferenças de intensidade das correntes, enquanto os últimos evidenciam as características estruturais dos perfis, como simetria e sentido das velocidades.

Para as estações fixas A (**Figs. 28 e 29**) e C (**Figs. 30 e 31**), são apresentados os vinte e seis perfis verticais obtidos para cada uma das quatro campanhas realizadas (quadratura e sizígia de agosto de 2007 e quadratura e sizígia de verão de 2008).

Primeiramente, são descritos e analisados os resultados individualmente de cada estação fixa, mencionando as respectivas particularidades. Em seguida, com a ajuda de diferentes tipos de gráficos, são elucidadas objetivamente as diferenças encontradas entre as estações.

Estação A

- Intensidades máximas e mínimas: Durante ambas as épocas do ano (inverno e verão), na estação fixa A, o módulo das velocidades extremas passou de aproximadamente 0,5 m/s na quadratura (Figs. 28a e 28c), para 1 a 1,5 m/s na sizígia (Figs. 28b e 28d). Em grande parte do tempo, as intensidades máximas foram observadas na superfície e diminuíram ao longo da coluna d'água.
- Inclinação e simetria dos perfis: Os perfis tendem a ser mais inclinados (horizontais) e assimétricos nas fases de quadratura (Figs. 29a e 29c). Assumem posições mais verticais e apresentam maior simetria nas fases de sizígia (Figs. 29b e 29d). Em todas as situações, nota-se um forçamento de inclinação na região mais próxima ao fundo, devido à

imposição da condição de atrito máximo no fundo, forçando velocidade nula neste.

 Circulação estuarina clássica: observada nitidamente em quadraturas (Figs. 29a e 29c), com diversos perfis cruzando o eixo Oy (u=0). Isto se deve ao componente baroclínico da força do gradiente de pressão, mais evidente em quadratura e no entorno das estofas. Durante as sizígias (Figs. 29b e 29d), em pouquíssimos momentos verifica-se a circulação estuarina clássica.



Figura 28. Estação A - perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Limites fixos de velocidade.



Figura 29. Estação A - perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Sem limites fixos de velocidade.

Estação C

- Intensidades Máximas e Mínimas: Na estação fixa C, o módulo das velocidades extremas também passou de cerca de 0,5 m/s, na quadratura (Figs. 30a e 30c), para 1 a 1,5 m/s na sizígia (Figs. 30b e 30d). Novamente, durante a maior parte do tempo, as intensidades máximas foram observadas na superfície e diminuíram ao longo da coluna d'água.
- Inclinação e simetria dos perfis: As mesmas observações feitas sobre os perfis verticais para a estação A também podem ser consideradas para a C. Novamente, nota-se um forçamento de inclinação na região mais

próxima ao fundo, devido à imposição da condição de atrito máximo no fundo, forçando velocidade nula neste.

Circulação estuarina clássica: Observada nitidamente em quadratura (Figs. 31a e 31c), com diversos perfis cruzando o eixo Oy (u=0). Em sizígia (Figs. 31b e 31d), muito menos perfis cruzam o eixo Oy, ocorrendo principalmente nos instantes próximos às estofas.



Figura 30. Estação C - perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Limites fixos de velocidade.



Figura 31. Estação C - perfis verticais do componente longitudinal u da velocidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão. Sem limites fixos de velocidade.

Tanto para a estação A quanto para a C, foi possível notar que os perfis verticais de velocidade sofrem maiores alterações de intensidade e estrutura nas transições entre fases da maré (quadratura (a e c) para sizígia (b e d) e vice-versa) do que nas transições entre estações (inverno (a e b) para verão (c e d) e vice-versa).

Como esperado, notou-se uma significativa diferença nas configurações dos perfis verticais gerados na quadratura em relação aos da sizígia, mostrando a influência da maré em diferentes fases da Lua. Nas quadraturas, houve uma notável assimetria dos movimentos, com muitos perfis de velocidade na enchente apresentando velocidades maiores no fundo do que na superfície, evidenciando a influência do efeito baroclínico. Nas sizígias, as maiores amplitudes de maré e o maior efeito barotrópico fizeram com que as velocidades atingissem valores mais altos ao longo de toda a coluna d'água, mascarando o efeito baroclínico que, por sua vez, fica mais evidente no entorno das estofas. Apesar das diferentes intensidades máximas de enchente e de vazante, os perfis de sizígia apresentaram menor assimetria na configuração em relação aos perfis da quadratura.

Adicionalmente, evidenciaram-se mudanças relevantes na circulação do corpo estuarino durante esta transição de fases. Em quadratura, nota-se nos gráficos uma quantidade maior de perfis verticais que cruzam o eixo Oy (u=0), indicando inversão de sentido das correntes ao longo da coluna d'água devido à maior influência do efeito baroclínico. Já na fase de sizígia, a forçante barotrópica (gerada pela maré) mascara este efeito baroclínico e os perfis tendem a assumir direções mais perpendiculares ao eixo das abscissas, indicando que as correntes tem o mesmo sentido ao longo da coluna d'água.

Comparação entre as estações fixas A e C

Principais características:

- Inclinação dos perfis: configurações muito semelhantes entre as estações fixas para as quatro épocas distintas. Características durante sizígias de inverno (2007) e verão (2008) muito parecidas, com intervalos de velocidade iguais, orientações dos perfis bastante semelhantes. Os perfis da estação C demonstrando uma leve e notável influência da descarga fluvial nas camadas superiores, declinando a porção superior dos perfis sentido estuário abaixo (Fig. 32).
- Simetria enchente-vazante: de modo geral, as duas estações fixas apresentaram estruturas verticais de velocidade horizontal com simetrias bem semelhantes entre si, com características mais assimétricas durante as quadraturas e mais simétricas durante as sizígias. De modo geral, em ambas as estações fixas, os perfis de vazante apresentaram intensidades maiores do que nas de enchente (Fig. 32).

 Cruzamento do zero: Para ambas as estações fixas, perfis que cruzam o eixo Oy (u=o) apareceram predominantemente nas fases de quadratura das duas estações do ano, com raras aparições durante fases de sizígia, devido ao fato de o efeito baroclínico ficar mais evidente em quadraturas e no entorno das estofas (Fig. 32).

Os resultados mostram que as ambas as estações sofrem influência dos mesmos fenômenos físicos. A época do ano e a fase da maré influenciam, de maneira igual, as duas desembocaduras do CEC. Velocidades de enchente e vazante são semelhantes em fases de sizígia, evidenciando correntes uniformes ao longo da coluna d'água que apontam pro mesmo sentido e com mesma intensidade. Nas quadraturas, observam-se determinados períodos do ciclo de maré onde coexistem correntes que apontam para sentido opostos, geralmente sentido estuário abaixo nas camadas superiores, influenciadas pela descarga fluvial, e sentido estuário acima nas camadas inferiores, com influências maiores da advecção baroclínica.

As intensidades das correntes de vazante são maiores do que de enchente devido a dois possíveis motivos: descarga fluvial e batimetria do próprio canal, que favorecem o escoamento sentido estuário abaixo (oceano).



Componente Longitudinal da Velocidade (m/s)

Figura 32. Comparação entre os perfis verticais de velocidade longitudinal obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008).

Através de Diagramas de Hovmoller ou gráfico de isopletas, são apresentadas as evoluções temporais das estruturas verticais de velocidade. As orientações das isopletas - isolinhas - possibilitam enxergar os perfis de velocidade passando através das estações fixas, e estão adicionadas às curvas de variação do nível d'água durante cada ciclo completo de maré. O eixo Oy indica a altura da coluna d'água (com origem no fundo) e o eixo Ox representa o tempo (**Fig. 33**).



Figura 33. Diagramas de Hovmöller - comparação entre as evoluções temporais das isopletas de velocidade longitudinal obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008).

As duas estações fixas demonstraram padrões de evolução temporal das isopletas bastante semelhantes (**Fig. 33**). Lembrando que as observações foram realizadas simultaneamente, nota-se que as correntes nestes canais estuarinos são governadas pelos mesmos fenômenos forçantes. Em ambas, grande parte das isopletas de velocidade apresenta-se orientada verticalmente durante fase de maré de sizígia. Nas quadraturas é possível verificar diversas isopletas inclinadas, acentuadas nos períodos de inversão da curva de variação do nível d'água (estofas de enchente e vazante). A onda de maré e as correntes a ela associadas são bastante evidenciadas pelos resultados obtidos.

De modo geral, nos momentos de estofas – inversão da curva de maré – verificou-se uma maior declinação das isopletas pela presença da descarga fluvial nas camadas superficiais e da advecção baroclínica nas camadas próximas ao fundo (**Fig. 33**). No meio dos períodos de enchente e vazante, as frentes apresentaram-se orientadas mais verticalmente, onde as correntes

apresentaram intensidades maiores e uniformes ao longo da coluna d'água. Na maioria das condições, as inversões na curva de nível da superfície foram seguidas de inversões nos sentidos das correntes, com algumas situações em que estas últimas é que antecederam as primeiras.

Analisando-se individualmente três níveis profundidade os de considerados (superfície Z=0, meio Z=-0.5, fundo Z=-0.9), tanto na estação fixa A quanto na C (Fig. 34), podemos verificar ainda que as velocidades em profundidades distintas durante fases de quadratura variam diferentemente durante o ciclo de maré. Nestas fases, as velocidades ao longo da coluna d'água apresentaram maior cisalhamento e as camadas movimentaram-se de maneira mais independente uma da outra, com velocidades diferentes. Desta forma, as diferentes camadas sofrem inversão de sentido das correntes em diferentes instantes, o que implica que uma aparente calmaria observada na superfície nem sempre representa uma estofa de maré, pois a camada inferior pode ainda estar em movimento e causar variação na altura da superfície do estuário.



Figura 34. Estação A e C – variação temporal de velocidade longitudinal u, em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as fases de quadratura e sizígia no inverno (agosto de 2007), e quadratura e sizígia no verão (janeiro de 2008).

Já na fase de sizígia, há um menor cisalhamento vertical das velocidades horizontais, e os resultados mostram concordância entre as camadas em relação aos instantes de inversão, ou seja, as velocidades em diferentes profundidades invertem os sentidos praticamente no mesmo instante, e a aparente calmaria na superfície pode representar a condição de estofa de maré para toda a coluna d'água (**Fig. 34**).

Com os dados do componente longitudinal da velocidade em níveis distintos de profundidade, novamente são evidenciados comportamentos iguais

das estações fixas A e C (**Fig. 34**), e confirmam-se as atuações das mesmas forçantes sobre os dois canais estuarinos.

3.2.2. Salinidade

Nesta sessão, são apresentados e discutidos os resultados das análises dos dados de salinidade para as estações fixas A (**Fig. 35**) e C (**Fig. 36**), com os vinte e seis perfis verticais obtidos de meia em meia hora durante 13 horas, para cada uma das quatro campanhas realizadas (quadratura e sizígia de agosto de 2007 e quadratura e sizígia de verão de 2008).

Novamente, são descritos e analisados os resultados individualmente de cada estação fixa, mencionando as respectivas particularidades e, em seguida, com a ajuda de diferentes tipos de gráficos, são elucidadas objetivamente as diferenças encontradas entre as estações.

Os valores extremos observados em cada estação foram:

- Estação A: 32 a 36,5;
- Estação C: 17 a 37.

Ambas as estações fixas apresentaram, nas quadraturas de inverno e verão (*a* e *c*), perfis mais inclinados, mostrando maior gradiente vertical de salinidade na coluna d'água. Verifica-se também nestas fases que os menores valores foram observados na superfície, influenciada pela água doce da descarga fluvial, que tende a fluir por cima da água salgada, diluindo as camadas superiores. Nas fases de sizígia (*b* e *d*), os perfis apresentaram orientação praticamente vertical, com alguns poucos declinando na porção superficial devido à influência da descarga fluvial.



Figura 35. Estação A - perfis verticais de salinidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão.



Figura 36. Estação C - perfis verticais de salinidade, durante um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão.

Nas duas estações fixas, os gradientes verticais foram mais evidentes em quadratura (*a* e *c*), e os gradientes horizontais mais destacados em sizígia (*b* e *d*). Durante as fases de quadratura, notaram-se formações de haloclinas. Porém, em A (**Fig. 35**), o maior gradiente vertical encontrado foi em torno de 3 unidades de salinidade entre a superfície e o fundo enquanto que em C (**Fig. 36**), esse gradiente sobe para valores entre 10 e 15 unidades.

Assim como para a velocidade, em ambas as estações fixas A e C, os perfis verticais de salinidade apresentaram diferenças entre os resultados obtidos em fase de quadratura (a e c) e sizígia (b e d). Entre períodos de inverno (agosto) 2007 (a e b) e verão (janeiro) 2008 (c e d), também há mudanças significativas nas configurações dos campos de salinidade.

De modo geral, nas duas estações A e C, os perfis de salinidade apresentaram-se relativamente mais inclinados durante a quadratura do que na sizígia, demonstrando uma transição de maior (haloclinas mais intensas) para menor (haloclinas menos intensas) gradiente vertical de salinidade entre essas fases. As haloclinas existentes em fase de quadratura são erodidas na fase de sizígia, devido ao processo de mistura vertical na coluna d'água, provocada pela maior difusão turbulenta da maré com as velocidades mais intensas.

Durante sizígia, as salinidades apresentaram-se independentes da profundidade, podendo-se inferir menor estabilidade da coluna de água em relação aos resultados da quadratura e maior transporte vertical de concentrações de substâncias das camadas mais profundas para a zona eufótica.

Comparação entre as estações fixas A e C

Como já citado na análise acima, as estruturas e os comportamentos dos perfis verticais de salinidade nas duas estações fixas (**Fig. 37**) possuem padrões semelhantes. A verticalização destes perfis em fases de sizígia denuncia a erosão da haloclina existente na quadratura, devido à maior mistura vertical ao longo da coluna. Esta mistura foi causada pela expressiva maior presença da difusão turbulenta que, por sua vez, foi gerada pelo atrito das correntes mais intensas com os limites do canal (fundos e laterais). Já em quadraturas, notam-se maiores declinações dos perfis, mostrando a atuação da descarga fluvial nas camadas superiores, diminuindo os valores de salinidade e gerando gradientes verticais consideráveis. A maior descarga fluvial atuante na porção sul do complexo é evidenciada nessa análise.

Em ambas as estações, o intervalo de variação foi bem maior na superfície do que no fundo durante quadratura. Em sizígia, a variação no fundo e na superfície foi a mesma (**Fig. 37**).

Porém, os gradientes verticais de salinidade foram notavelmente maiores na estação fixa C (atingindo 15 unidades entre superfície e fundo) do que na A (máximo de 5 unidades entre superfície e fundo), indicando novamente uma maior influência da descarga fluvial na região sul do complexo.

Outro ponto interessante foi constatado durante a quadratura de inverno, quando a estação A apresentou uma haloclina existente sob uma camada de mistura superficial, enquanto que na estação C a haloclina ocorre já a partir da superfície (**Fig. 37**).

Apesar da maior proximidade entre a estação C e o oceano, as médias de salinidade nesta estação foram menores do que as encontradas para a estação A, relativamente mais distante.



SALINIDADE (ups)

Figura 37. Comparação entre os perfis verticais de salinidade obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008).

Novamente utilizando diagramas de Hovmöller, são apresentadas as evoluções temporais das estruturas verticais de salinidade (**Fig. 38**). Nestas figuras, estão representadas as isohalinas, e estão adicionadas às curvas de variação do nível d'água durante o respectivo ciclo completo de maré.

Verifica-se também para a salinidade que os padrões de variação temporal dos perfis verticais foram muito semelhantes entre as duas estações fixas (**Fig. 38**). Em ambas, grande parte das frentes de salinidade apresentouse orientada verticalmente durante fase de maré de sizígia. Nas quadraturas foi possível verificar diversos perfis inclinados, acentuados nos períodos de inversão na curva de variação do nível d'água (estofas de enchente e vazante), chegando a forçar orientações horizontais. Novamente, a onda de maré e as salinidades a ela associadas são bastante evidenciadas pelos resultados obtidos.



Figura 38. Diagramas de Hovmöller - comparação entre as evoluções temporais das isopletas de salinidade obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008).

De modo geral, nos momentos de estofas – inversão da curva de maré – verificou-se uma maior declinação das isopletas de salinidade (**Fig. 38**) por causa da presença da descarga fluvial nas camadas superficiais e da advecção baroclínica nas camadas próximas ao fundo, criando o gradiente vertical. No meio dos períodos de enchente ou vazante, as isopletas apresentaram-se orientadas mais verticalmente, onde as correntes apresentaram intensidades maiores e uniformes ao longo da coluna d'água, provocando o processo de mistura vertical. Na maioria das condições, as estofas foram antecedidas pelos instantes em que se forma e evidencia uma maior estratificação vertical.

Comparando-se a variação dos valores de salinidade em diferentes profundidades para as duas estações fixas (**Fig. 39**), confirma-se que, em fase de quadratura, os valores superficiais foram sempre menores do que aqueles observados em pontos mais profundos e, além disso, a variação em superfície também foi maior do que no meio e no fundo da coluna d'água. Já em sizígia, os valores são praticamente os mesmos nas diferentes profundidades analisadas e variaram na mesma proporção. Isto ocorre devido a uma alternância de condições físicas no estuário, onde passa de uma coluna d'água estratificada na quadratura para uma bem misturada na sizígia, indicando aumento do fenômeno da difusão turbulenta gerado pelo aumento das intensidades das correntes.



Figura 39. Estação A e C – variação temporal de salinidade, em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as fases de quadratura e sizígia no inverno (agosto de 2007), e quadratura e sizígia no verão (janeiro de 2008).

3.2.3. <u>Temperatura</u>

Esta sessão contempla, de forma objetiva, os resultados obtidos a partir da observação de temperatura nas estações fixas A e C. Da mesma forma que foram apresentados e discutidos os resultados para velocidade longitudinal e salinidade, os de temperatura são descritos e discutidos a partir de três tipos de gráficos. Os perfis verticais (Fig. 40) auxiliam na avaliação de estrutura e valores extremos e características como gradientes. As isopletas representadas nos diagramas de Hovmöller (Fig. 41) ilustram a evolução temporal dos perfis verticais, evidenciando regiões e instantes de maior gradiente e a relação com a variação de maré. No terceiro tipo, as variações de temperatura em profundidades adimensionais distintas (superfície z=0, meio z=-0.5 e fundo z=-0.9) (Fig. 42) são analisadas em relação à variação da maré.

Os valores extremos observados em cada estação foram:

- Estação A: 24ºC a 29ºC;
- Estação C 24ºC a 29º C.

Praticamente todos os perfis de temperatura (**Fig. 40**) apresentaram pequena estratificação vertical nas fases de quadraturas, principalmente próximo à superfície.

Em ambas as estações, a temperatura apresentou variações temporais pouco maiores na superfície do que no meio e no fundo da coluna d'água. Os valores extremos nas estações fixas A e C apresentaram-se muito semelhantes, no inverno variando entre 24°C e 26°C, e no verão entre 27°C e 29°C, com orientações verticais em praticamente todos os perfis (**Fig. 40**).



TEMPERATURA (°C)

Figura 40. Comparação entre os perfis verticais de temperatura obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008).

O principal resultado que se percebe nos dados de temperatura, para as duas estações fixas A e C, é o aquecimento de aproximadamente 3 °C das águas na época de verão em relação ao inverno (**Fig. 40**). Já entre as fases de quadratura e sizígia, não há alteração significativa, tanto no inverno quanto no verão.

De forma geral, a temperatura variou por volta de 1 °C ao longo de cada ciclo completo de maré, de aproximadamente 13 horas, com algumas exceções onde foi possível observar variações de quase 2 °C durante o ciclo.

Um fato que chama atenção ocorre na fase de quadratura de verão de 2008, onde os perfis verticais nitidamente sofrem influência, em sua porção

superficial, de águas com temperaturas um pouco mais altas em ambas as estações fixas (**Fig. 40**). Nesta condição de quadratura, observa-se evidentemente, através dos dados de velocidade e salinidade, uma maior influência da descarga fluvial nas camadas superiores. Combinando estas informações, podemos deduzir que as águas da descarga fluvial provindas da drenagem continental influenciam também as estruturas de temperatura, principalmente no período de verão, quando as águas dos rios apresentam temperaturas maiores.

As isotermas apresentadas em Diagramas de Hovmoller também ilustram a evolução temporal das estruturas verticais de temperatura observadas nas estações fixas, e estão adicionadas às curvas de variação do nível d'água durante o ciclo completo de maré (**Fig. 41**).



Figura 41. Diagramas de Hovmöller - comparação entre as evoluções temporais das isopletas de temperatura obtidos para as estações fixas A e C, durante as quatro campanhas consideradas (quadratura e sizígia de inverno de 2007; quadratura e sizígia de verão de 2008).

O padrão de variação temporal dos perfis de temperatura (**Fig. 41**) mostra que, em ambas as estações fixas, grande parte das frentes de temperatura chega orientada verticalmente durante fase de maré de sizígia, com alguns poucos declinados e orientados mais horizontalmente. Nas quadraturas, é possível verificar um número maior de perfis inclinados e horizontais, acentuados nos instantes próximos a inversões na curva de variação do nível d'água (estofas de enchente e vazante). Porém, todas as variações verticais de temperatura observadas são desprezíveis - em torno de 0,5 °C – e, portanto, a temperatura pode ser considerada praticamente constante ao longo da coluna d'água.

De modo geral, nos momentos de estofas – inversão da curva de maré – verificou-se uma leve declinação das frentes de temperatura, novamente pela ausência da difusão turbulenta causada pelas correntes de maré, adicionada às presenças da descarga fluvial nas camadas superficiais e da advecção baroclínica nas camadas próximas ao fundo. No meio dos períodos de enchente e vazante, as frentes apresentaram-se orientadas mais verticalmente, onde as correntes apresentaram intensidades maiores e uniformes ao longo da coluna d'água, provocando o processo de mistura vertical. Na maioria das condições, as estofas foram seguidas pelas formações de estratificação vertical (**Fig. 41**).

Comparando-se a variação dos valores de temperatura em diferentes profundidades para as duas estações (**Fig. 42**), nota-se que, em fase de quadratura, os valores superficiais são sempre menores que aqueles em pontos mais profundos e, além disso, a variação em superfície é maior do que no meio e no fundo da coluna d'água. Já em sizígia, os valores são praticamente os mesmos ao longo das profundidades e variam de forma praticamente igual. Isto ocorre devido a uma alternância de condições físicas no estuário, onde passa de uma coluna d'água relativamente estratificada na quadratura para uma bem misturada na sizígia, indicando aumento do fenômeno da difusão turbulenta gerado pelo aumento das intensidades das correntes.

De forma geral, as estações fixas A e C mostraram variações de temperatura em diferentes camadas com padrões bastante semelhantes durante as campanhas realizadas, com exceção do período de quadratura no inverno, quando o padrão de A apresentou-se bastante distinto do de C (**Fig. 42**).



Figura 42. Estação A e C – variação temporal de temperatura, em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as fases de quadratura e sizígia no inverno (agosto de 2007), e quadratura e sizígia no verão (janeiro de 2008).

3.2.4. Profundidade

Os resultados da análise dos dados de profundidades são apresentados nesta sessão. Primeiramente, foram analisadas e comparadas apenas as próprias curvas de variação em A e C (**Fig. 43**). Em seguida, estas foram sobrepostas às curvas de variação das propriedades anteriormente descritas – velocidade, salinidade e temperatura – em três níveis de profundidades adimensionais (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9).

Considerando todas as campanhas, os valores extremos encontrados foram:

- Estação A: 10 m a 13,3 m;
- Estação C: 5 m a 11 m.

A profundidade média e a variação de altura da maré observadas em cada campanha (**Fig. 43**) foram respectivamente:

Estação A

- Quadratura de inverno: 12,8 m e 0,7 m;
- Sizígia de inverno: 11,5 m e 3,1m;
- Quadratura de verão: 12,3 m e 1,2 m;
- Sizígia de verão: 12,2 m e 2,2 m.

Estação C

- Quadratura de inverno: 7,4 m e 0,9 m;
- Sizígia de inverno: 7 m e 4 m;
- Quadratura de verão: 9,3 m e 1,2 m;
- Sizígia de verão: 9,5 m e 2,6 m.



Figura 43. Variações temporais das profundidades nas estações fixas A e C, localizadas nos canais estuarinos do RCA e do RPE.

As estofas da maré ocorreram nos seguintes horários:

- Quadratura de inverno: de enchente em A e C às 14h; de vazante em A e C às 20h;
- Sizígia de inverno: de enchente em A às 6h30 e em C às 5h30; de vazante em A às 13h e em C às 11h30;
- Quadratura de verão: de enchente em A às 10h30 e em C às 11h; de vazante em A às 16h30 e em C às 17h;
- Sizígia de verão: de enchente em A às 4h30 e em C às 5h30; de vazante em A às 10h30 e em C às 11h30.

Em A, a profundidade variou em torno de 12 m tanto no inverno quanto no verão. Em C, passou de aproximadamente 7,2 m no inverno para aproximadamente 9,4 m no verão (**Fig. 43**). Apesar dessa diferença, a variação de altura em C foi sempre maior ou igual à variação em A. Provavelmente este fato está ligado à diferença na forma geométrica dos canais estuarinos e no maior de volume de água doce represada pela maré, elevando ainda mais o nível d'água.

Analisando-se as variações temporais de velocidade longitudinal nas três profundidades adimensionais consideradas (**Fig. 44**), nota-se que:

Inverno

Na estação A, os picos de velocidade coincidem com os picos da altura da maré. Este fato está relacionado com o tipo de onda com a qual a onda de maré se propaga. A concordância de fase entre as velocidades e a da altura de maré é decorrência do comportamento da onda como do tipo progressiva.

Em C, os picos de altura antecedem os de velocidade em aproximadamente 2h, demonstrando comportamento típico de onda estacionária ou mista.

Verão

Nas duas estações, novamente foram observados comportamentos de onda do tipo estacionária, onde as velocidades apresentam uma defasagem de fase de 2 horas em relação à variação da altura da maré, ou seja, os picos de velocidade encontram-se nos instantes de nível médio da maré (variação nula) e os extremos de altura (estofas) ocorrem quando a velocidade média é zero (instante de inversão).

A onda de maré mostra, na maior parte do tempo, comportamentos de onda estacionária nos dois canais estuarinos, com alguns períodos apresentando características de onda progressiva.



VELOCIDADE - Componente Longitudinal (m/s) - superfície (- - -); meio (----); fundo (-----) x

Figura 44. Estação A e C – variações temporais do componente longitudinal de velocidade em diferentes profundidades (superfície Z=0, meio Z=-0,5 e fundo Z=-0,9) sobrepostas às curvas de variação do nível da superfície livre (azul), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), nas quatro campanhas, de cima pra baixo: quadratura de inverno; sizígia de inverno; quadratura de verão; sizígia de verão.

Analisando as salinidades em diferentes profundidades em relação à curva de variação da maré, observam-se comportamentos semelhantes, com pequenas diferenças de fase (**Fig. 45**).

Para o inverno nas duas estações A e C (**Fig. 45**), o comportamento geral da salinidade nas diferentes camadas mostrou picos de salinidade adiantados em relação aos da maré em 1 h a 2h30, com exceção da estação C em fase de sizígia, onde todos os picos ocorreram praticamente no mesmo instante. Os picos de salinidade ocorrem em torno dos instantes em que a variação da altura da superfície livre é zero, ou seja, no nível médio do canal

estuarino. Exceção à sizígia na estação C, com picos coincidentes de salinidade e altura de maré, confirmando os resultados de velocidade média.

Contudo, no verão para as duas estações A e C (**Fig. 45**), os picos de salinidade média coincidem com os picos de altura de maré. Os valores máximos corresponderam aos instantes de máxima intrusão da maré, e os mínimos, aos de máximo recuo da maré.



Figura 45. Estação A e C – variações temporais da salinidade em diferentes profundidades adimensionais e do nível médio da superfície livre (azul), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: quadratura de inverno; sizígia de inverno; quadratura de verão; sizígia de verão.

Analisando a estrutura térmica para o inverno nas duas estações A e C (**Fig. 46**), o comportamento geral da temperatura nas diferentes camadas não mostrou de forma evidente uma relação entre a variação de temperatura e de nível da superfície. Em quadratura, os máximos de temperatura ocorreram nos

instantes próximos aos máximos de superfície livre, enquanto que na sizígia, os máximos ocorreram nos instantes próximos aos mínimos de superfície livre.

No verão, durante quadratura e sizígia em ambos os canais estuarinos, os máximos (mínimos) de temperatura coincidiram com os mínimos (máximos) da superfície livre (**Fig. 46**).

Nem sempre, maiores variações de altura da maré (sizígias) implicaram em maiores variações de temperatura, mostrando padrão de relação não tão nítido entre esta propriedade e as características da massa d'água estuarina. Os resultados deste estudo mostram que geralmente as águas da drenagem continental são levemente mais quentes do que as do oceano adjacente.



Figura 46. Estação A e C – variações temporais de temperatura em diferentes profundidades adimensionais e do nível médio da superfície livre (azul), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), para as quatro campanhas: quadratura de inverno; sizígia de inverno; quadratura de verão; sizígia de verão.

3.3. Fenômenos Forçantes e Estabilidade da Coluna d'água

Fenômenos Forçantes

Inicialmente descrevem-se os valores de Ri_e, destacando-se os principais fenômenos forçantes que dominaram a hidrodinâmica em cada canal. Em seguida, apresentam-se os gráficos de variação temporal de Ri_L, durante os ciclos de maré semidiurna das quatro campanhas (**Figs. 47 e 48**), caracterizando a estabilidade vertical da coluna d'água.

Os valores encontrados para o Número de Richardson Estuarino foram:

Estação A

- Quadratura de inverno: 0,49;
- Sizígia de inverno: 0,003;
- Quadratura de verão: 0,4;
- Sizígia de verão: 0,06.

Em todas as condições, a hidrodinâmica estuarina foi dominada principalmente pela maré, com grande destaque nas sizígias. Nas quadraturas, a descarga fluvial teve papel pouco mais relevante, mas ainda secundário.

Estação C

- Quadratura de inverno: 0,86;
- Sizígia de inverno: 0,07;
- Quadratura de verão: 0,87;
- Sizígia de verão: 0,04.

Novamente, em todas as condições, a hidrodinâmica estuarina foi dominada principalmente pela maré, com grande destaque nas sizígias. Nas

quadraturas, a descarga fluvial teve papel bem relevante, chegando a se aproximar da importância do papel da maré.

Comparação entre as estações A e C

Verificou-se que, em ambos os canais, os processos de mistura e estratificação foram regulados principalmente pela modulação da maré, com a descarga fluvial desempenhando papel ligeiramente relevante durante as fases de quadraturas.

Como visto anteriormente, a variação da maré é a mesma nos dois canais. Porém, a influência da descarga fluvial sobre os processos hidrodinâmicos foi mais evidente durante quadraturas na estação C, devido ao maior aporte de água doce pelo RPR. Apesar da pequena diferença entre as vazões dos rios Caravelas e Peruípe, é possível perceber processos físicos relativamente distintos decorrentes das diferentes estruturas de velocidade e salinidade.

Investigada pela análise do número de Richardson por Camadas Ri_L, a estabilidade da coluna d'água mostrou grandes variações ao longo dos ciclos completos de maré (**Figs. 47 e 48**). Os valores extremos de Ri_L encontrados para os dois canais estuarinos foram da mesma ordem de grandeza, com mínimos e máximos das ordens de -2 e 5, respectivamente.



Figura 47. Estação A – variação temporal do Número de Richardson por Camada (RiL), para ciclos completos de maré semidiurna (~13 horas), durante as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão.


Figura 48. Estação C – variação temporal do Número de Richardson por Camada (RiL), para ciclos completos de maré semidiurna (~13 horas), durante as quatro campanhas: a) quadratura de inverno; b) sizígia de inverno; c) quadratura de verão; d) sizígia de verão.

As variações temporais de Ri_{L} nas estações A (**Fig.47**) e C (**Fig.48**) foram as seguintes:

- Quadratura de inverno: Em ambas as estações fixas A e C o valor foi acima de 20 praticamente todo tempo, ou seja, os mecanismos de mistura não foram suficientes para quebrar a estratificação da coluna;
- Sizígia de inverno: Em A, encontraram-se valores abaixo de 2 principalmente, com poucos instantes apresentando valores entre 2 e 20; Em C, também foram abaixo de 2 na maior parte do tempo, porém com estimativas significativas entre 2 e 20, atingindo também valores

acima de 20. Nestes casos, os processos de mistura dominaram na maior parte do tempo, mas houve formação de estratificação relativamente moderada em torno dos instantes de estofa de maré;

- Quadratura de verão: A estação A apresentou Ri_L variando entre 2 e 20 em praticamente 50% do ciclo de maré, e nos outros 50% os valores foram acima de 20. Já em C, Ri_L foi acima de 20 durante quase todo o ciclo, ou seja, os mecanismos de mistura não foram suficientes para quebrar a estratificação da coluna;
- Sizígia de verão: Estações A e C com predomínio de valores abaixo de 2, ou seja, os processos de mistura dominaram na maior parte do tempo, mas houve formação de estratificação relativamente moderada em torno do instante de estofa de maré.

Os padrões de variação do Ri_L apresentados para as duas estações oceanográficas são extremamente semelhantes, no que concerne aos instantes de aumento e diminuição. As ordens de grandeza dos valores do número adimensional em questão também foram muito parecidas ao longo do tempo, com apenas alguns momentos em que a estação C apresentou valores maiores, chegando a estar uma ordem de grandeza maior. Este fato evidencia a semelhança nas características de estabilidade apresentadas pelos dois canais. Porém, os instantes com diferenças entre as ordens de grandeza mostram influência significativa da maior descarga fluvial que atinge a parte sul do complexo. Isto significa que as estruturas de salinidade dos canais sofrem as mesmas alterações, nas suas devidas proporções, ao longo do ciclo de maré, nas quatro condições investigadas.

3.4. Classificação da Zona de Mistura

Este capítulo apresenta três tipos de figura que ilustram as classificações e as caracterizações dos canais em relação à circulação e à estratificação. O primeiro tipo contém os perfis verticais chamados de estacionários ou residuais (**Figs. 49 e 50**), os quais desconsideram as variações temporais dos perfis verticais durante um ciclo completo de maré, consistindo em perfis médios no tempo em questão. Para classificação, a seguir são apresentados os perfis residuais de velocidade (**Fig.49**) e salinidade (**Fig.50**).

O segundo tipo é o próprio diagrama de circulação-estratificação proposto por Hansen e Rattray (**Figs. 51 e 52**), com a localização dos parâmetros p_c e p_e , possibilitando a classificação. O terceiro tipo é o mesmo diagrama, porém com destaque ao parâmetro ν (ni) calculado (**Figs. 53 e 54**).

Ambas as estações A e C foram classificadas em todas as campanhas realizadas, ou seja, em quatro situações distintas (quadratura e sizígia de inverno, quadratura e sizígia de verão).

Na estação A, a velocidade residual foi sentido estuário acima em três períodos (quadratura inverno, quadratura verão e sizígia verão), com -0,003 m/s, -0,012 m/s e -0,003 m/s respectivamente (**Fig. 49 - esquerda**). Em sizígia de inverno, foi estuário abaixo, com 0,036 m/s. Todos os perfis residuais cruzam o eixo Oy (u=0), apresentando circulação estuarina clássica. Em quadratura e sizígia de inverno, e quadratura e sizígia de verão, as correntes invertem de sentido nas profundidades adimensionais -0.5, -0.7, -0.4 e -0.4, respectivamente. Notou-se uma distinção no perfil residual de quadratura de inverno, no qual a velocidade aumenta da superfície até a profundidade adimensional de Z=-0,3, onde se observa o valor máximo.

Diferentemente, na estação C, a velocidade residual foi positiva em todas as quatro campanhas (quadratura e sizígia inverno, quadratura e sizígia verão), com 0,059 m/s, 0,109 m/s, 0,098 m/s e 0,096 m/s respectivamente (**Fig.**

49 - direita). Apenas o perfil residual durante a quadratura de verão apresentou inversão das correntes ao longo da coluna d'água, cruzando o eixo Oy (u=0) na profundidade adimensional de -0.7. Para os outros três períodos (quadratura de inverno, sizígia de inverno e sizígia de verão), os perfis residuais indicaram correntes apontando apenas sentido estuário abaixo.



Figura 49. Estações A (esquerda) e C (direita) – perfis residuais do componente longitudinal de velocidade (linha fina) e velocidades residuais (linha grossa), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as quatro campanhas: de cima pra baixo, quadratura de inverno, sizígia de inverno, quadratura de verão e sizígia de verão. Limites fixos de velocidade para cada estação.

Os valores das velocidades superficiais dos perfis residuais encontrados para as duas estações fixas apontaram para o sentido estuário abaixo e são dados a seguir:

Estação A (Fig. 49 - esquerda)

- Quadratura de inverno: 0,038 m/s;
- Sizígia de inverno: 0,074 m/s;
- Quadratura de verão: 0,034 m/s;
- Sizígia de verão: 0,029 m/s.

Estação C (Fig. 49 - direita)

- Quadratura de inverno: 0,092 m/s;
- Sizígia de inverno: 0,074 m/s;
- Quadratura de verão: 0,264 m/s;
- Sizígia de verão: 0,155 m/s.

Ao longo do período total analisado (agosto 2007 a janeiro 2008), o predomínio temporal das velocidades residuais foi estuário acima em A e estuário abaixo em C. Porém, considerando as intensidades destas velocidades residuais, a estação A apresentou velocidade residual resultante sentido estuário abaixo, assim como C. A velocidade residual de C dez vezes maior do que a de A é coerente com a proporção entre a vazão RPE e a do RCA.

Em A, os perfis estacionários (residuais) demonstraram grande destaque da advecção baroclínica atuante no canal de Caravelas, evidenciando nas quatro campanhas sempre a clássica Circulação Estuarina, com cruzamento do zero e presença de correntes opostas ao longo da coluna d'água.

Todos os perfis residuais de salinidade apresentaram salinidades máximas no fundo com os seguintes valores, na mesma ordem em que aparecem acima os resultados de velocidade superficial: A – 36,4; 35,1; 35,3; 35,4 (**Fig. 50 - esquerda**); C – 33,5; 34,4; 34,7; 34,1 (**Fig. 50 - direita**); e mínimas na superfície: A – 34,3; 34,9; 34; 35 (**Fig. 50 - esquerda**); C – 28,5; 33,5; 28; 33,6 (**Fig. 50 - direita**).



Figura 50. Estações A (esquerda) e C (direita) – perfis residuais de salinidade (linha fina) e velocidades residuais (linha grossa), para um ciclo completo de maré semidiurna (~13 horas), durante as quatro campanhas: de cima pra baixo, quadratura de inverno, sizígia de inverno, quadratura de verão e sizígia de verão. Limites fixos de salinidade para cada estação.

As salinidades médias residuais nas fases de quadratura e sizígia de inverno, e quadratura e sizígia de verão, foram novamente na ordem acima, de 35,38; 35; 34,78; 35,26, respectivamente na estação A (**Fig. 50 - esquerda**), e de 31,4; 33,88; 32,05; 33,84, respectivamente na estação C (**Fig. 50 - direita**).

Os gradientes verticais de salinidade em C (5; 0,9; 6,7; 0,5, na ordem utilizada acima) (**Fig. 50 - direita**) foram maiores do que em A (2,1; 0,2; 1,3; 0,4, na ordem utilizada acima) (**Fig. 50 - esquerda**), para todas as quatro campanhas realizadas, mostrando a maior influência em C da descarga de água doce, que tende a escoar pelas camadas mais superficiais, e chega a influenciar até as camadas mais profundas. Um detalhe notável foi a presença de inflexão (com ligeiro aumento de salinidade) na camada superficial do perfil residual durante quadratura de inverno, evidenciando, junto com os resultados de velocidade, a formação de uma camada de mistura superficial, acima da haloclina. Este fato sugere a ocorrência de algum fenômeno forçante durante este período, o que alterou a estrutura vertical de salinidade.

Como mencionado na sessão de métodos, os parâmetros Circulação (p_c) e Estratificação (p_e) envolvidos nas classificações dos canais estuarinos foram calculados através dos perfis residuais de velocidade e salinidade obtidos e já apresentados. Os dados de vazão e velocidade da descarga fluvial do rio Caravelas estimados por Izumi (2008), a partir do método indireto de Schreiber, também foram testados para o cálculo destes parâmetros. Os resultados mais coerentes para estes parâmetros foram encontrados através das velocidades residuais. Porém, nem todas as situações apresentaram informações suficientes para a classificação de Hansen e Rattray (1965 e 1966). Nestes casos, as classificações foram realizadas através da estratificação vertical de salinidade.

Os resultados destes cálculos foram:

Estação A (Fig. 51)

- Quadratura de inverno p_c não aplicável; p_e 0,06;
- Sizígia de inverno p_c 2,07; p_e 0,004;
- Quadratura de verão p_c não aplicável; p_e 0,04;
- Sizígia de verão p_c não aplicável; p_e 0,009.

Estação C (Fig. 52)

- Quadratura de inverno p_c 1,58; p_e 0,16;
- Sizígia de inverno p_c 0,68; p_e 0,02;
- Quadratura de verão p_c 2,66; p_e 0,20;
- Sizígia de verão p_c 1,62; p_e 0,01.

Localizando-se esses valores no diagrama de Hansen e Rattray, obtevese a classificação para cada um dos quatro períodos observados (quadraturas e sizígias de inverno e verão) dos canais estuarinos.



Figura 51. Estação A – diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para a campanha de sizígia de inverno (S/ago).



Figura 52. Estação C – diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para as quatro campanhas: quadratura de inverno (Q/ago), sizígia de inverno (S/ago), quadratura de verão (Q/jan) e sizígia de verão (S/jan).

Os canais foram classificados como:

Estação A (Fig. 51)

- Quadratura de inverno: moderada estratificação vertical de salinidade;
- Sizígia de inverno: Tipo 1a Bem misturado;
- Quadratura de verão: moderada estratificação vertical de salinidade;
- Sizígia de verão: bem misturado verticalmente.

Estação C (Fig. 52)

- Quadratura de inverno: transição entre os tipos 2b e 1b o fluxo resultante reverte com a profundidade; apreciável estratificação vertical;
- Sizígia de inverno: bem misturado verticalmente (não pode ser classificado no diagrama de Hansen e Rattray);
- Quadratura de verão: Tipo 2b o fluxo resultante reverte com a profundidade; apreciável estratificação vertical;
- Sizígia de verão: transição entre os tipos 2a e 1a Bem misturado.

O cálculo do parâmetro ν para esses períodos amostrados resultou nos seguintes valores:

Estação A (Fig. 53)

- Quadratura de inverno: não aplicável;
- Sizígia de inverno: 0,99 99% do transporte feito pela difusão turbulenta no transporte de sal estuário acima;
- Quadratura de verão: não aplicável;
- Sizígia de verão: não aplicável.

Estação C (Fig. 54)

- Quadratura de inverno: 0,99 Predomínio da difusão turbulenta no transporte de sal estuário acima, com 99%;
- Sizígia de inverno: não aplicável;
- Quadratura de verão: 0,94 Predomínio da difusão turbulenta no transporte de sal estuário acima, com 94%;
- Sizígia de verão: 0,99 Predomínio da difusão turbulenta no transporte de sal estuário acima, com 99%.



Figura 53. Estação A – Valores do parâmetro ν (ni) no diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para as quatro campanhas: quadratura de inverno (Q/ago), sizígia de inverno (S/ago), quadratura de verão (Q/jan) e sizígia de verão (S/jan).



Figura 54. Estação C – Valores do parâmetro ν (ni) no diagrama de classificação Estratificação-Circulação proposto por Hansen e Rattray (1966), para as quatro campanhas: quadratura de inverno (Q/ago), sizígia de inverno (S/ago), quadratura de verão (Q/jan) e sizígia de verão (S/jan).

3.5. Transporte Residual de Volume

Este tópico apresenta o transporte residual de volume por unidade de largura da seção transversal, calculado para cada ciclo completo de maré. Com o intuito principal de se determinar a ordem de grandeza desta quantidade, foram consideradas as velocidades residuais obtidas dos perfis residuais e das espessuras médias da coluna d'água ao longo do ciclo.

Com o conjunto de amostragens do PRO-ABROLHOS utilizado, foi possível evidenciar padrões diferentes de variação de transporte de volume para ambos os canais. A estação A mostrou-se importadora durante três campanhas - quadratura de inverno, quadratura e sizígia de verão. Porém, durante sizígia de inverno, o transporte exportador superou em volume a soma daqueles gerados no sentido oposto nas outras épocas. A estação C mostrou que o canal estuarino na região sul do complexo atuou como exportador para os dois períodos do ano, inverno e verão, tanto para a fase de maré de quadratura quanto para a de sizígia.

Os Transportes Residuais de Volume (por unidade de largura) obtidos foram (Fig. 55):

- Quadratura de inverno: -0,037 m²/s para A e 0,43 m²/s para C;
- Sizígia de inverno: 0,408 m²/s para A e 0,764 m²/s para C;
- Quadratura de verão: -0,142 m²/s para A e 0,891 m²/s para C;
- Sizígia de verão: -0,038 m²/s A e 0,925 m²/s para C.

Considerando uma média aproximada durante o período compreendido neste estudo (agosto de 2007 a janeiro de 2008), o estuário do RPR exportou volume de água com uma ordem de grandeza maior do que o estuário do RCR. É importante observar que a consideração dos canais estuarinos como lateralmente homogêneos pode superestimar os valores de transporte de volume através da seção transversal.



Figura 55. Estações A (azul) e C (vermelho) – Transportes Residuais de volume por unidade de larguraatravés da seção transversal das estações fixas calculados para ciclos completos de maré (~13 horas), durante as quatro campanhas: quadratura e sizígia de inverno, quadratura e sizígia de verão.

3.6. Ventos

Dois tipos de figuras são apresentados: as primeiras figuras mostram o tempo (em dias e horas) representado no eixo das abscissas e a velocidade do vento (em m/s) no das ordenadas (**Figs. 56 e 58**). Além da intensidade do vento, determinada pelo comprimento do vetor, é possível observar sua direção e seu sentido, ressaltando que os vetores apontam para o sentido de destino dos ventos. O segundo tipo consiste num histograma circular (**Figs. 57 e 59**), onde são apresentadas as porcentagens de ocorrência de cada grupo de ventos.

Durante a campanha de agosto, a intensidade variou entre 0 e 7 m/s aproximadamente (**Fig. 56**). O sentido variou principalmente entre ventos de NW (25%) e de NE (41,66%), com alguma ocorrência de N (12,87%), e raros momentos com ventos vindos de W (6,82%), S (6,06%), SW (3,03%) e SE (4,56%) (**Fig. 57**). Entre os dias 22 e 24 de agosto, observou-se predominância de ventos de NW e, entre 25 e 29 de agosto, o domínio foi de NE (**Fig. 56**).



Figura 56. Variação temporal dos vetores de velocidade do vento em Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em agosto de 2007. Fonte: autor. Dados: INMET.



Figura 57. Histograma circular de ocorrência de ventos vindos dos sentidos E, NE, N, NW, W, SW, S, SE, para a região de Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em agosto de 2007. Fonte: autor. Dados: INMET.

Em janeiro, a Intensidade dos ventos também variou entre 0 e 7 m/s aproximadamente (**Fig. 58**). Constatou-se predomínio absoluto de ventos de NE (56,91%), com algumas ocorrências de W (22,77%), e raras aparições de ventos de N (6,5%), SE (5,69%), NW (3,25%), SW (2,44%) e S (2,44%) (**Fig. 59**). A partir de aproximadamente 12 h do dia 21 de janeiro, observou-se uma entrada de frente fria na região, com virada no sentido dos ventos, passando rapidamente por NW e W, até chegar a SW por volta das 12 h do dia 22 (**Fig. 58**).



Figura 58. Variação temporal dos vetores de velocidade do vento em Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em janeiro de 2008. Fonte: autor. Dados: INMET.



Figura 59. Histograma circular de ocorrência de ventos vindos dos sentidos E, NE, N, NW, W, SW, S, SE, para a região de Caravelas (BA) durante as campanhas realizadas em agosto de 2008. Fonte: autor. Dados: INMET.

Os resultados encontrados para as duas épocas do ano confirmam a predominância dos ventos de NE na área de estudo. Durante as campanhas de coleta de dados, os ventos atuaram principalmente na mesma direção (SW-NE) de uma das bocas existentes (BV) na região norte do CEC, com sentido estuário adentro no canal estuarino do RCA. Já na região sul do complexo, os ventos de NE atuaram perpendicularmente à orientação da boca do canal estuarino do RPE (NW-SE). Desta forma, no canal de CA o vento atua majoritariamente no mesmo sentido das correntes de enchente e contrário ao sentido das correntes de vazante.

Apesar da maior proximidade entre a estação fixa C e o oceano, acredita-se que o vento exerça maior influência na hidrodinâmica longitudinal da estação A, devido à coincidência das orientações ao possível represamento das águas que tendem a sair do estuário para o oceano.

4. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação aos objetivos

Recordando, o objetivo principal foi o de explicar as diferenças encontradas nas estruturas termohalinas e hidrodinâmicas dos dois canais estuarinos do CEC durante os experimentos realizados em épocas de inverno e verão.

Foram observados valores de salinidade maiores que 36,0 na camada subjacente à halocina, associados a temperaturas próximas a 28°C, indicam a intrusão da massa de Água Tropical (AT) no estuário, concordando com trabalhos já citados anteriormente como, por exemplo, Andutta (2011). Com valores variando entre 30,0 e 36,5 nas duas estações, constata-se que, nas proximidades da estofa de maré de preamar, a massa de água AT se faz presente em toda a coluna d'água dentro dos canais estuarinos. Em ambos os casos, a onda de maré é capaz de bombear água marinha para dentro do estuário. Nesta região, a variação da salinidade predominou e determinou a Porém, variação da densidade. houve um aumento notável de aproximadamente 3 °C na temperatura de ambos os canais estuarinos na transição de inverno para verão.

Em todas as escalas temporais – semidiurna, quinzenal e sazonal, os dois canais mostraram comportamentos bastante semelhantes no que concerne a:

- A ciclicidade e ao período das variações de todos os parâmetros analisados – velocidade, salinidade, temperatura e profundidade;
- As configurações das estruturas verticais de todos os parâmetros analisados e, consequentemente, da estabilidade vertical da coluna;
- O comportamento das diferentes camadas horizontais ao longo da coluna d'água e a interdependência entre elas;
- A predominância da maré como principal forçante de movimentos nos canais estuarinos.

Em contrapartida, algumas diferenças devem ser consideradas:

- O estuário do rio Caravelas mostrou-se importador durante maior parte do tempo (quadratura inverno, quadratura verão, sizígia verão) e exportador apenas em sizígia de inverno; no estuário do rio Peruípe foi observado apenas características exportadoras durante os quatro períodos amostrados; ressalta-se que os valores de transporte foram superestimados, devido à simplificação na questão da variação lateral do transporte;
- Há diferenças de comportamento da onda de maré em cada canal do complexo; no canal norte, a maré alternou características de onda progressiva (no inverno) e estacionária (no verão); no canal sul, comportou-se sempre como onda estacionária;
- Durante o inverno, as estofas em A, tendem a se antecederem em relação às estofas em C; já durante o verão, em C as estofas ocorreram anteriormente em relação a A;
- A salinidade média foi sempre menor no canal sul, porém apresentou maior variação;
- A estação oceanográfica fixa C foi localizada no estuário inferior (Dionne, 1963), mais próxima à sua respectiva desembocadura, quando comparada à localização da estação A, localizada no estuário médio (Dionne, 1963), mais distante em relação à sua respectiva desembocadura.

Em relação à hipótese

Como observado, as diferentes combinações dos fenômenos forçantes que atuam sobre os canais, associadas às características locais, geram padrões de circulação e transporte distintos. Juntam-se à hipótese as seguintes conclusões:

- Há menor resistência da descarga fluvial na porção norte do complexo, permitindo um transporte residual estuário acima;
- Deve haver contribuição da forçante atmosférica, atuando com ventos constantes de NE empurrando massa d'água para dentro do canal, devido à coincidência com a direção da entrada de uma das bocas do canal estuarino de Caravelas (Barra Velha); já o canal de Nova Viçosa tem sua boca voltada para sudeste, perpendicular à direção dos ventos de NE; embora tenham ocorrido entradas de frentes frias durante as coletas, acredita-se que suas curtas durações não foram suficientes para influenciar significativamente o transporte longitudinal nos canais estuarinos;
- São diferentes as características geométricas dos canais, influenciando no comportamento das ondas de maré e, consequentemente, no transporte de massa e volume. As ligações entre os canais estuarinos principais também podem desempenhar uma importante influência na dinâmica local (Samaritano, 2010).

Portanto, a hipótese científica que orientou este trabalho estava correta, porém incompleta. É provável que além da ligeira maior atuação da descarga fluvial na porção sul do CEC, tenham influência sobre a hidrografia as características locais (configurações geométricas) combinadas às forçantes atmosféricas e oceânicas.

Em relação ao problema

Este trabalho foi proposto para explicar como um único complexo estuarino pode, sob influência dos mesmos fenômenos forçantes, apresentar desembocaduras com características estruturais de velocidade e salinidade distintas e, mais além, transportes de massa e volume opostos.

O cumprimento dos objetivos específicos propostos neste trabalho possibilitou avaliar os detalhes do problema em diversas condições naturais (quadraturas e sizígias de inverno e verão), sendo possível determinar características essenciais e predominantes nos canais estuarinos. Desta forma, através das análises, foi possível corroborar a hipótese suposta e, ainda, fazer afirmações adicionais.

Dentro de suas limitações, este trabalho contribuiu para acrescentar o conhecimento do Complexo Estuarino do Cassurubá. Sintetizando, foram descritas as características das estruturas verticais de parâmetros essenciais e suas evoluções temporais ao longo de um ciclo completo de maré local (semidiurna). Os resultados encontrados mostraram o domínio da maré sobre ambos os canais estudados. Ventos e descargas fluviais também atuaram nos dos canais com intensidades de mesma ordem de grandeza. Contudo, as hidrografias dos dois canais foram distintas, devido a detalhes como: pequena diferença de descarga fluvial que atua a mais na porção sul do complexo; orientação da desembocadura do canal norte favorece uma maior atuação dos ventos constantes atuantes na região; a configuração geométrica do canal de Caravelas associada às outras forçantes induz a onda de maré a se comportar de maneira diferente em cada canal.

Cabe ressaltar que os resultados encontrados neste trabalho são relativos aos períodos de amostragens descritos inicialmente. Assim como qualquer outro estuário, este complexo estuarino pode apresentar diferentes resultados de acordo com as variações em diversas escalas temporais e espaciais.

Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar outras épocas do ano;
- Analisar mais ciclos consecutivos de maré (observação prolongada);
- Fazer estudos longitudinais simultâneos em ambos os canais;
- Trabalhar com seções transversais através de ADCP's rebocados;
- Monitoramento contínuo das descargas fluviais;
- Estudo dos comportamentos do vento e da onda de maré nos canais estuarinos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A.C.S.; 2000. Evolução quaternária da planície costeira de Caravelas – Extremo Sul do estado da Bahia. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia. Salvador - Bahia. 102 p.
- Andrade, A.C.S.; Dominguez, J.M.L.; 2002. Informações geológicogeomorfológicas como subsídios à análise ambiental: o exemplo da planície costeira de caravelas – Bahia. Boletim Paranaense de Geociências, n. 51, p. 9-17, 2002. Editora UFPR.
- Andutta, F.P.; 2006. Experimentos e modelagem numérica no estuário do rio Curimataú, RN. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da USP, 122p. São Paulo, SP, Brasil.
- Andutta, F.P.; 2011. O Sistema Estuarino dos rios Caravelas e Peruípe (Bahia): Observações, simulações, tempo de residência e processos difusivo e advectivo. Tese de Doutarado. IOUSP. 121p.
- Andutta, F.P.; Miranda, L.B.; Fontes, R.F.C.; 2006. Numerical Simulation of the Hydrodynamics in the Curimataú Estuary, RN (Brazil). Expanded Abstract. PECS.
- Araújo, M.; Medeiros, C.; Ribeiro, C.; 1999. Energy balance and timescales of mixing and stratification in the Jaboatão estuary, NE-Brazil. Rev. bras. oceanogr., 47(2):145-154.
- Bérgamo, A.L.; Miranda, L.B.; Correia, M.A.; 2002. Estuário: Programas para processamento e análise de dados. Rel. téc. inst. oceanogr., 49:1-16.
- Cameron, W.M.; Pritchard, D.W.; 1963. Estuaries. In M. N. Hill (editor): *The Sea* vol. 2, John Wiley and Sons, New York, 306 324.
- Castro, B.M.; 1996. Correntes e Massas de Água da Plataforma Continental Norte de São Paulo. Tese de Livre-Docência, Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, 248 p.
- Castro, B.M.; Miranda, L.B.; 1998. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4oN and 34oS. In Robinson, A. R.; Brink, K. H. (Eds), *The Sea*, v. 11, New York: John Wiley & Sons, Inc., p. 209- 251, 1998.

- Castro, B.M.; Vanin, A.M.S.P.; Brandini, F.; Miranda, L.B.; 2005. Multidisciplinary Oceanographic Processes on the Western Atlantic Continental Shelf Between 4oS and 34oS (4,W). *The Sea*, v. 14 pp. 259-293.
- Chagas, F.M.; Miranda, L.B.; Schettini, C.A.; Siegle, E.; Andutta, F.P.; Duarte, M.P.; Silva, M.P.; (2011). On the steady-state circulation and salinity simulations in the Peruípe River Estuary in the summer (Nova Viçosa, BA). V SBO. Santos, SP, Brasil.
- Chagas, F.M.; Miranda, L.B.; Schettini, C.A.F.; Siegle, E.; Andutta, F.P.; Duarte, M.P.; Silva, M.P.; 2011. On the steady-state circulation and salinity simulations in the Peruipe river estuary in the summer (Nova Viçosa, BA). V SBO. Santos, SP.
- Conservation International; Machioro et al; 2005. Subsídios para a delimitação das zonas de amortecimento do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos e Reserva Extrativista Marinho do Corumbau por meio da avaliação de impactos potenciais de derramamentos de óleo. Relatório Final.
- Davies, J.H.; 1964. A Morphogenic Approach of World Shorelines. Z. Geomorphol., 8, p.127-142.
- Dionne, J.C.; 1963. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. Zeitschr. F. Geomorph., 7(1):36-44.
- Dyer, K.R.; 1986. Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. Lohn Wiley, Chichester, 342pp.
- Dyer, K.R.; 1997. Estuaries: A Physical Introduction. 2nd edition. John Wiley & Sons, N.Y., 140 p.
- Fischer, H.B.; 1972. Mass transport mechanisms in partially stratified estuaries. Journal of Fluid Mechanics, 53:671-687.
- Fischer, H.B.; 1976. Mixing and dispersion in estuaries. Annual Review of Fluid Mechanics. Annual Reviews, (8):107-133.
- Gaeta S.A.; Lorenzzetti, J.A.; Miranda, L.B.; Susini-Ribeiro, S.M.M.; Pompeu, M.; Araujo, C.E.S.; 1999. The Vitoria Eddy and its relation to the phytoplankton biomass and primary productivity during the austral fall of 1995. Arch. Fish. Mar. Res., v. 47, n. 2-3, p. 253-270.

- Golfari, L.; Caser, R.L.; Moura, V.P.G.; 1978. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil (2ª aproximação). Brasília: PRODEPEF: PNUD/FAO/IBDF/BRA-45, 66p. (Série Técnica, 11).
- Hansen, D.V.; Rattray, M.Jr.; 1966. New dimensions in estuary classification. Limnology and Oceanography, 11(3):319-325.
- Hansen, D.V.; Rattray, M.Jr.; 1965. Gravitational Circulation in Sraits and Estuaries. J. Mar.Res., 23(1):102-122.
- http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brazil_topo_en2.PNG
- Izumi, V.M.; 2007. Forçantes do Estuário do rio Caravelas, BA. SIICUSP. IOUSP.
- Izumi, V.M.; 2008. Balanço Dinâmico Longitudinal do Estuário do Rio Caravelas, BA. Trabalho de Conclusão de Curso. IOUSP.
- Kjerfve, B.; 1989. Estuarine Geomorphology and Physical Oceanography. In: estuarine Ecology J.W. Day Jr.; C.A.S. Hall; W.M. Kemp and A.Y Arancibia. John Wiley and Sons, N.Y, 558 p.
- Kjerfve, B.; 1975. Velocity Averaging in Estuaries Characterized by Large Tidal Range to Depth Ratio. Estuar. coast. mar. Sci., 3: 311-323.
- Knoppers, B.; Ekau W.; Figueiredo, A.G.; 1999a. The coast and shelf of east northeast Brazil and material transport. Geo-Marine Letters. 19:171-178.
- Knoppers, B.; Meyerhofer, M.; Marone, E.; Dutz, J.; Lopes, R.; Leipe, T.; Camargo, R.; 1999b. Compartments of the pelagic system and material exchange at the Abrolhos Bank coral reefs, Brazil. Arch. Fish. Mar. Res. 47(2-3): 285-306.
- Leão, Z.M.A.N.; 2002. Abrolhos, BA O complexo recifal mais extenso do Atlântico Sul. In: SCHOBBENHAUS C, CAMPOS DA, QUEIROZ ET, WINGE M, BERBERT-BORN MLC (Eds.). Sítios Geolágicos e Paleontologicos do Brasil. 1ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiologicos (SIGEP), 1: 345-359.
- Leipe, T.; Knoppers, B.; Marone, E.; Camargo, R.; 1999. Suspended matter transport in coral reef waters of the Abrolhos bank, Brazil. Geo-Marine Letters, 19, 186-195.

- Lessa, G.C.; Cirano, M.; 2004. On the circulation of a coastal channel within the Abrolhos Coral-Reef system-Southern Bahia (17o40[´]), Brazil.
 J. Coast. Res., SI-39 Proceedings, pp.
- Mazzini, P.L.F.; 2009. Correntes Subinerciais na Plataforma Continental Interna entre Peruíbe e São Sebastião: Observações. Dissertação de Mestrado. IOUSP.
- Medeiros, C.; Kjerfve, B.; 1993. Hydrology of a Tropical Estuarine System: Itamaracá, Brazil. Estuar. Coast. Shelf Sci., 36:495-515.
- Mello, M.O.A.; 1973. Ecologia da Bahia e o reflorestamento. In: SIMPÓSIO FLORESTAL DA BAHIA, 1, Salvador. Anais. Salvador: Secretaria da Agricultura, 1973. p.45-118.
- Miranda, L.B.; Castro, B.M.; 1981. Geostrophic flow conditions of the Brazil Current at 19°S. Ciencia Interamericana, 22(1-2):44-48.
- Miranda, L.B.; Bérgamo, A.L.; Silva, C.A.R.; 2006. Dynamics of a Tropical Estuary: Curimataú River, NE Brazil. J. Coast. Res., SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), Itajaí, SC – Brazil, ISSN 0749-0208.
- Miranda, L.B.; Bergamo, A.L.; Castro, B.M.; 2005. Interactions of river discharge and tidal modulation in a tropical estuary, NE Brazil. Ocean Dynamics, 55(5-6):430-440.
- Miranda, L.B.; Castro, B.M.; Kjerfve, B.; 2002. Princípios de Oceanografia Física de Estuários. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 424 p. (Acadêmica 42).
- Peel, M.C.; Finlayson, B.L.; McMahon, T.A.; 2007. "Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification". 'Hydrol. Earth Syst. Sci.' 11: 1633–1644. ISSN 1027-5606.
- Pereira, M.D.; Siegle, E.; Miranda, L.B.; Schettini, C.A.F.; 2010. Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão em um estuário dominado por maré: estuário de Caravelas (BA). Revista Brasileira de Geofísica, 28(3):427-444.Perillo, G.M.E. 1995. Geomorphology and Sedimentology of Estuaries. Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries, Development in Sedimentology 53.

- Perillo, G.M.E.; 1995. Geomorphology and Sedimentology of Estuaries.
 Definitions and Geomorphologic Classifications of Estuaries, *Development in Sedimentology* 53.
- Pianca, C.B.; 2009. Dinâmica de pontais arenosos associados à desembocadura do estuário de Caravelas, BA. Dissertação de mestrado. IOUSP. São Paulo, SP, Brasil.
- Prandle, D., 1985. On salinity regimes and the vertical structure of residual flow in narrow tidal estuaries. Estuar. Coast. Shelf Sci., 20, 615– 35.
- Pritchard, D. W.; 1954. A study of the salt balance in a coastal plain estuary. J. Mar. Res., 13 (1):133-144.
- Pritchard, D. W.; 1955. Estuarine Circulation Patterns. Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 81(Separate 717):717/1-717/11, 1955.
- Pritchard, W.D.; 1967. What is an Estuary: Physical View Point. In: Estuaries, ed. G.H. Lauff, American Association for the Advance of Science, Washington, D.C., p. 3-5, 1967.
- Richardson, L.F.; 1920. The supply of energy form and to atmospheric eddies. Proc. R. Soc. Lond. A 97: 354-373.
- Samaritano, L.A.S.; 2010. Modelagem numérica da dinâmica do sistema estuarino de Caravelas-Peruípe, BA. Dissertação de mestrado. IOUSP. São Paulo, SP, Brasil.
- Samuels, B.; Cox, M.; 1987. Data set atlas for ocean modeling. Ocean Modeling, 75, 1-3.
- Sarmento-Soares, L.M.; Martins-Pinheiro, R.F.; Chamon, C.C.; Aranda, A.T.; 2006. Microglanis pataxo, a new catfish from southern Bahia coastal rivers, northeastern Brazil (Siluriformes: Pseudopimelodidae). Neotrop. Ichthyol. 4(2):157-166.
- Schettini C. A.F.; Miranda L. B.; 2010. Circulation and suspended particulate matter in a tidally dominated estuary. Brazilian Journal of Oceanography.
- Schreiber, P.; 1904. Über die Beziehugen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. Meteror. Z., 21, 441-452.

- Scott, C. F.; 1993. Canonical Parameters for Estuarine Classification. Estuar. Cost. SHelf Sci., 36:529-540.
- Silveira, I. C. A.; Schmidt, A. C. K.; Campos, E. J. D.; Godoi, S. S.; Ikeda, Y; 2000. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. Rev. Bras. Oceanogr., v. 48, n. 2, p. 171-183.
- Soutelino, R. G.; 2008. A origem da Corrente do Brasil. Dissertação de Mestrado. IOUSP.
- Stramma, L.; Peterson, R.G.; 1990. The South-Atlantic Current. Journal of Physical Oceanography, 20 (6), 846-859.
- Stramma, L.; Ikeda, Y.; Peterson, R.G.; 1990. Geostrophic Transport in the Brazil Current Region North of 20-Degrees-S. Deep-Sea Res., 37 (12), 1875-1886.
- Teixeira, C.E.P.; 2006. Caracterização e Variabilidade da Hidrodinâmica da Zona Costeira Adjacente ao Banco de Abrolhos. Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico da USP, SP, 93 p.
- Uncles, R.J.; Stephens J.A.; 1996. Salt Intrusion in the Tweed Estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 43(3):271-293.
- UNESCO; 1981. The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980. UNESCO Tech. Pap. Mar. Sci., 36:25 p.