



COPPE/UFRJ

**INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DO FUNDO NA HIDRODINÂMICA DA BAÍA
DE GUAJARÁ (PARÁ)**

Carina Stefoni Böck

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

Orientadores: Luiz Landau

Luiz Paulo de Freitas Assad

Rio de Janeiro

Março de 2010

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DO FUNDO NA HIDRODINÂMICA DA BAÍA
DE GUAJARÁ (PARÁ)

Carina Stefoni Böck

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

Examinada por:

Prof. Luiz Landau, D.Sc.

Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad, D.Sc.

Prof. Audálio Rebelo Torres Junior, D.Sc.

Dr. Manlio Fernandes Mano, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2010

Böck, Carina Stefoni

Influência da Morfologia do Fundo na Hidrodinâmica da Baía de Guajará (Pará)/ Carina Stefoni Böck. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XV, 100 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Luiz Landau

Luiz Paulo de Freitas Assad

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

Referências Bibliográficas: p. 95-100.

1. Modelagem Numérica. 2. Estuários. 3. Princeton Ocean Model. I. Landau, Luiz et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

DEDICATÓRIA

Especialmente à minha avó, Irany Clapp Stefoni,
que, ao cumprir sua missão, partiu e nos deixou
um enorme vazio. Quanta saudade...

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad, pela orientação firme e positiva, pelo total apoio, por acreditar e vibrar com cada resultado alcançado, pela liberdade e confiança que depositou em mim durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Luiz Landau, que me inspirou pelo seu exemplo de dedicação e profissionalismo, pela orientação decisiva e incentivo desde o ingresso na pós graduação.

Meus sinceros agradecimentos a cada professor(a) que nesses anos, esteve presente em algum momento, contribuindo para o meu crescimento profissional e pessoal.

Aos professores Odete Fátima Machado da Silveira, Amilcar Carvalho Mendes e Nils Edvin Asp Neto pelo apoio durante o desenvolvimento do presente trabalho e pelas ricas contribuições dadas.

Ao Prof. Audálio Rebelo Torres Júnior e ao Dr. Manlio Fernandes Mano, pela atenção e tempo dedicados à correção do trabalho. Obrigada pelas valiosas sugestões.

À Hatsue Takanaca de Decco, que me auxiliou na troca de experiências e nas discussões sobre o trabalho.

À toda equipe do Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE), em especial à Mônica Caruso Stoque.

Às minhas amigas especiais de mestrado: Isabela Habib Canaan da Silva e Vania Cristina da Silva Gonçalves Miguez Ferreira. Por todas as horas que rimos ou choramos juntas, muito além da alegria pelas vitórias ou a tristeza nas derrotas sempre ficará a força durante a batalha.

Ao Plínio, pelo seu amor, por sempre estar disposto a me ajudar em qualquer situação e principalmente pelo seu apoio que me conforta e me deixa mais forte para superar meus desafios.

Ao meu pai e à minha irmã, Thais, pelo apoio, carinho e incentivo.

Ao meu irmão, Bruno, por todo o seu amor e por fazer valer o verdadeiro significado da palavra irmão. *Il Preferito!*

À minha querida mãe, pelo zelo e exemplo de vida, pela eterna vigilância e amor infinito. Tenho certeza que sem você nada disso teria sido possível!

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

INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DO FUNDO NA HIDRODINÂMICA DA BAÍA DE GUAJARÁ (PARÁ)

Carina Stefoni Böck

Março/ 2010

Orientadores: Luiz Landau

Luiz Paulo de Freitas Assad

Programa: Engenharia Civil

Com o propósito de avaliar as variações da morfologia do fundo da Baía de Guajará e, posteriormente, determinar a influência destas alterações sobre o padrão de circulação local através da implementação de um modelo hidrodinâmico, foram construídas duas grade numéricas: uma baseada em dados de batimetria obtidos de uma carta náutica de 1962 e outra fundamentada em dados de um levantamento batimétrico realizado na região em 2002. Como as condições hidrodinâmicas na área de estudo sofrem variações ligadas principalmente aos padrões sazonais de precipitação pluviométrica, foram considerados cenários que representassem o período chuvoso e o período de estiagem para as duas grades. O modelo numérico escolhido para a modelagem hidrodinâmica foi o Princeton Ocean Model (POM). O modelo implementado foi do tipo bidimensional e as forçantes consideradas foram a maré astronômica, o vento e a descarga fluvial. A caracterização da hidrodinâmica do estuário foi obtida através da comparação entre os resultados do modelo e dados hidrodinâmicos observados no local e também através da análise comparativa entre os resultados dos cenários de 1962 e 2002. Os resultados indicam que a Baía de Guajará passou por intensas variações de batimetria e morfologia de fundo, apresentando, de modo geral, um aumento das profundidades em 2002. Os cenários de 2002, comparativamente aos cenários de 1962, apresentaram as maiores velocidades de corrente, principalmente durante o período de enchente, e as maiores vazões, sobretudo durante o período de vazante.

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

INFLUENCE OF THE BOTTOM MORPHOLOGY ON THE GUAJARÁ BAY'S HYDRODYNAMIC

Carina Stefoni Böck

March/2010

Advisors: Luiz Landau

Luiz Paulo de Freitas Assad

Department: Civil Engineering

Two numerical grids were built in order to assess the variations in the bottom morphology of Guajará Bay, and also, in the future, to determine, through the implementation of a hydrodynamic model, the influence of these alterations upon the local circulation pattern. One of the grids is based on bathymetry data from a 1962 nautical chart and the other was fundamented upon data from a bathymetric survey carried out in that same region in the year of 2002. Due to the fact that the hydrodynamic conditions of the studied area are influenced by the annual variations which are connected with the seasonal patterns of rain precipitation, settings which could be representative of the rainy season and the dry season were considered for the two grids. The Princeton Ocean Model (POM) was selected for the hydrodynamic modelling. The implemented model was the bidimensional type and the considered forcings were the Astronomical tide, the east wind and the river discharge. The description of the estuary hydrodynamic was obtained comparing the model results and the hydrodynamic data observed in loco as well as through the comparative analysis of the results from the settings of 1962 and 2002. The results suggest that the Guajará Bay underwent strong bathymetric and bottom morphology changes and, in general, showed an increase in its depth in 2002. The settings in 2002, when compared with the settings in 1962, showed the highest current speed, mainly during the flood tide and the highest discharges during the ebb tide.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 01 |
| 1.1. JUSTIFICATIVA DO TEMA E MOTIVAÇÃO..... | 02 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 03 |
| 1.2.1. OBJETIVO GERAL..... | 03 |
| 1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO..... | 04 |
| 2. ÁREA DE ESTUDO | 05 |
| 2.1. CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS..... | 09 |
| 2.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS..... | 10 |
| 2.3. MORFOLOGIA E SEDIMENTOS DE FUNDO..... | 14 |
| 2.4. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS..... | 24 |
| 3. METODOLOGIA | 35 |
| 3.1. LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE BATIMETRIA..... | 35 |
| 3.2. CONSTRUÇÃO DAS MALHAS NUMÉRICAS..... | 36 |
| 3.3. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO..... | 42 |
| 3.3.1. DESCRIÇÃO DO MODELO..... | 42 |
| 3.3.2. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO..... | 48 |
| 3.3.2.1. FORÇANTES..... | 49 |
| 3.3.3. CENÁRIOS..... | 55 |
| 3.3.4. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS..... | 57 |
| 4. RESULTADOS | 59 |
| 4.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO HIDRODINÂMICO COM DADOS OBSERVADOS..... | 59 |
| 4.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CENÁRIOS DE 1962 E 2002..... | 66 |
| 5. DISCUSSÃO | 91 |
| 5.1. CONCLUSÕES..... | 93 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 95 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localização da Baía de Guajará, no Pará..... | 06 |
| Figura 2. Baía de Guajará e, em destaque, as ilhas que compõem suas margens..... | 07 |
| Figura 3. Os cinco tipos de cargas mais importados no ano de 2009 no Terminal Miramar..... | 08 |
| Figura 4. Série temporal de temperaturas mínima, média e máxima (°C), para a estação meteorológica do INMET localizada em Belém, nos meses de a) janeiro, b) abril, c) julho e d) outubro de 2006..... | 10 |
| Figura 5. Sub-bacia Guamá-Moju e suas principais linhas de drenagem..... | 11 |
| Figura 6. Algumas das estações fluviométricas disponíveis no estado do Pará. Em destaque, as estações mais próximas à Baía de Guajará..... | 13 |
| Figura 7. Unidades morfológicas encontradas na baía de Guajará..... | 14 |
| Figura 8. Localização das estações de amostragem sedimentológica..... | 17 |
| Figura 9. Diagrama de Pejrup aplicado nas amostras coletadas na baía de Guajará e foz do rio Guamá..... | 18 |
| Figura 10. Histórico da evolução batimétrica da Baía de Guajará entre os anos de 1843 e 1985..... | 19 |
| Figura 11. Carta batimétrica da Baía de Guajará feita com dados do ano de 1962..... | 21 |
| Figura 12. Carta batimétrica da Baía de Guajará feita com dados do ano de 2002..... | 22 |
| Figura 13. Localização dos perfis batimétricos estabelecidos para análise multitemporal..... | 23 |
| Figura 14. Mapa com a localização das seções correntométricas realizadas pela Portobrás em 1980 na baía de Guajará..... | 26 |

| | |
|---|----|
| Figura 15. Mapa da distribuição das velocidades de correntes nas imediações do Igarapé Tucunduba. Levantamento realizado por Bernardi e colaboradores (1988 apud Silveira, 1989)..... | 29 |
| Figura 16. Quadro da dinâmica das correntes de marés de sizígia, em superfície, na Baía de Guajará, para o momento de início da vazante (aproximadamente 2h após a estofa da preamar..... | 31 |
| Figura 17. Quadro da dinâmica das correntes de marés de quadratura, em superfície, na Baía de Guajará, para o momento de início da enchente (aproximadamente 1h a 1h e 30 min após a estofa de baixa-mar..... | 32 |
| Figura 18. Grade numérica usada na modelagem hidrodinâmica. Em detalhe, a área em que será posicionado o Projeto Orla da Estrada Nova..... | 33 |
| Figura 19. Campo de velocidade máxima para o cenário que reproduz a configuração atual da região durante a) maré enchente e b) maré vazante..... | 34 |
| Figura 20. Disposição dos pontos a) da carta náutica nº 316 de 1962 e b) da malha do levantamento batimétrico realizado em 2002..... | 36 |
| Figura 21. Grades numéricas construídas para a Baía de Guajará a partir dos dados referentes aos anos de a) 1962 e b) 2002..... | 37 |
| Figura 22. Mapas batimétricos obtidos a partir da interpolação dos dados das grades numéricas de a) 1962 e b) 2002. A escala de cores indica a profundidade (metros)... | 39 |
| Figura 23. Histograma de freqüência das profundidades da batimetria de 1962..... | 40 |
| Figura 24. Histograma de freqüência das profundidades da batimetria de 2002..... | 41 |
| Figura 25. Diferença entre a matriz de batimetria dos anos de 1962 e 2002..... | 41 |
| Figura 26. Grade C de Arakawa utilizada pelo POM..... | 43 |
| Figura 27. Esquema das definições de coordenada sigma e superfície livre..... | 44 |
| Figura 28. Estações maregráficas localizadas dentro do domínio de modelagem..... | 50 |
| Figura 29. Constantes harmônicas para a estação maregráfica Companhia de Pesca Pina..... | 51 |
| Figura 30. Maregrama para o mês de abril de 2007..... | 52 |

| | |
|---|----|
| Figura 31. Maregrama para o mês de outubro de 2007..... | 52 |
| Figura 32. Séries temporais das componentes zonal (em azul) e meridional (em vermelho) do vento na região de Belém, para a primeira semana dos meses de a) e b) janeiro, c) e d) abril, e) e f) julho e g) e h) outubro de 2007, respectivamente..... | 53 |
| Figura 33. Freqüência de ocorrência de vento distribuído por direções na região de Belém..... | 54 |
| Figura 34. Variação da descarga do rio Guamá para o período entre 1965 e 1975 na estação Bom Jardim..... | 55 |
| Figura 35. Cenários ambientais considerados para a modelagem hidrodinâmica de Baía de Guajará..... | 57 |
| Figura 36. Posicionamento dos pontos escolhidos para a análise comparativa entre o cenário de 1962 e os dados obtidos por Portobrás..... | 60 |
| Figura 37. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a sizígia para o momento de início da vazante..... | 64 |
| Figura 38. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a quadratura para o momento de início da enchente..... | 65 |
| Figura 39. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a sizígia nos cenários que englobam o período chuvoso..... | 66 |
| Figura 40. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a sizígia nos cenários que englobam o período de estiagem..... | 67 |
| Figura 41. Diferença entre a matriz de magnitude das correntes, em um instante de sizígia, entre a) os cenários chuvosos de 1962 e 2002 e b) entre os cenários de estiagem de 1962 e 2002..... | 68 |
| Figura 42. Posicionamento dos 7 pontos escolhidos para a análise da variação das componentes meridional e zonal da velocidade, da elevação da superfície livre e da profundidade entre os anos de 1962 e 2002..... | 70 |
| Figura 43. Elevação da superfície livre nos a) ponto 1 e b) ponto 6, ambos no cenário chuvoso de 2002..... | 74 |
| Figura 44. Evolução temporal da energia cinética durante os 30 dias, ou 720 horas, de simulação numérica do cenário chuvoso..... | 75 |

| | |
|---|----|
| Figura 45. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 1, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 75 |
| Figura 46. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 2, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 76 |
| Figura 47. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 3, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 76 |
| Figura 48. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 4, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 77 |
| Figura 49. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 5, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 77 |
| Figura 50. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 6, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 78 |
| Figura 51. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 7, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 78 |
| Figura 52. Posicionamento das seções escolhidos para a análise da variação das vazões entre os anos de 1962 e 2002..... | 83 |
| Figura 53. Morfologia do fundo das seções transversais à Baía de Guajará (A, B, C, D e E) e ao rio Guamá (F) nos anos de 1962 e 2002..... | 83 |
| Figura 54. Evolução temporal da energia cinética durante os 30 dias, ou 720 horas, de simulação numérica do cenário chuvoso..... | 86 |
| Figura 55. Séries temporais da vazão (em m ³ /s) na seção A, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 87 |
| Figura 56. Séries temporais da vazão (em m ³ /s) na seção B, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 87 |
| Figura 57. Séries temporais da vazão (em m ³ /s) na seção C, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 88 |
| Figura 58. Séries temporais da vazão (em m ³ /s) na seção D, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002..... | 88 |

Figura 59. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção E, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.....89

Figura 60. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção F, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.....89

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela I. Dados das estações fluviométricas existentes nos rios Acará, Guamá e Moju..... | 12 |
| Tabela II. Velocidades máximas (em m/s) de fluxo e posição da maré (tempo após baixa mar – BM ou tempo após preamar – PM) durante maré de sizígia e quadratura na seção S1 a 1m da superfície..... | 27 |
| Tabela III. Velocidades máximas (em m/s) de fluxo e posição da maré (tempo após baixa mar – BM ou tempo após preamar – PM) durante maré de sizígia e quadratura na seção S2 a 1m da superfície..... | 28 |
| Tabela IV. Velocidades máximas (em m/s) de fluxo e posição da maré (tempo após baixa mar – BM ou tempo após preamar – PM) durante maré de sizígia e quadratura na seção S5 a 1m da superfície..... | 28 |
| Tabela V. Principais características das grades construídas com os dados de 1962 e 2002..... | 38 |
| Tabela VI. Coeficientes e parâmetros usados no modelo hidrodinâmico POM..... | 58 |
| Tabela VII. Velocidades máximas (em m/s) da componente meridional da velocidade e durante marés de sizígia e quadratura na seção S1..... | 61 |
| Tabela VIII. Velocidades máximas (em m/s) da componente meridional da velocidade durante marés de sizígia e quadratura na seção S2..... | 61 |
| Tabela IX. Velocidades máximas (em m/s) da componente zonal da velocidade durante marés de sizígia e quadratura na seção S5..... | 61 |
| Tabela X. Localização e profundidade dos pontos analisados..... | 70 |
| Tabela XI. Valores máximos de elevação da superfície livre, em m, para os pontos de interesse nas simulações dos períodos chuvosos de 1962 e 2002..... | 72 |
| Tabela XII. Valores máximos de elevação de superfície livre, em m, para os pontos de interesse nas simulações dos períodos de estiagem de 1962 e 2002..... | 72 |
| Tabela XIII. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (U _{max}) e meridional (V _{max}), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário chuvoso de 1962..... | 79 |
| Tabela XIV. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (U _{max}) e meridional (V _{max}), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário chuvoso de 2002..... | 80 |

| | |
|--|----|
| Tabela XV. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (Umax) e meridional (Vmax), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário de estiagem de 1962..... | 81 |
| Tabela XVI. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (Umax) e meridional (Vmax), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário de estiagem de 2002..... | 81 |
| Tabela XVII. Áreas, em m ² , das seções A, B, C, D, E e F nos anos de 1962 e 2002... | 84 |
| Tabela XVIII. Valores das vazões, em m ³ /s, calculadas para as seções A, B, C, D, E e F, com os resultados das simulações dos períodos chuvosos de 1962 e 2002..... | 85 |
| Tabela XIX. Valores das vazões, em m ³ /s, calculadas para as seções A, B, C, D, E e F, com os resultados das simulações dos períodos de estiagem de 1962 e 2002..... | 86 |

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo se torna crescente a importância que a região costeira desempenha sob o ponto de vista do desenvolvimento sócio-econômico. A ocupação da costa e seu uso são principalmente relacionados à exploração da indústria portuária, turística e imobiliária, ao desmatamento e à implementação da pecuária ou monocultura, além do uso das condições naturais para infra-estrutura petrolífera e indústrias em geral. Essas alterações, se desenvolvidas de forma inadequada, podem comprometer as características naturais do ambiente trazendo, em decorrência, uma série de impactos ambientais aos seus ecossistemas.

Em função dessa importância, os estuários, um dos mais importantes ecossistemas da zona costeira, vêm sendo alvo de diversos estudos. Dentre eles, o conhecimento a respeito das características hidrodinâmicas se mostra cada vez mais necessário, já que permite uma visão dinâmica dos processos oceanográficos naturais atuantes na região, bem como a avaliação dos impactos associados a ações antrópicas, como navegação, obras costeiras e derrames de poluentes.

A grande variabilidade temporal e espacial observada em regiões estuarinas sugere que um estudo mais detalhado da hidrodinâmica destas regiões, realizado somente com base em estudos de campo, se tornaria de difícil realização, pois para tal seria necessário um grande número de observações, e de alto custo, já que a coleta de dados é uma etapa onerosa (MONTEIRO *et al.*, 2005).

Dessa forma, modelos numéricos computacionais têm sido amplamente usados em simulações hidrodinâmicas de estuários, podendo ser aplicados na caracterização da circulação e até mesmo no planejamento e gestão de sistemas costeiros. Nas duas últimas décadas uma grande evolução na modelagem hidrodinâmica vem ocorrendo, fazendo com que os modelos apresentem cada vez mais sofisticadas técnicas de interpolação e extrapolação de dados de campo, tanto no domínio espacial quanto temporal (MONTEIRO *et al.*, 2005).

Exemplo da realidade observada em muitos estuários, a Baía de Guajará, localizada no estado do Pará, vem apresentando alterações em sua hidrodinâmica e morfologia de fundo. Estudos como os de MENDES *et al.* (2004), MIRANDA & MENDES (2007) e GREGÓRIO (2008) acompanharam as dinâmicas batimétrica e morfológica do fundo da Baía de Guajará. Seus resultados confirmam que a baía vem sofrendo um intenso processo de assoreamento ao longo do tempo, causado principalmente pela grande quantidade de sedimento em suspensão nos rios que nela deságuam, associado a uma perda histórica da capacidade de transporte desses sedimentos (MIRANDA, 2006 *apud* MAGALHÃES, 2007).

As questões relativas ao entendimento sobre a circulação da Baía de Guajará e de que forma as variações na batimetria apresentadas ao longo do tempo pela baía modificaram o padrão de circulação local, podem ser investigadas através do auxílio de um modelo hidrodinâmico. Considerando as forçantes ambientais específicas da área, como descarga de água doce, o regime de marés e o efeito do vento, e suas variações durante as estações do ano, torna-se possível uma boa interpretação dos processos dominantes na região.

Visando o entendimento do cenário exposto, são apresentadas, no capítulo dois, as principais características relacionadas à hidrodinâmica da Baía de Guajará, quais sejam: meteorológicas, oceanográficas, hidrográficas e morfológicas. No capítulo três é descrita a metodologia empregada na elaboração do estudo. No capítulo quatro os resultados obtidos são expostos e, no capítulo seguinte, a discussão sobre os resultados e as conclusões são apresentadas.

1.1. JUSTIFICATIVA DO TEMA E MOTIVAÇÃO

O entendimento da hidrodinâmica da Baía de Guajará, feito através da construção de um modelo numérico, é de grande valia em função do destaque desta região nos campos social, econômico e ambiental e da aplicabilidade, cada vez maior, deste tipo de técnica.

Além da importância ecológica deste sistema estuarino, formado por regiões de alta sensibilidade ambiental, na Baía de Guajará são desenvolvidas importantes atividades econômicas e sociais. Nesta área há uma concentração de indústrias e núcleos habitacionais da região metropolitana de Belém e a população local utiliza as várzeas e rios desta área como fonte de subsistência alimentar e econômica (GONÇALVES & SOUZA FILHO, 2005), além de usá-los como via de transporte, para a prática de esportes e lazer (GREGÓRIO *et al.*, 2006).

Na área existe um intenso tráfego de embarcações dos mais variados portes e transporte e atividades de venda de combustíveis em postos flutuantes (balsas), além de atividades portuárias, como as que ocorrem no Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (Miramar) e no Terminal Portuário do Outeiro (GREGÓRIO *et al.*, 2006).

Todas essas atividades em conjunto representam um risco potencial ao ambiente, já que podem produzir poluições acidentais, resultando em derrames de óleo, seus derivados ou outros contaminantes para o ambiente.

Um modelo da circulação da Baía de Guajará possibilitará a utilização de modelos de dispersão de poluentes. Desta forma, o modelo hidrodinâmico da Baía de Guajará poderá ser usado em casos de desastres que envolvam derrames destes poluentes, como subsídio para que sistemas de tomadas de decisão adotem medidas de resposta e controle mais eficazes num espaço de tempo mais curto, como sugerido por RIBAS (2004). Além disso, as conseqüências ambientais e sociais para a área de estudo em caso de acidentes envolvendo derramamento de poluentes poderão ser eficazmente avaliadas.

As variações batimétricas e morfológicas apresentadas ao longo do tempo pela Baía de Guajará, como alterações nas dimensões e formas de bancos sedimentares e canais (MIRANDA, 2006 *apud* MAGALHÃES, 2007), e determinadas por levantamentos batimétricos feitos recentemente, serão representadas em um modelo hidrodinâmico, já que alterações na configuração de fundo da baía afetam no seu padrão de circulação. Desta forma, o modelo hidrodinâmico será capaz de representar a circulação em função das alterações na configuração de fundo e, conseqüentemente, poderá dar suporte a ações de prevenção de acidentes.

Alterações na hidrodinâmica local podem contribuir, no caso do aumento da velocidade do escoamento, para a aceleração de processos erosivos nas margens da baía. Os modelos hidrodinâmicos, neste caso, poderiam servir para a avaliação das possíveis e melhores formas de contenção do processo de erosão, bem como na identificação das áreas de maior sensibilidade.

Além disso, o modelo hidrodinâmico poderá funcionar como método de auxílio para estudos, projetos, gestão e gerenciamento de recursos hídricos, pois permite a integração dos processos atuantes em corpos d'água naturais, que são ambientes extremamente complexos (ROSMAN, 2001).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Caracterizar a variabilidade hidrodinâmica do sistema estuarino da Baía de Guajará, localizada no estado do Pará, frente às variações da morfologia do fundo observadas através de resultados de levantamentos batimétricos realizados nos anos de 1962 e 2002.

1.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Caracterizar o padrão de circulação da Baía de Guajará em função da variação dos forçantes ambientais, a saber: vazão dos rios, maré e vento.

2. ÁREA DE ESTUDO

A Zona Costeira Amazônica Brasileira (ZCAB) representa cerca de 35% da costa do país e estende-se por mais de 2.500 km, desde o Cabo Orange, no Amapá, até a Ponta de Tubarão, no Maranhão, abrangendo a costa dos estados do Amapá, Pará e Maranhão (PEREIRA, 2007).

Dona de características hidrodinâmicas e climatológicas únicas no Brasil, tais como elevada precipitação anual (de até 3.300 mm), altas temperaturas (maiores que 20°C) com baixa variação térmica anual, ampla plataforma continental (cerca de 330 km), regime de macromarés (com valores máximos de 8 m no Maranhão, 6 m no Pará e 12 m no Amapá) e descarga do maior rio do mundo em termos de extensão e volume, o rio Amazonas (PEREIRA, 2007).

De grande beleza natural de seus ambientes e ecossistemas costeiros, a ZCAB possui uma das maiores faixas contínuas de manguezal do mundo (KJERFVE *et al.*, 2002 *apud* PEREIRA, 2007), bem como outros ambientes, como: planícies de marés, pântanos, planícies de inundação, estuários, praias, dunas e florestas tropicais (PEREIRA, *op. cit.*).

Na zona central da ZCAB está localizado o estuário do rio Pará, que é fortemente influenciado pelo rio Amazonas através da conexão entre esses rios proporcionada pelo furo¹ de Breves, a sudoeste da Ilha de Marajó (GREGÓRIO & MENDES, 2009). Com cerca de 300 km de extensão, o estuário do rio Pará inicia-se na Baía das Bocas, no município de Breves, prosseguindo pelo rio Pará, que recebe toda a massa de água do rio Tocantins (SENNA & LOPES, 2008).

É neste estuário que a Baía de Guajará está inserida (AB'SABER, 2006 *apud* SENNA & LOPES, 2008, GREGÓRIO & MENDES, 2009). Situada, aproximadamente, entre os paralelos 1° 22' S e 1° 30' S e os meridianos 48° 25' W e 48° 35' W (PINHEIRO, 1987 *apud* BARROS *et al.*, 2005), a Baía de Guajará (Fig. 1) possui cerca de 30 Km de extensão e 4 Km de largura e se distancia cerca de 120 Km do Oceano Atlântico (BARROS *et al.*, 2005).

A margem esquerda da Baía de Guajará é composta de numerosas ilhas e canais, sobressaindo-se as ilhas das Onças, Jararaca, Mirim, Paquetá Açu e Jutubá (Fig. 2). Ao longo da margem direita encontra-se a cidade de Belém e mais ao norte, separados pelos furos do Maguari e das Marinhas, as ilhas do Outeiro e do Mosqueiro, respectivamente (Fig. 2).

¹ Denominação regional amazônica para os braços d'água que ligam um curso d'água a outro ou a um lago (GUERRA, 1975).

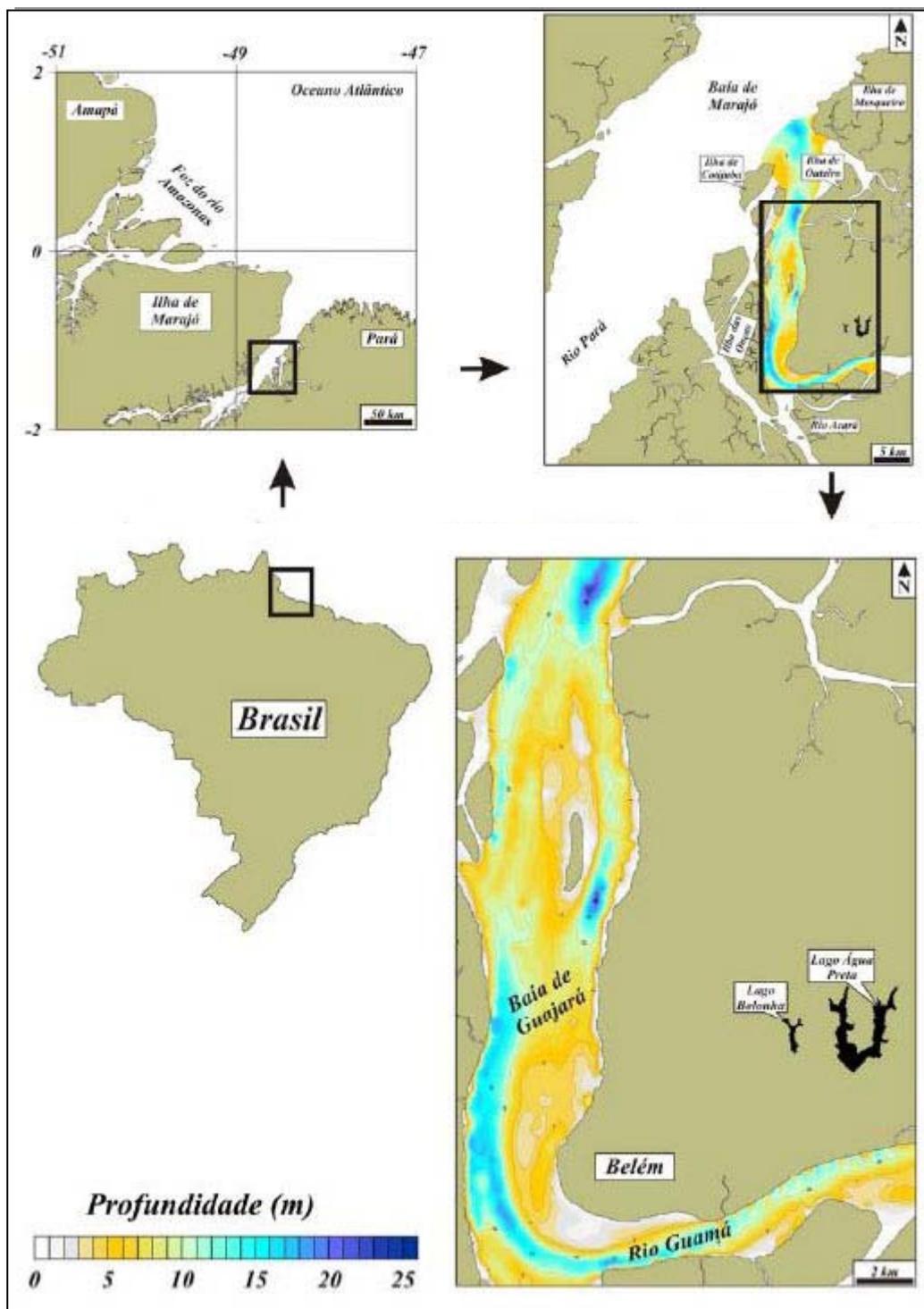


Figura 1. Localização da Baía de Guajará, no Pará.

Fonte: GREGÓRIO (2008).

De suas águas ainda provém grande quantidade de peixes, como o Pirarucu, presentes à mesa dos paraenses. Barcos de diferentes portes e balsas cruzam suas águas como meios de transporte, tanto de passageiros como de cargas.

Suas margens acomodam os principais patrimônios histórico-culturais de Belém, tais como o Mercado Ver-o-Peso, Estação das Docas e o Forte do Castelo do Senhor Santo Cristo do Presépio de Belém.

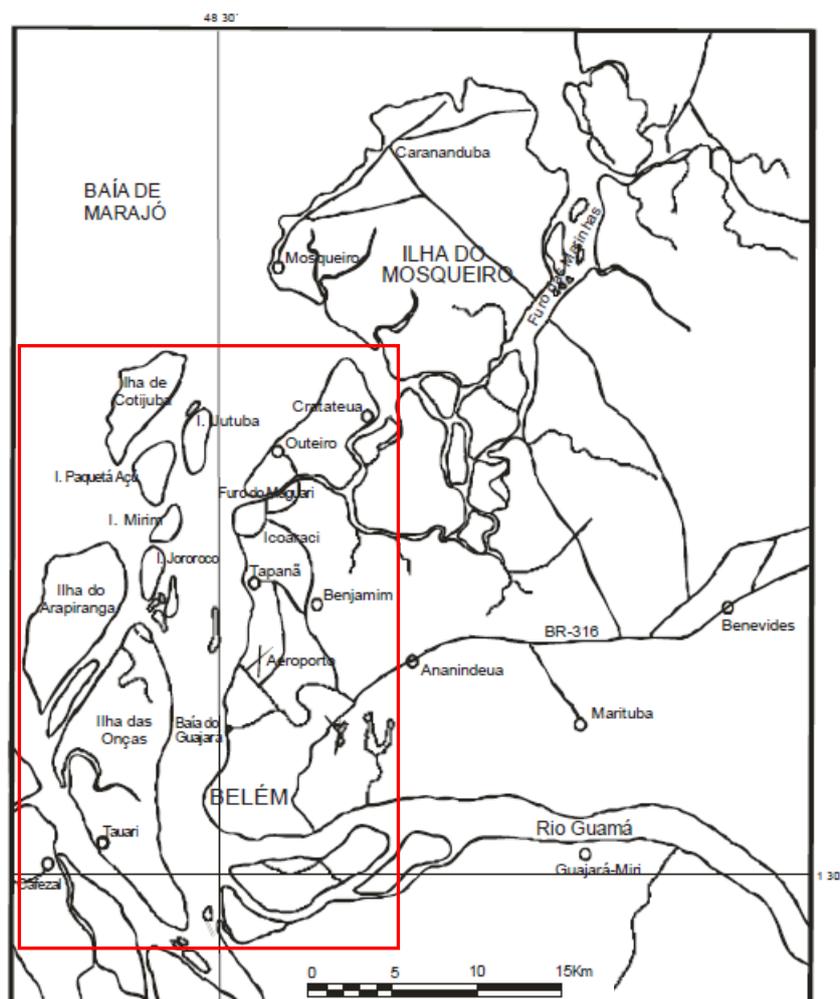


Figura 2. Baía de Guajará e, em destaque, as ilhas que compõem suas margens. Modificado de SILVEIRA (1989).

Em sua margem direita, em frente à Ilha das Onças, localiza-se o Porto de Belém, que movimenta cerca de 1.000.000 t de carga por ano, sendo que as principais cargas operadas são: madeira, pimenta, palmito, peixe, camarão, castanha-do-Pará e trigo (COMPANHIA DOCAS DO PARÁ, 2009).

A uma distância de 5 Km do Porto de Belém, está instalado o Terminal Petroquímico Nicolau Bentes Gomes (Miramar), projetado para realizar importação e distribuição de inflamáveis líquidos e gasosos dentre eles: óleo diesel, gás liqüefeito de petróleo (G.L.P.), querosene para avião e gasolina comum e também abastecimento de navios com a utilização de balsas tanques (COMPANHIA DOCAS DO PARÁ,

2009). Estatísticas do ano de 2009 demonstram que neste ano, dos derivados de petróleo importados no Terminal Miramar, cerca de 960.000 t foram somente de óleo diesel (Fig. 3).

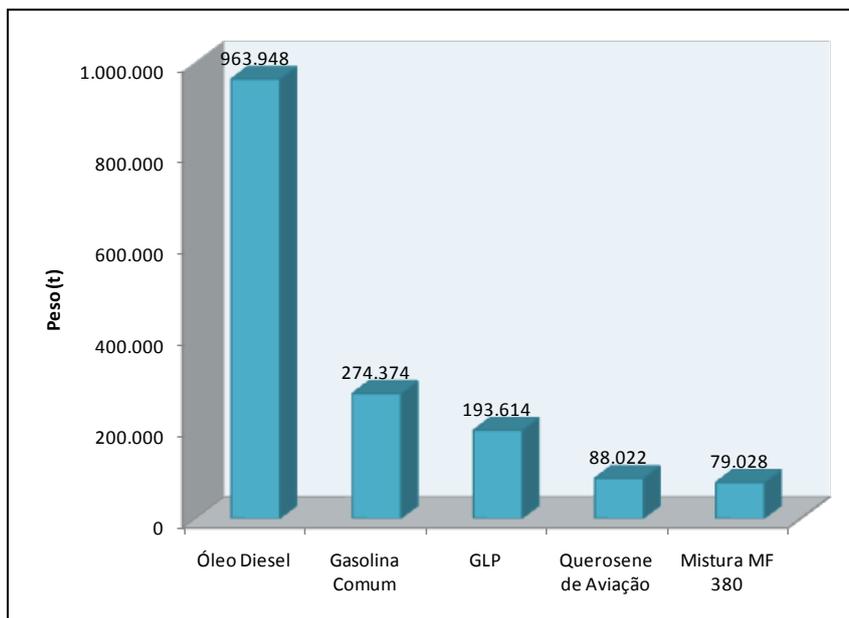


Figura 3. Os cinco tipos de cargas mais importados no ano de 2009 no Terminal Miramar. Modificado de COMPANHIA DOCAS DO PARÁ (2009).

O Terminal Portuário do Outeiro, a 38 Km do Porto de Belém, movimenta dois tipos de cargas: granéis sólidos, como soja, trigo, cimento e cavacos de madeira, e granéis líquidos, especialmente os derivados de petróleo (COMPANHIA DOCAS DO PARÁ, 2009).

Indústrias e núcleos habitacionais também são encontrados às margens da baía e muitos pontos de lançamento de efluentes domésticos e industriais despejam diariamente grande volume de resíduos sólidos e líquidos diretamente nas águas da baía (SARAIVA, 2007). Outras fontes poluidoras incluem postos de abastecimento para embarcações, pequenos portos sem controle ambiental e embarcações velhas encalhadas (SARAIVA, *op. cit.*).

Os principais fatores relacionados às características hidrodinâmicas da Baía de Guajará estão descritos nos capítulos a seguir.

2.1. CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS

O clima da região é quente e úmido, com umidade relativa média do ar de 84 %, pressão atmosférica média anual de 1010 hPa e precipitação pluviométrica total média anual de 2893,1 mm, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (1992 *apud* SOUSA *et al.*, 2006).

Não há distribuição regular das chuvas ao longo do ano. Existe uma redução no volume de chuvas entre os meses de junho a novembro, que é a estação “menos chuvosa”, chamada regionalmente de verão, e aumento no volume de chuvas entre os meses de dezembro a maio, estação “chuvosa” denominada regionalmente como inverno (PINHEIRO, 1987). A partir da comparação entre os resultados apresentados por Brasil Sudam (1974 *apud* PINHEIRO, 1987) e os obtidos na estação meteorológica do Campus da Universidade Federal do Pará, PINHEIRO (1987) concluiu que janeiro, fevereiro e março são os meses mais chuvosos, enquanto julho, agosto e setembro são os meses menos chuvosos.

Para a região de Belém, segundo dados das normais climatológicas do INMET, a temperatura média do ar apresenta pequena variação sazonal, registrando valores entre 26° C e 26,5° C durante todo o ano (PIATAM- MAR, 2008).

Através de uma análise das séries temporais de temperaturas máximas, médias e mínimas para o ano de 2006, na estação meteorológica de Belém, para os meses de janeiro, abril, julho e outubro, observa-se a ausência de variação sazonal da temperatura, que neste ano ficou na faixa de 26° C a 28° C, com um máximo de 29° C registrado no mês de outubro (Fig. 4), conforme análises do projeto PIATAM-MAR (2008).

Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, na Zona Litorânea Norte-Nordeste, faixa costeira que se estende entre o extremo norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no Rio Grande do Norte, os ventos são controlados primariamente pelos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas (AMARANTE *et al.*, 2001). A combinação entre as brisas diurnas e os alísios de leste resulta em ventos médios anuais entre 5 m/s e 7,5 m/s na parte norte dessa região, que abrange os litorais do Amapá e Pará (AMARANTE *et al.*, *op. cit.*).

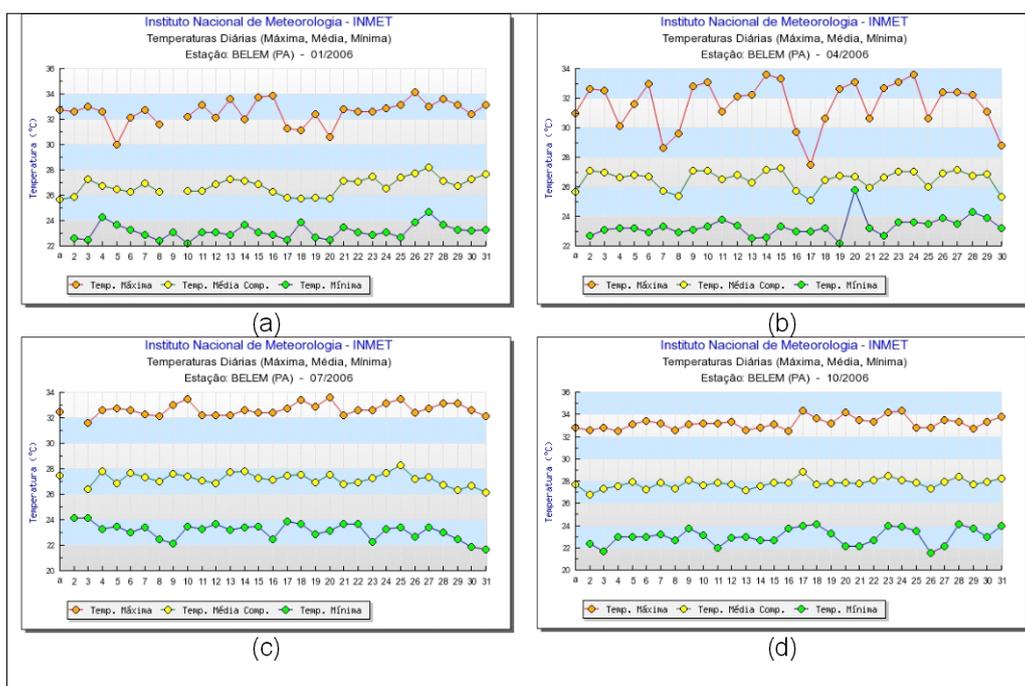


Figura 4. Série temporal de temperaturas mínima, média e máxima (em graus Celsius), para a estação meteorológica do INMET localizada em Belém, nos meses de a) janeiro, b) abril, c) julho e d) outubro de 2006.

Fonte: PIATAM-MAR (2008).

2.2. CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS

De acordo com a Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente - SECTAM (2009), os rios Guamá, Moju e Acará, são as principais drenagens da sub-bacia Guamá-Moju (Fig. 5), que possui uma área de aproximadamente 87.400 km² e corresponde a 7 % da área territorial do estado do Pará (GREGÓRIO & MENDES, 2009).

Com larguras superiores a 1 Km, o rio Guamá tem sua nascente nas proximidades do município de Ipixuna do Pará, seguindo na direção sul-norte e depois de banhar o município de Ourém segue em direção Leste-Oeste (SECTAM, 2009). Seus afluentes mais importantes pela margem esquerda são os rios Capim, Acará e Moju.

O rio Acará nasce no município de Tailândia correndo no sentido sul-norte e cortando o município de Acará, banhando a sua sede municipal pela margem esquerda, indo desembocar na confluência do rio Moju com o rio Guamá (SECTAM, 2009). Seus principais afluentes são os rios Aiu-açu, Acará-mirim e Tomé-açu.

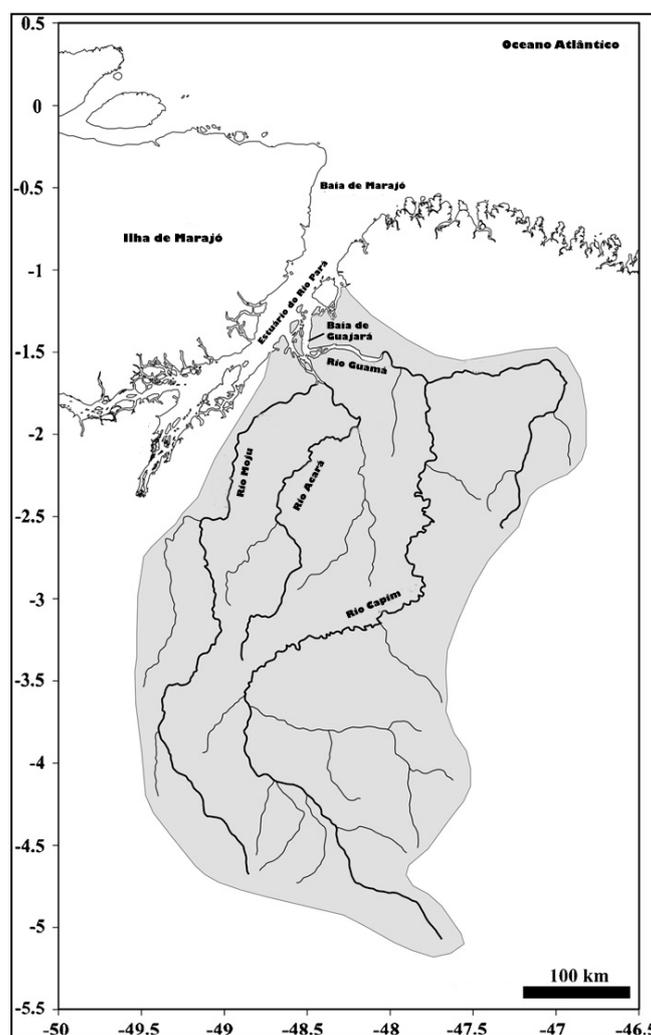


Figura 5. Sub-bacia Guamá-Moju e suas principais linhas de drenagem.
Modificado de GREGÓRIO & MENDES (2008).

O rio Moju nasce no município de Rondon do Pará, atravessa os municípios de Goianésia, Breu-Branco, Moju e faz limite natural entre os municípios de Abaetetuba e Moju (SECTAM, 2009). Seu afluente principal é o rio Camarí. Tem mais de 800 km de extensão e sua largura, na confluência com o rio Acará (chamada de Acará-Moju), atinge 500 m.

É na confluência entre os rios Guamá e Acará-Moju que ocorre a formação da Baía de Guajará, que se estende até a Ilha do Mosqueiro, onde passa a fazer parte da Baía do Marajó, que tem ligação direta com o Oceano Atlântico (BARROS *et al.*, 2005, GREGÓRIO *et al.*, 2006). Também recebe contribuição das águas do rio Pará (MENDES *et al.*, 2004).

O rio Guamá desempenha forte influência na Baía de Guajará, seja pela descarga hídrica ou sedimentar, e sua contribuição é percebida ao longo de toda a margem direita da baía (GREGÓRIO, 2008).

Ao longo desses rios e seus afluentes estão posicionadas estações fluviométricas (operantes ou desativadas) mantidas pela Agência Nacional de Águas (ANA) e outras operadoras. Alguns dos dados registrados nessas estações, disponibilizados no Sistema de Informações Hidrológica – HidroWeb, estão apresentados na tabela I abaixo.

Tabela I. Dados das estações fluviométricas existentes nos rios Acará, Guamá e Moju.

| CÓDIGO | ESTAÇÃO | RIO | LATITUDE | LONGITUDE | ÁREA DE DRENAGEM (Km²) |
|---------------|-----------------------------|------------|-----------------|------------------|--|
| 18090000 | Fazenda Quinco | Moju | 03° 18' 00" | 54° 49' 00" | 2509 |
| 18100000 | Sítio Cajueiro | Moju | 03° 08' 00" | 54° 47' 00" | 3178 |
| 31020000 | Cachoeira Tracambeua | Moju | 03° 30' 46" | 49° 12' 48" | 3622 |
| 31030000 | Fazenda Urucure | Acará | 02° 12' 00" | 48° 30' 00" | 5302 |
| 31040000 | Acará | Acará | 01° 57' 00" | 48° 11' 00" | 11940 |
| 31100000 | Repartimento | Guamá | 02° 24' 00" | 47° 13' 00" | - |
| 31400000 | Guamá | Guamá | 02° 21' 00" | 47° 13' 00" | - |
| 31410000 | São Pedro (Aldeia Indígena) | Guamá | 01° 50' 44" | 46° 58' 58" | - |
| 31490000 | Vila Capoeira | Guamá | 01° 51' 59" | 48° 03' 16" | 4402 |
| 31500000 | Cachoeirinha | Guamá | 01° 33' 00" | 47° 04' 00" | 6745 |
| 31520000 | Bom Jardim | Guamá | 01° 33' 41" | 47° 05' 48" | 6760 |
| 31630000 | Ourém | Guamá | 01° 33' 11" | 47° 06' 50" | 6344 |

Modificado de AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2009).

Das estações fluviométricas existentes nestes rios, nenhuma delas tem um posicionamento próximo à desembocadura dos rios na Baía de Guajará, conforme apresentado na figura 6. Por exemplo, a estação fluviométrica Bom Jardim, localizada no rio Guamá, distancia-se cerca de 150 Km de Belém (PINHEIRO, 1987).

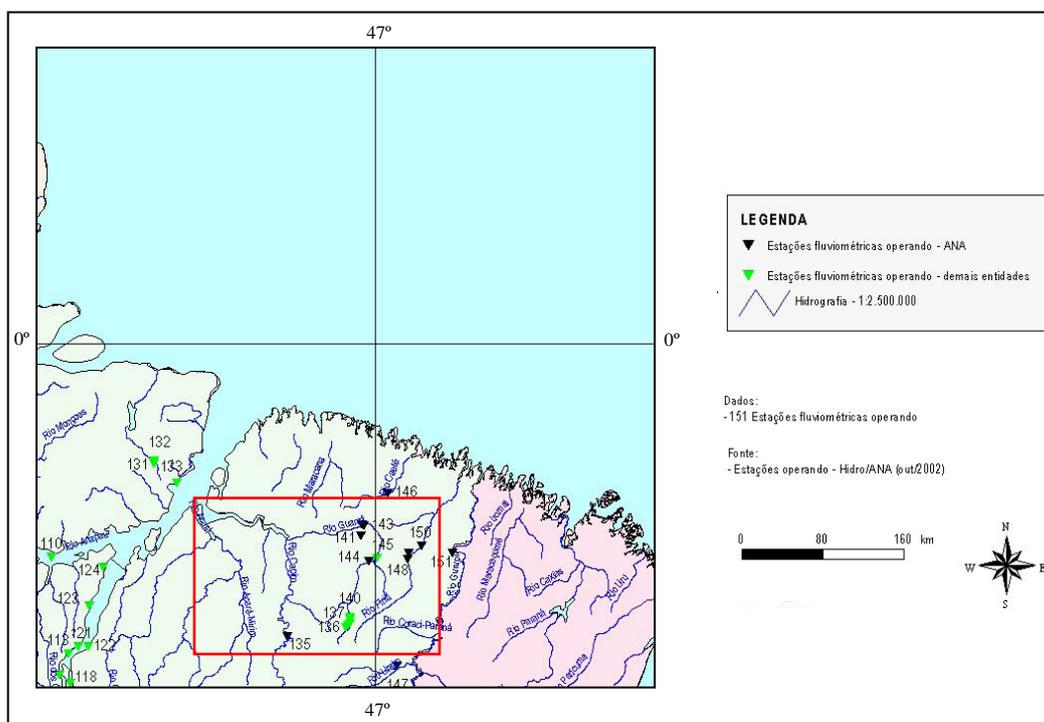


Figura 6. Algumas das estações fluviométricas disponíveis no estado do Pará. Em destaque, as estações mais próximas à Baía de Guajará.

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (2009).

As variações nas vazões dos rios Acará, Guamá e Moju e seus afluentes são significativas durante o ano e estão relacionadas ao regime de chuvas a que a região está sujeita, obedecendo a alternância entre o período chuvoso e o de estiagem (PINHEIRO, 1987). Dados obtidos da estação Bom Jardim entre os anos de 1965 e 1975 demonstram que durante este período as vazões máximas ocorreram em março, abril e maio, período final da estação chuvosa (PINHEIRO, *op. cit.*). As variações obtidas entre as vazões do rio nestes mesmos meses e nos últimos meses da estação de estiagem (onde são encontradas as vazões mínimas) são muito grandes: em muitos anos a vazão máxima foi dez vezes superior à vazão mínima (PINHEIRO, *op. cit.*).

2.3. MORFOLOGIA E SEDIMENTOS DE FUNDO

Segundo MIRANDA & MENDES (2007), canais (de enchente e de vazante), depósitos sedimentares (bancos, barras e planícies areno-lamosas) e afloramentos rochosos são os três tipos de feições fisiográficas que podem ser encontradas no assoalho da Baía de Guajará (Fig. 7).

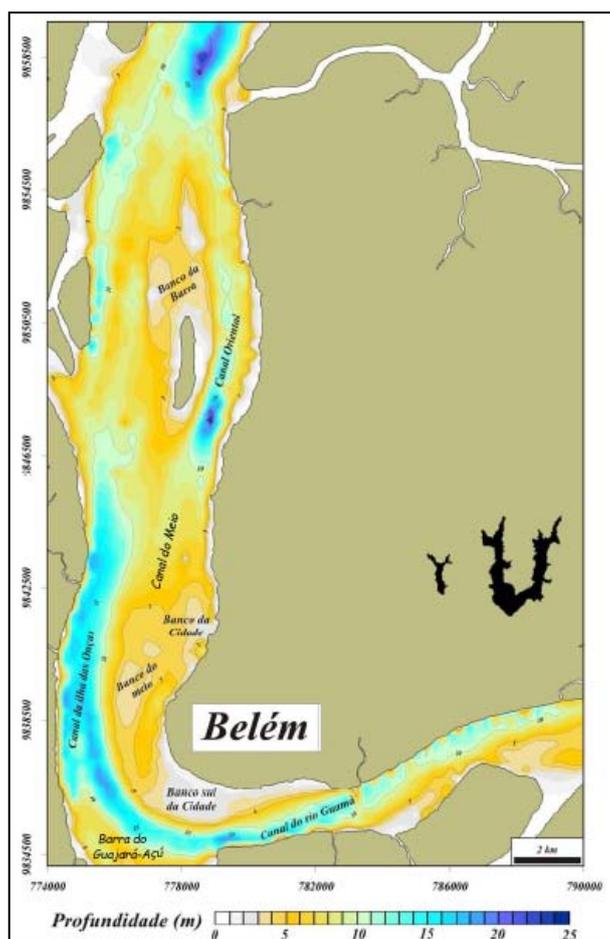


Figura 7. Unidades morfológicas encontradas na Baía de Guajará.

Fonte: GREGÓRIO (2008).

Os canais da baía são os da Ilha das Onças, do Meio, Oriental e do rio Guamá. Correntes de enchente e de vazante podem ser observadas em todos os canais, sendo que no Canal da Ilha das Onças há o predomínio de correntes de vazante, enquanto nos canais do Meio e Oriental predominam as correntes de enchente.

Considerado por PINHEIRO (1987) como a principal feição da Baía de Guajará, o Canal da Ilha das Onças possui cerca de 1 Km de largura e profundidades entre 10 m e 20 m. É um prolongamento do talvegué do rio Guamá que acompanha a margem

esquerda do rio e, a partir da sua foz, direciona-se para a direita até o norte da Ilha das Onças (MIRANDA & MENDES, 2007). Ao longo da margem esquerda da baía apresenta forma assimétrica em V e na confluência com o rio Guamá apresenta um formato em W (GREGÓRIO, 2008).

O Canal do Meio, com largura média de 1 Km e profundidades entre 8 m e 10 m, segue por aproximadamente 16 Km na direção norte até o Banco da Cidade, onde é deslocado para a margem direita da baía, originando o Canal Oriental (MENDES *et al.*, 2005).

Principal acesso marítimo ao Porto de Belém e ao Terminal Petroquímico Miramar, o Canal Oriental está localizado entre a Ilha da Barra e a margem direita da Baía de Guajará e se estende até a Ilha de Caratateua (MIRANDA & MENDES, 2007). Sua largura é cerca de 400 m e a profundidade máxima encontrada é de 12 m (MIRANDA & MENDES, *op. cit.*).

O Canal do Rio Guamá bordeja a margem sul da cidade de Belém e possui direção NE-SW, com largura média de 600 m e profundidade de aproximadamente 13 m (GREGÓRIO, 2008). Na foz do rio apresenta uma depressão de cerca de 18 metros de profundidade, denominada por SILVEIRA (1989) como Depressão da Ponta de Porto Alegre.

Os depósitos sedimentares da Baía de Guajará são bancos arenosos, que ocupam a porção norte e sudoeste da baía (Banco da Barra); bancos lamosos encontrados na porção sul e sudeste (Banco Sul da Cidade, Banco do Meio e Banco da Cidade) e planícies de maré lamosas que se estendem pela margem direita da baía (GREGÓRIO, 2008).

O Banco da Barra está posicionado no eixo central da Baía de Guajará, com direção N-S (MIRANDA & MENDES, 2007). Sua porção central, denominada nas cartas náuticas da DHN de Ilha da Barra, está emersa e colonizada por vegetação (MIRANDA & MENDES, *op. cit.*).

O Banco Sul da Cidade é uma grande planície de maré lamosa que contorna o litoral sul de Belém, a partir da foz do rio Guamá, até o início da Baía de Guajará (MIRANDA & MENDES, 2007). Sua formação aparentemente é consequência da quebra de energia no encontro entre as correntes de enchente que passam inicialmente pela margem direita da baía e as correntes de final de vazante do rio Guamá (MIRANDA & MENDES, 2007).

Segundo MENDES *et al.* (2004), os bancos do Meio e da Cidade são barras longitudinais dispostas paralelamente ao eixo principal da baía e são limitadas pelo Canal da Ilha das Onças, à oeste, e pelo Canal do Meio, à leste. Estudos demonstram que esses dois bancos eram pouco individualizados até o início dos anos 80 e essa

separação era determinada pelo Canal do Meio (SANTOS, 1982 *apud* MIRANDA & MENDES, 2007). Porém, no final da década de 80 o Canal do Meio já não tinha influência definitiva na separação destes bancos, pois começou a apresentar um assoreamento progressivo (SILVEIRA, 1989).

Os bancos Sul da Cidade, do Meio e da Cidade compõem a unidade morfológica denominada Alto Fundo da Baía, que contorna a borda leste da baía e adentra no rio Guamá (PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989).

Uma outra unidade morfológica é descrita por PINHEIRO (1987) e por SILVEIRA (1989): a Barra do Guajará-Açú. Localizada na confluência entre os rios Guamá e Guajará-Açú, esta feição possui extensão de 2 Km, largura de 200 m e profundidades máximas de 4 m (PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989). Essa barra arenosa é formada, principalmente, por sedimentos transportados pelo rio Acará que são depositados nesta região em virtude da perda de energia de transporte do rio ao atingir a zona de confluência (MIRANDA & MENDES, 2007).

Os afloramentos rochosos denominados pela DHN como Pedras Val-de-Cães, Pedras do Forte e Pedras da Barra se restringem à área entre a Ilha da Barra e a margem leste da baía.

Com o objetivo de realizar um levantamento sedimentológico na Baía de Guajará, GREGÓRIO (2008) coletou, em fevereiro de 2006, 123 amostras de sedimento de fundo ao longo da malha de amostragem apresentada na figura 8.

Em uma de suas análises, GREGÓRIO (2008) utilizou o método de caracterização hidrodinâmica sugerido por PEJRUP (1988 *apud* GREGÓRIO, 2008) para classificar os sedimentos da Baía de Guajará. Esta metodologia conta de um diagrama triangular para a classificação de sedimentos estuarinos, segundo as condições hidrodinâmicas atuantes durante o processo de deposição dos sedimentos. Neste diagrama, a seção I caracteriza ambientes com condições hidrodinâmicas muito baixas, enquanto que as seções II, III e IV, caracterizam ambientes com aumento gradativo da energia. As seções A, B, C e D são indicativas do tipo de sedimento.

O autor descreve que a maioria das amostras da Baía de Guajará se concentrou em cinco grupos: III A, IV A, IV B, IV C e III C (Fig. 9). Sedimentos do grupo III C, que corresponde a forçantes hidrodinâmicas elevadas, distribuem-se pela baía inteira, dominando o setor leste e a margem direita (GREGÓRIO, 2008). Sedimentos do grupo IV C foram observados em alguns pontos da margem direita do rio Guamá, especialmente nas proximidades da orla da UFPA, local cuja intensa erosão vem sendo reportada desde SILVEIRA (1989). Sedimentos do grupo IV A e IV B foram encontrados nos bancos Sul da Cidade, da Cidade e do Meio (GREGÓRIO, 2008).

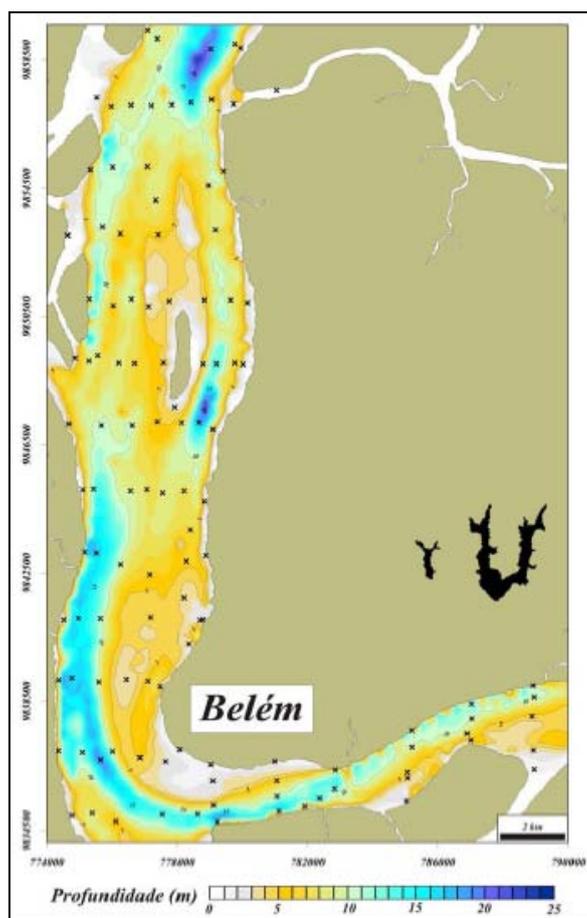


Figura 8. Localização das estações de amostragem sedimentológica.

Fonte: GREGÓRIO (2008).

Os resultados obtidos com o método PEJRUP (1988 *apud* GREGÓRIO, 2008) permitiram concluir que a margem esquerda da baía apresenta regime hidrodinâmico elevado com predominância de sedimentos arenosos e a margem direita também é controlada por um alto regime hidrodinâmico com predominância de sedimentos lamosos, especialmente ao longo da orla de Belém (GREGÓRIO, 2008). Apesar da margem esquerda se mostrar mais dinâmica, a Baía de Guajará e o rio Guamá podem ser considerados um sistema de circulação bastante significativa, já que mais de 95% das amostras foram classificadas em classes de hidrodinâmica alta à muito alta (GREGÓRIO, 2008). De acordo com o autor, a hidrodinâmica local é controlada pela interação entre as correntes de maré e as descargas fluviais.

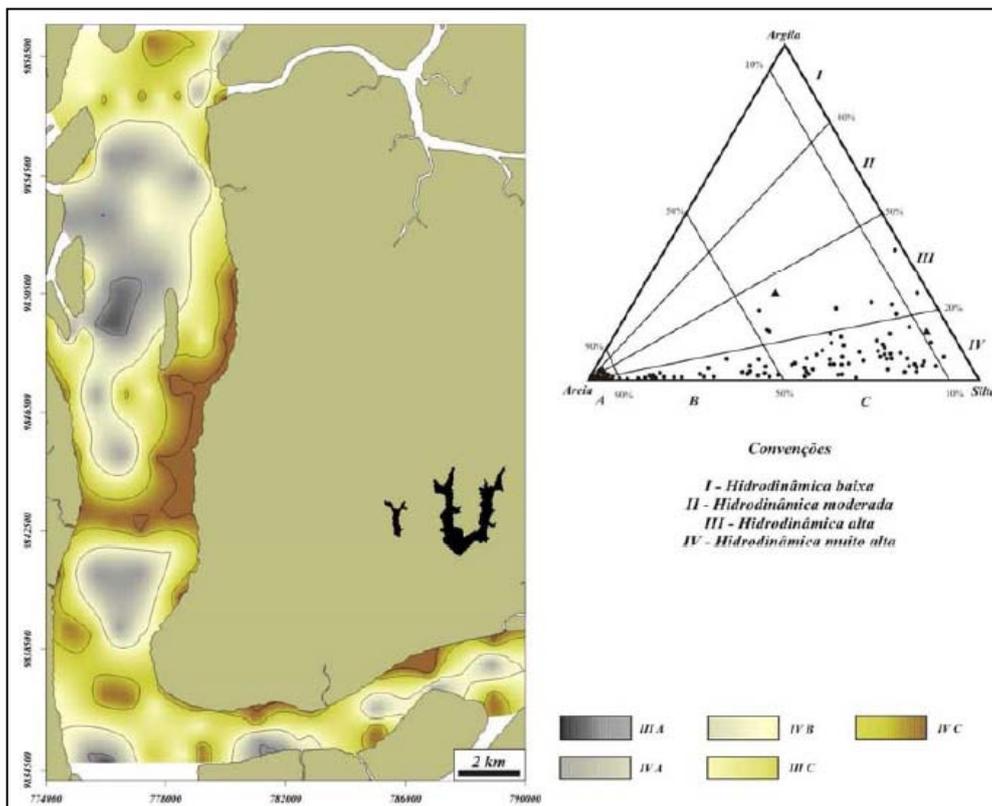


Figura 9. Diagrama de Pejrup aplicado nas amostras coletadas na Baía de Guajará e foz do rio Guamá.

Fonte: GREGÓRIO (2008).

Após avaliarem a morfologia de fundo da Baía de Guajará, PINHEIRO (1987) e PORTOBRÁS (1980 *apud* MIRANDA & MENDES, 2007) concluíram que, em pouco mais de um século, canais profundos e extensos foram destruídos e novos depósitos sedimentares foram formados. Atribuíram tais mudanças às alterações ocorridas na hidrodinâmica local (MIRANDA & MENDES, 2007).

Através da comparação entre cartas batimétricas de 1843, 1961, 1978 e 1985, GREGÓRIO (2008) pôde observar significativas alterações na configuração do fundo da baía (Fig. 10). Os dados da carta de 1843 indicaram que a circulação na baía ocorria principalmente em dois canais: um canal na margem direita (localizado desde o limite superior norte da baía até a Ilha da Barra), provavelmente funcionando como um canal de enchente, e outro na margem esquerda (continuação do talvegue do rio Guamá), que seria uma canal de vazante (GREGÓRIO, *op. cit.*). A região central, de baixa profundidade, pode corresponder ao banco do Meio (GREGÓRIO, *op. cit.*).

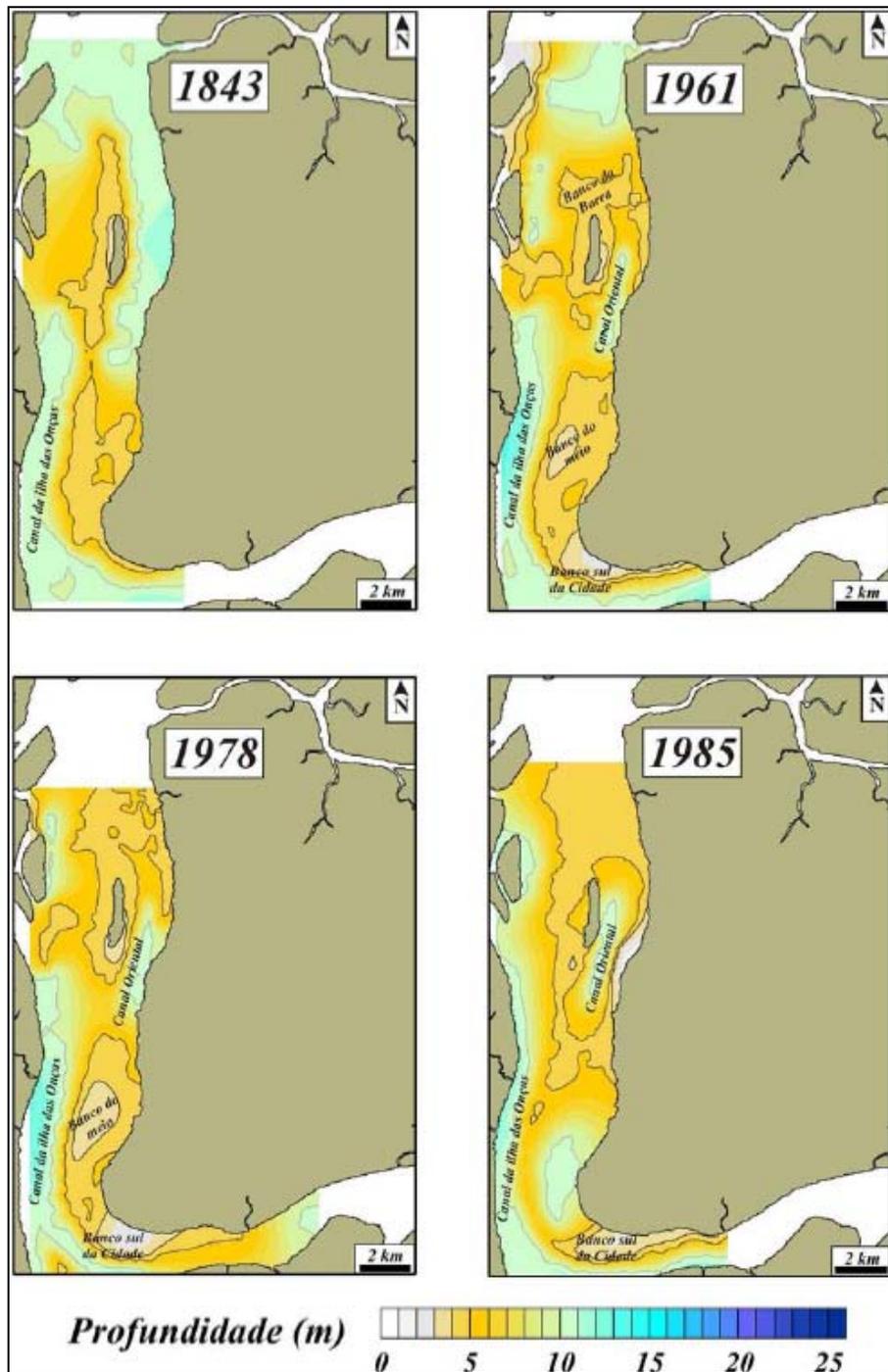


Figura 10. Histórico da evolução batimétrica da Baía de Guajará entre os anos de 1843 e 1985.

Fonte: GREGÓRIO (2008).

Já em 1961, ainda de acordo com GREGÓRIO (2008), o Banco do Meio foi totalmente erodido e o Canal Oriental assoreado, resultando no surgimento do Canal do Meio. Assim, correntes de enchente puderam alcançar a foz do rio Guamá (GREGÓRIO, *op. cit.*). A dissipação de energia e diminuição da competência de

transporte causados pelo encontro entre o fluxo do rio Guamá e as correntes de maré causaria a formação da planície de maré lamosa Banco Sul da Cidade (GREGÓRIO, *op. cit.*). Há também um estreitamento do Canal da Ilha das Onças e a separação da parte superior do Banco do Meio, formando uma zona de cota máxima de 5 m no setor norte-nordeste da baía (GREGÓRIO, *op. cit.*).

As informações de 1978 indicam a estabilização do Canal do Meio. Há a restrição da zona de cota máxima de 5 m à montante da Ilha da Barra, originando o Banco da Barra. No centro sul da baía há o estabelecimento do Banco do Meio, cuja formação estaria também relacionada ao encontro entre correntes de maré e o fluxo do rio, o Canal da Ilha das Onças apresenta poucas variações e o Banco Sul da Cidade apresenta um aumento em suas dimensões (GREGÓRIO, *op. cit.*).

Poucas alterações são observadas através da carta de 1985. Dentre elas, o aumento considerável das dimensões dos bancos do Meio e Sul da Cidade (GREGÓRIO, *op. cit.*).

Através da análise comparativa entre as cartas náuticas nº 316 de 1962 e de 2003 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), MIRANDA & MENDES (2007) objetivaram determinar a taxa de crescimento ou migração das formas de fundo da Baía de Guajará ao longo deste período. Foram realizadas medições longitudinais e laterais, em ambas as cartas, do Banco da Barra, do Canal da Ilha das Onças e do Alto Fundo da Baía.

Os resultados apontam que o Banco da Barra, ao longo das quatro décadas, teve um crescimento para norte de aproximadamente 26 % nas suas dimensões e uma migração (ou crescimento) a uma taxa de 49 m/ano, enquanto o crescimento lateral foi de 112 % a uma taxa de 28 m/ano. O Alto Fundo da Baía teve um crescimento para norte de aproximadamente 7 % nas suas dimensões e uma taxa de 24 m/ano, enquanto o crescimento lateral foi de 22 % a uma taxa de 8,5 m/ano. O Canal da Ilha das Onças teve um crescimento longitudinal de aproximadamente 5 % a uma taxa de 21 m/ano e taxa de crescimento lateral foi de 41 %, o que demonstra que cresceu e migrou para oeste 6,75 m/ano, fato este que pode ser comprovado pelo estabelecimento de forte zona de erosão na margem leste da Ilha das Onças, descrita desde SILVEIRA (1989).

MIRANDA & MENDES (2007) também avaliaram as variações de batimetria sofridas pela Baía de Guajará neste mesmo período. Na primeira análise avaliaram a dinâmica das feições de fundo nos setores norte e sul da baía (Figs. 11 e 12) e em outro estudo definiram 11 perfis perpendiculares ao eixo de maior comprimento da baía (Fig. 13) para que uma comparação entre os anos de 1962 e 2003 pudesse ser feita.

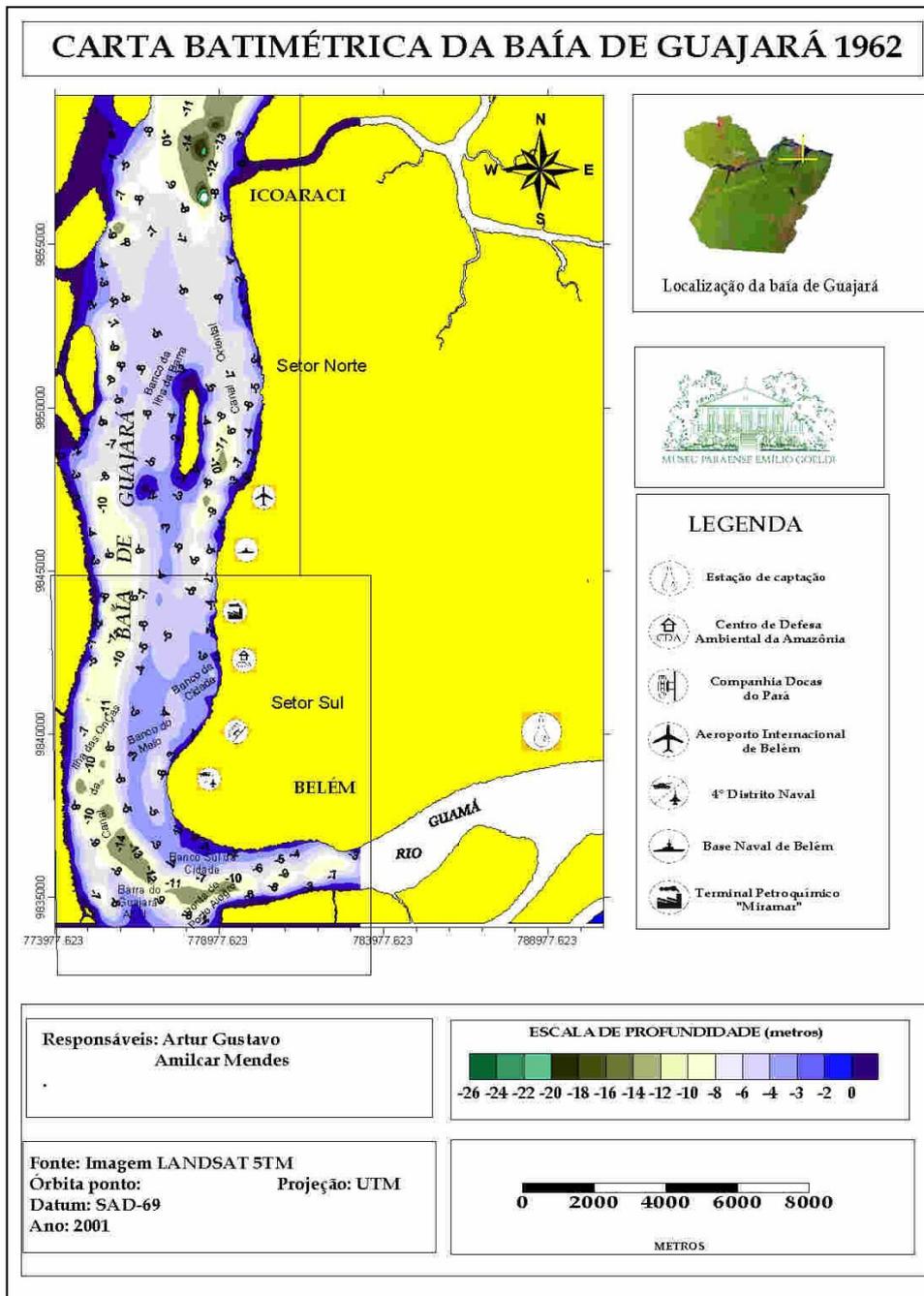


Figura 11. Carta batimétrica da Baía de Guajará feita com dados do ano de 1962.

Fonte: MIRANDA & MENDES (2007).

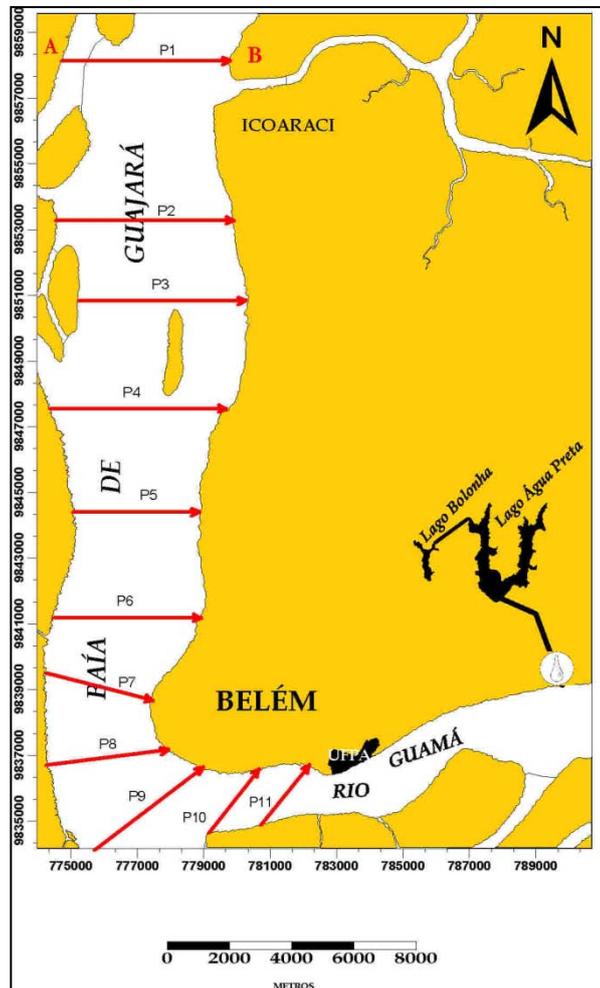


Figura 13. Localização dos perfis batimétricos estabelecidos para análise multitemporal.

Fonte: MIRANDA & MENDES (2007).

A análise integrada desses resultados indicou que a Baía de Guajará, ao longo desse período, passou por intenso processo de assoreamento, especialmente ao norte da Ilha da Barra até as proximidades do porto de Sotave (Icoaraci), em frente ao Porto de Belém até o extremo sul da cidade de Belém e nos bancos da Barra, do Meio, da Cidade e Sul da Cidade (MIRANDA & MENDES, 2007). Por outro lado, o Canal da Ilha das Onças apresentou um aprofundamento da calha em toda sua extensão (MIRANDA & MENDES, 2007).

2.4. CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS

A Baía de Guajará possui zonas rasas, de aproximadamente 5 metros de profundidade, e também canais profundos, com cerca de 25 metros de profundidade (GREGÓRIO & MENDES, 2009).

A salinidade na região é muito baixa não atingindo sequer valores superiores a 5 na boca do estuário (PAIVA *et al.*, 2006). Nos períodos “chuvosos” a salinidade é praticamente nula na baía (GREGÓRIO & MENDES, 2009). Suas águas são ligeiramente ácidas, apresentam temperaturas elevadas em torno de 27,1° C a 33,7° C e baixa transparência (PAIVA *et al.*, 2006).

A maré é semi-diurna, com amplitude entre 2,3 m em marés de quadratura e 3,8 m em marés de sizígia (DHN, 2008 *apud* GREGÓRIO, 2008). Excepcionalmente, em outros períodos as marés na região podem apresentar amplitudes muito acima destas medidas, como em 1923 quando alcançou 4,47 m (LIMA, 1956 *apud* PINHEIRO, 1987). A onda de maré pode ser percebida a cerca de 220 Km da Baía de Marajó, dentro dos rios Guamá e Capim, que também apresentam variações semi-diurnas em seus níveis (RTZ CONSULTANTS, 1975 *apud* PINHEIRO, 1987).

Durante o período de enchente, que dura cerca de 5 horas (PINHEIRO, 1987), as correntes de maré fluem para o sul da Baía de Guajará e no período de vazante, que dura cerca de 7 horas (PINHEIRO, 1987) as correntes de maré fluem para o norte da baía. Segundo PINHEIRO (1987), o atrito de fundo no estuário é responsável por esta acentuada assimetria nas curvas de marés.

Apesar da forte imposição das correntes de marés e do fluxo fluvial, as ondas geradas pelo vento representam um importante agente da dinâmica do estuário Guajará, propiciando a mistura das águas e a ressuspensão praticamente constante dos sedimentos de fundo nos bancos e margens (MOURA, 2007).

Mesmo em condições de ventos fracos, a superfície da água da Baía de Guajará é caracterizada como um sistema relativamente agitado, definindo claramente um regime de fluxo turbulento (MOURA, 2007). Na presença de ventos fracos, durante as chuvas fortes do período “chuvoso”, nas marés de quadratura e no estofo das marés de sizígia, pequenas ondulações são formadas na superfície da água na Baía de Guajará (PINHEIRO, 1987). Vento terral (ventos de sudeste) é responsável pelas maiores ondulações nas águas da baía, que podem atingir até 1m de altura significativa². Ondulações com mais de 1 m de altura significativa podem ocorrer com a associação entre vento terral e o período de vazante, produzindo uma corrente

² A altura significativa da onda (H_s) é uma definição estatística que corresponde à média das maiores ondas, sendo estas um terço do total de ondas observadas.

superficial no sentido norte-noroeste que dificulta manobras de embarcações de pequeno e médio porte, e também através da atuação de ventos de norte-nordeste, gerando ondulações que percorrem praticamente toda a baía (PINHEIRO, 1987).

Com o objetivo de caracterizar a dinâmica estuarina na Baía de Guajará, PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989) analisaram os dados sobre o comportamento das correntes na área apresentados no relatório “Medições de Correntes e Material em Suspensão junto ao Porto de Belém-Pará”, datado de 1980 e realizado pela Empresa de Portos do Brasil S.A. - PORTOBRÁS. As principais informações deste estudo e as principais conclusões feitas pelos autores serão descritas a seguir.

Para a confecção do relatório supracitado, a PORTOBRÁS (1980 *apud* PINHEIRO, 1987) realizou medições de velocidade e direção das correntes no estuário ao longo de 5 seções: duas posicionadas na Baía de Guajará, uma no Canal Carnapijó, uma no rio Moju e a última no rio Guamá. Os dados foram coletados de 30 em 30 minutos, obedecendo o ciclo lunar, da seguinte forma:

- Locais com profundidades inferiores à 5 m: dados coletados em intervalos de 1 m a partir da superfície da água;
- Locais com profundidades entre 5 e 12 m: dados coletados à 1m da superfície, à 1 m do fundo e a cada 2 m no restante do intervalo;
- Locais com profundidade superiores à 12 m: dados coletados à 1 m da superfície, à 1 m do fundo e a cada 3 m no restante do intervalo;

Para análise dos dados de velocidade obtidos pela PORTOBRÁS, PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989) selecionaram apenas três do total de seções correntométricas realizadas (Fig. 14):

- S1, posicionada no extremo norte do cais do porto e transversal à Baía de Guajará;
- S2, desde a Catedral Metropolitana de Belém até a margem direita da Ilha das Onças;
- S3, localizada na porção leste da região, cortando o rio Guamá.

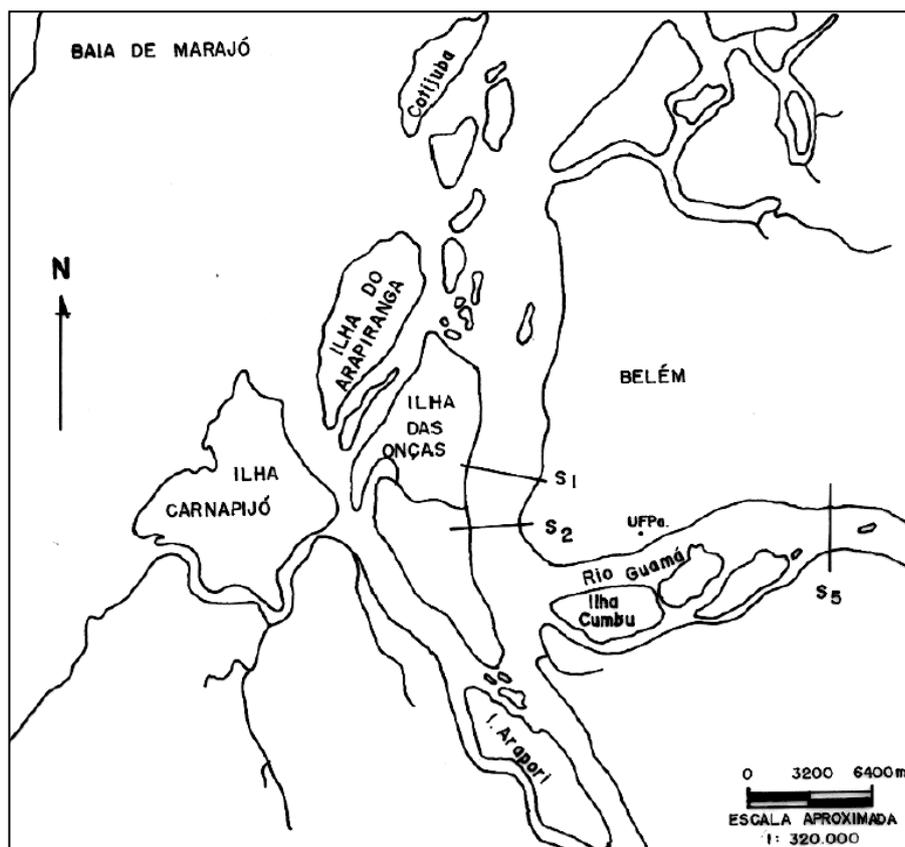


Figura 14. Mapa com a localização das seções correntométricas realizadas pela PORTOBRÁS em 1980 na Baía de Guajará.

Fonte: SILVEIRA (1989).

As seções 1 e 2 contaram com 8 pontos de coleta de dados cada uma, enquanto a seção 5 possuía 4 pontos. Nas seções localizadas na Baía de Guajará (S1 e S2) o ponto número 1 foi posicionado próximo à margem direita e o último ponto de coleta (número 8) próximo à margem esquerda da baía. Já o ponto 1 da seção no rio Guamá (S5) foi posicionado próximo à margem esquerda e o último ponto de coleta (número 4) próximo à margem direita do rio.

De acordo com os resultados obtidos a partir do estudo realizado pela PORTOBRÁS, PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989) concluíram que na Baía de Guajará as velocidades máximas médias mais altas ocorrem durante a sizígia, na enchente, a cerca de 1m da superfície, enquanto as velocidades máximas médias mais baixas ocorrem durante marés de quadratura na vazante, a cerca de 1 m da superfície.

Durante as marés de sizígia são encontradas as velocidades máximas absolutas na Baía de Guajará (Tabs. II e III). Durante a enchente a velocidade máxima observada ocorre no ponto 4 da seção 2, atingindo valor de cerca de 2,10 m/s

(PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989). Durante a vazante a velocidade máxima observada ocorre no ponto 5 da seção 1, alcançando valor de 1,74 m/s (PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989).

Ainda segundo esses autores sobre a Baía de Guajará, durante as marés de sizígia as correntes atingem velocidades máximas cerca de 3 horas após o estofa de baixa-mar e 3 horas e 30 minutos após o estofa de preamar (Tabs. II e III). Já nas marés de quadratura as velocidades máximas são alcançadas cerca de 5 horas após o estofa de baixa-mar e 4 horas após o estofa de preamar.

Tabela II. Velocidades máximas (em m/s) de fluxo e posição da maré (tempo após baixa mar – BM ou tempo após preamar – PM) durante maré de sizígia e quadratura na seção S1 a 1 m da superfície.

| Ponto | SIZÍGIA | | | | QUADRATURA | | | |
|-------|----------|---------------|---------|---------------|------------|---------------|---------|---------------|
| | Enchente | Tempo após BM | Vazante | Tempo após PM | Enchente | Tempo após BM | Vazante | Tempo após PM |
| 01 | 1,05 | 2 h | 0,75 | 3,5 h | 0,70 | 3 h | 0,64 | 3 h |
| 02 | 0,79 | 2,5 h | 0,77 | 4,5 h | 0,67 | 3,5 h | 0,82 | 3,5 h |
| 03 | 1,49 | 3 h | 1,25 | 4,5 h | 0,87 | 3,5 h | 0,78 | - |
| 04 | 1,10 | 3,5 h | 0,70 | - | 1,41 | 3 h | 0,84 | - |
| 05 | 1,68 | 4 h | 1,74 | 3 h | 0,97 | 3,5 h | 0,74 | - |
| 06 | 1,57 | 3,5 h | 1,10 | 3 h | 0,73 | 3,5 h | 0,63 | - |
| 07 | 1,67 | 3,5 h | 1,00 | - | 1,18 | 4 h | 1,15 | - |
| 08 | 1,50 | 4 h | 1,62 | - | 1,07 | 4,5 h | 1,10 | - |

Modificado de PINHEIRO (1987).

Os resultados obtidos para o rio Guamá neste mesmo trabalho indicam que as médias das velocidades máximas são maiores na enchente do que na vazante e situam-se entre 1,04 m/s e 1,60 m/s (PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989).

No rio Guamá durante a enchente a velocidade máxima observada na seção 5 ocorre no ponto 4, atingindo valor de cerca de 1,89 m/s (PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989). Durante a vazante a velocidade máxima observada na seção 5 ocorre no ponto 2, alcançando valor de 1,72 m/s (PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989), conforme apresentado na tabela IV.

Tabela III. Velocidades máximas (em m/s) de fluxo e posição da maré (tempo após baixa mar – BM ou tempo após preamar – PM) durante maré de sizígia e quadratura na seção S2 a 1 m da superfície.

| Ponto | SIZÍGIA | | | | QUADRATURA | | | |
|-------|----------|---------------|---------|---------------|------------|---------------|---------|---------------|
| | Enchente | Tempo após BM | Vazante | Tempo após PM | Enchente | Tempo após BM | Vazante | Tempo após PM |
| 01 | 1,78 | 4 h | 1,19 | 4 h | 1,45 | 4 h | 1,20 | - |
| 02 | 1,96 | 3 h | 1,40 | 4 h | 1,45 | 3 h | 1,15 | 3 h |
| 03 | - | - | - | - | 0,83 | 3,5 h | 0,88 | - |
| 04 | 2,10 | 2,5 h | 1,80 | 4,5 h | 0,84 | 3 h | 0,75 | 3,5 h |
| 05 | 1,86 | 2 h | 1,78 | 5 h | - | - | - | - |
| 06 | - | - | - | - | 0,98 | 3 h | 0,92 | 4 h |
| 07 | 1,73 | 3 h | 1,25 | 4 h | 1,30 | 4,5 h | 1,60 | - |
| 08 | 1,25 | 2,5 h | 1,18 | 5 h | 1,46 | 4 h | 1,18 | 4 h |

Modificado de PINHEIRO (1987).

Tabela IV. Velocidades máximas (em m/s) de fluxo e posição da maré (tempo após baixa mar – BM ou tempo após preamar – PM) durante maré de sizígia e quadratura na seção S5 a 1 m da superfície.

| Ponto | SIZÍGIA | | | | QUADRATURA | | | |
|-------|----------|---------------|---------|---------------|------------|---------------|---------|---------------|
| | Enchente | Tempo após BM | Vazante | Tempo após PM | Enchente | Tempo após BM | Vazante | Tempo após PM |
| 01 | 1,20 | 3 h | 1,50 | 6 h | 0,78 | 3 h | 1,15 | - |
| 02 | 1,45 | 4,5 h | 1,82 | 7 h | 1,06 | 3,5 h | 1,72 | - |
| 03 | 1,87 | 5 h | 0,70 | 3,5 h | 0,80 | 4 h | 0,60 | - |
| 04 | 1,89 | 3,5 h | 0,99 | 4 h | 1,52 | 4,5 h | 0,78 | - |

Modificado de PINHEIRO (1987).

BERNARDI *et al.* (1988 *apud* SILVEIRA, 1989) realizaram medições de velocidade e direção das correntes durante marés de sizígia e quadratura na área do

Igarapé Tucunduba, nas proximidades do Campus da Universidade Federal do Pará, no rio Guamá (Fig. 15). O levantamento foi realizado da seguinte forma:

- Locais com profundidades inferiores à 5m: dados coletados na superfície e a 1 e 2m de profundidade;
- Locais com profundidades superiores à 5m: dados coletados na superfície e a 3 e 5m de profundidade.

Através da análise integrada entre estes dados e os obtidos pela PORTOBRÁS, SILVEIRA (1989) concluiu que ambos são concordantes. BERNARDI *et al.* (1988 *apud* SILVEIRA, 1989) afirmam que no rio Guamá, durante a enchente, os valores máximos absolutos de velocidade ocorrem na superfície (0,4 m/s), sendo que esses valores diminuem à 1m de profundidade. Por outro lado, durante a vazante, valores máximos absolutos de velocidade ocorrem à 2m de profundidade (0,4 m/s),

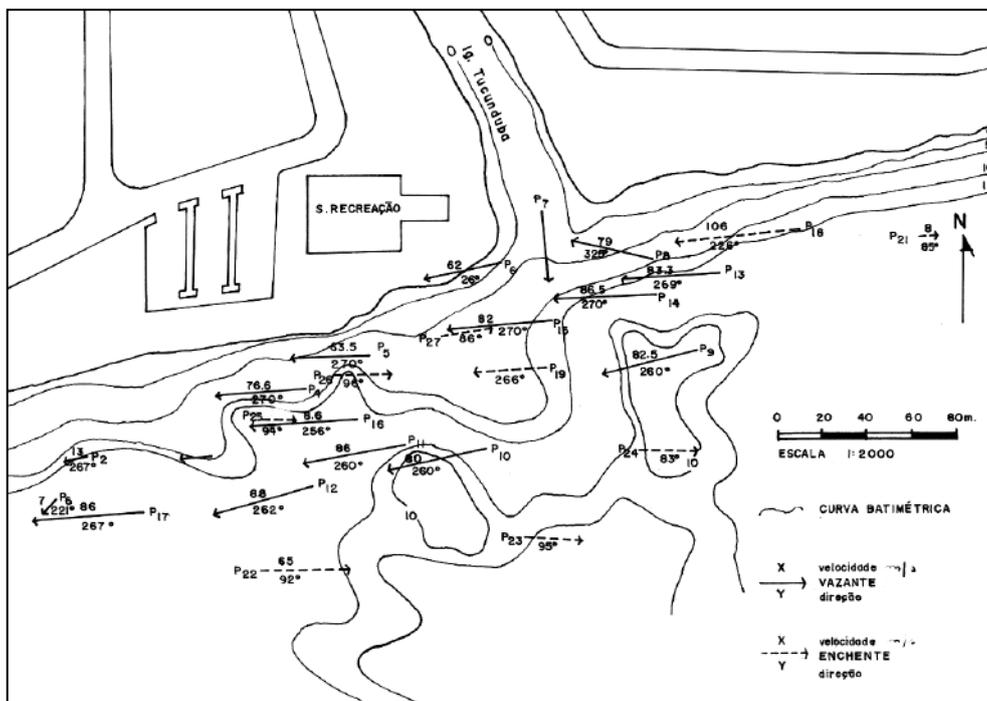


Figura 15. Mapa da distribuição das velocidades de correntes nas imediações do Igarapé Tucunduba. Levantamento realizado por BERNARDI *et al.* (1988 *apud* SILVEIRA, 1989).

Fonte: SILVEIRA (1989).

SILVEIRA (1989) ressalta que no rio Guamá, durante as marés de sizígia, há uma predominância das correntes de vazante, enquanto em períodos de quadratura há uma alternância entre correntes de enchente e de vazante.

Quanto à dinâmica das correntes de fundo nas mesmas três seções, PORTOBRÁS (1980 *apud* SILVEIRA, 1989) comprova que nas seções S1 e S2 as

velocidades máximas de correntes à 1 m do leito acontecem durante as enchentes de sizígia, enquanto durante as vazantes de quadratura menores velocidades ocorrem. Durante as enchentes em período de sizígia, as velocidades máximas das correntes de fundo observadas ocorrem nos pontos 5 da seção 2 (1,72 m/s) e 7 da seção 1 (1,62 m/s), com defasagem, em relação às correntes de superfície, de 2 h e 30 min para a implantação das correntes de fundo.

Na seção 5 sobre o rio Guamá, as correntes à 1 m do leito mostram que a melhor definição da alternância entre enchente e vazante ocorre durante o período de sizígia, dinâmica esta contrária à apresentada pelas correntes superficiais, as quais, em período de sizígia, seguem predominantemente o fluxo de vazante (PORTOBRAS, 1980 *apud* SILVEIRA, 1989, BERNARDI *et al.*, 1988 *apud* SILVEIRA, 1989).

Analisando as informações do relatório “Porto de Belém- Transporte de Material Sólido em Suspensão na Baía de Guajará” (realizado pela PORTOBRÁS em 1980), PINHEIRO (1987) verificou que tanto durante o período de sizígia quanto o de quadratura, as correntes de enchente e de vazante se implantam inicialmente no canal do Porto e, após 35 a 45 minutos, passam a dominar os canais do Meio e da Ilha das Onças.

Com o objetivo de representar as mudanças de sentido das correntes superficiais na área do Porto de Belém, PINHEIRO (1987) também utilizou os dados do relatório supracitado para elaborar quadros da dinâmica das correntes em dois cenários: final da enchente e início da vazante, para marés de sizígia e final da vazante e início da enchente para marés de quadratura.

No primeiro cenário, cerca de 2 horas após o estofo de preamar de sizígia observa-se que as correntes de vazante já se estabeleceram no Canal do Porto e em parte do Canal do Meio, porém no Canal da Ilha das Onças as correntes de enchente ainda permanecem bem definidas (PINHEIRO, 1987). É também observada uma tendência a inversões em outros locais da baía, defletindo para esquerda ou direita em movimentos rotacionais (Fig. 16). Na parte central da baía, segundo PINHEIRO (1897) ocorre uma bifurcação no sentido das correntes, com uma componente buscando o sentido do fluxo de vazante dos Canais do Meio e do Porto e outra acompanhando o fluxo de enchente no Canal da Ilha das Onças.

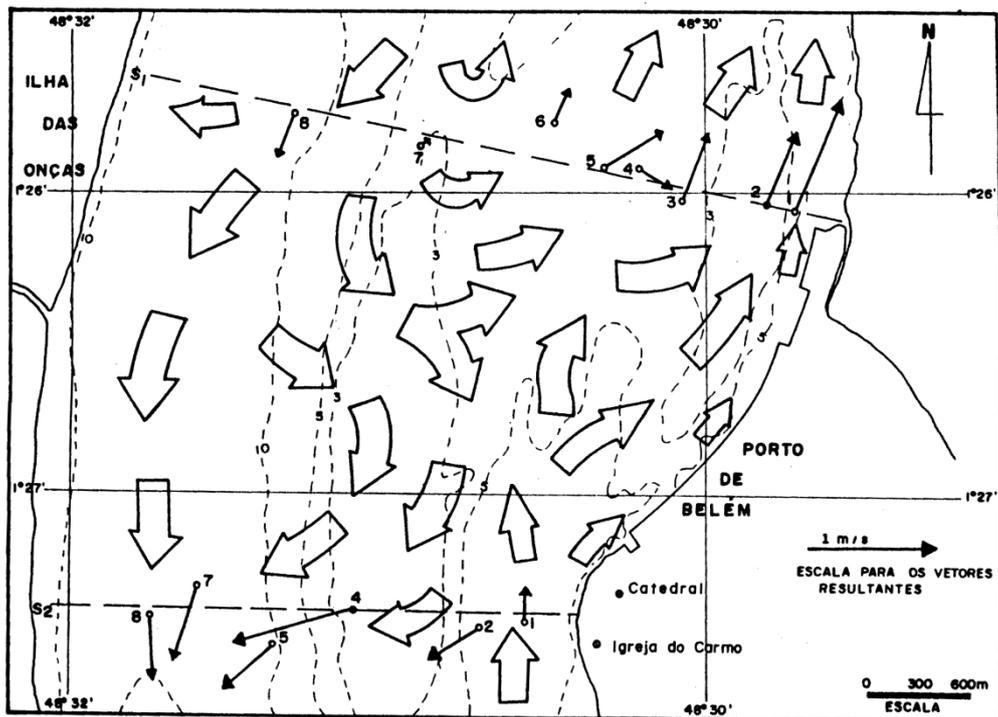


Figura 16. Quadro da dinâmica das correntes de marés de sizígia, em superfície, na Baía de Guajará, para o momento de início da vazante (aproximadamente 2 h após o estófo da preamar).

Fonte: PINHEIRO (1987).

No segundo cenário, cerca de 1 h e 30 min após a baixa mar de quadratura observa-se uma dinâmica semelhante a do primeiro cenário (Fig. 17). De acordo com PINHEIRO (1987), as correntes de enchente se implantam inicialmente nos canais do Porto e do Meio, avançando pela margem direita da baía, enquanto que no Canal da Ilha das Onças predominam as correntes de vazante. Na região mais larga da baía, há uma deflexão das correntes de enchente que avançam pelo Canal do Meio em direção ao Canal da Ilha das Onças, passando a acompanhar o sentido das correntes de vazante (PINHEIRO, 1987).

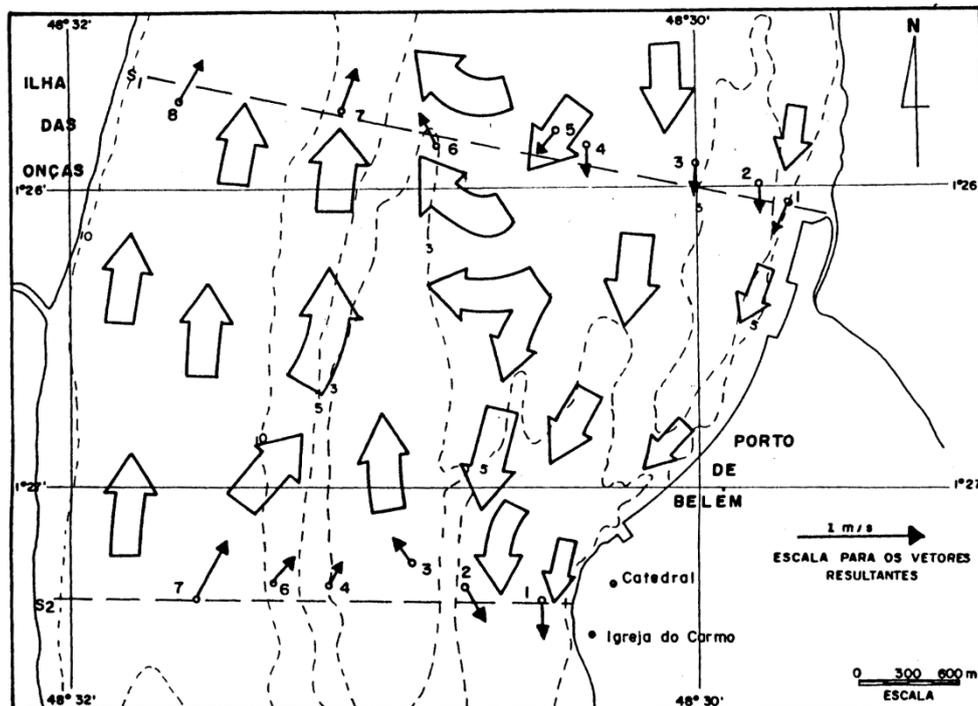


Figura 17. Quadro da dinâmica das correntes de marés de quadratura, em superfície, na Baía de Guajará, para o momento de início da enchente (aproximadamente 1 h a 1 h e 30 min após o estófo de baixa-mar).

Fonte: PINHEIRO (1987).

ENGESOLO ENGENHARIA (2006) e BLANCO *et al.* (2009) realizaram um estudo sobre os possíveis impactos na hidrodinâmica local do aterro hidráulico de um trecho da área de confluência entre o rio Guamá e a Baía de Guajará. Na área aterrada, serão construídos uma avenida de mão dupla e um complexo de lazer e turismo visando ao aproveitamento do potencial da orla de Belém, denominado “Projeto Orla da Estrada Nova”. Esse estudo foi realizado através da implementação de modelo hidrodinâmico barotrópico por meio dos programas *Modeleur* e *Hydrosim*.

Nas simulações foram considerados como forçantes os níveis das marés medidos na região em setembro de 2004. A grade de elementos finitos usada na modelagem e o posicionamento da obra são apresentados na figura 18.

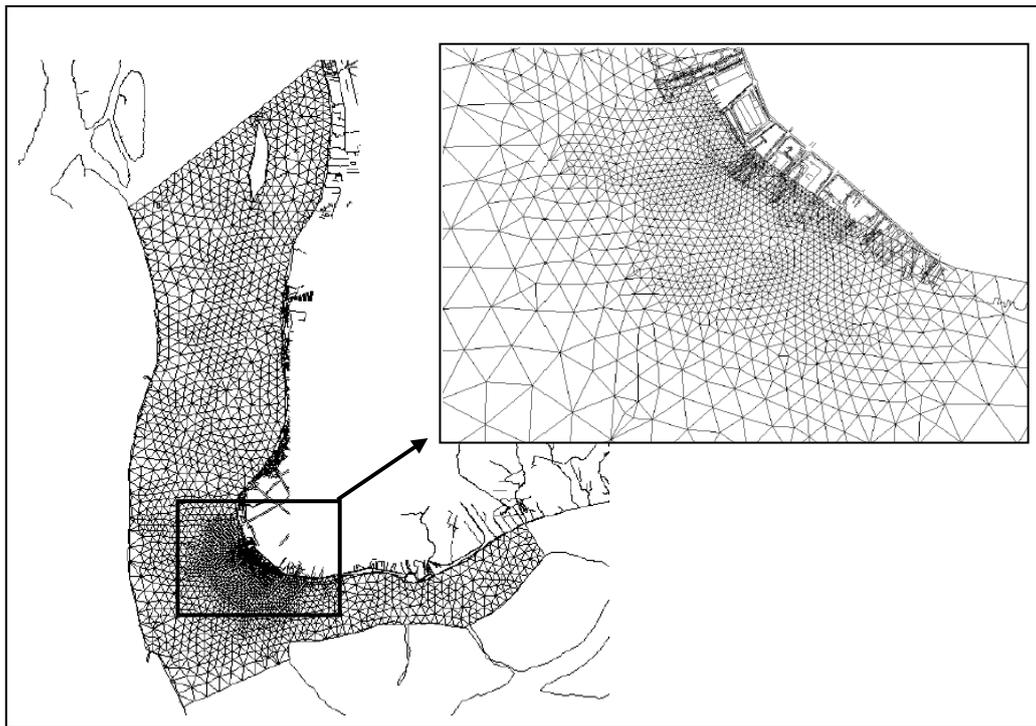


Figura 18. Grade numérica usada na modelagem hidrodinâmica. Em detalhe, a área em que será posicionado o Projeto Orla da Estrada Nova.

Modificado de BLANCO *et al.* (2009).

No cenário que reflete as condições naturais do encontro entre a foz do rio Guamá e a Baía de Guajará, os resultados da modelagem indicam que durante a enchente e durante a vazante as velocidades na área onde será realizada a obra variam entre 0,09 m/s e 0,55 m/s (Fig. 19), sendo que as velocidades durante a enchente são maiores que as encontradas durante a vazante (ENGESOLO ENGENHARIA, 2006, BLANCO *et al.*, 2009). Essa característica da dinâmica local, segundo os autores, é determinada pelo escoamento do rio Guamá. Durante a vazante, seu fluxo é concentrado em seu canal principal, posicionado na margem oposta à margem onde serão realizadas as obras. Por outro lado, durante a enchente, o escoamento é mais bem distribuído na largura da Baía de Guajará, aumentando as velocidades na região próxima à parte da orla considerada no estudo (ENGESOLO ENGENHARIA, 2006, BLANCO *et al.*, 2009).

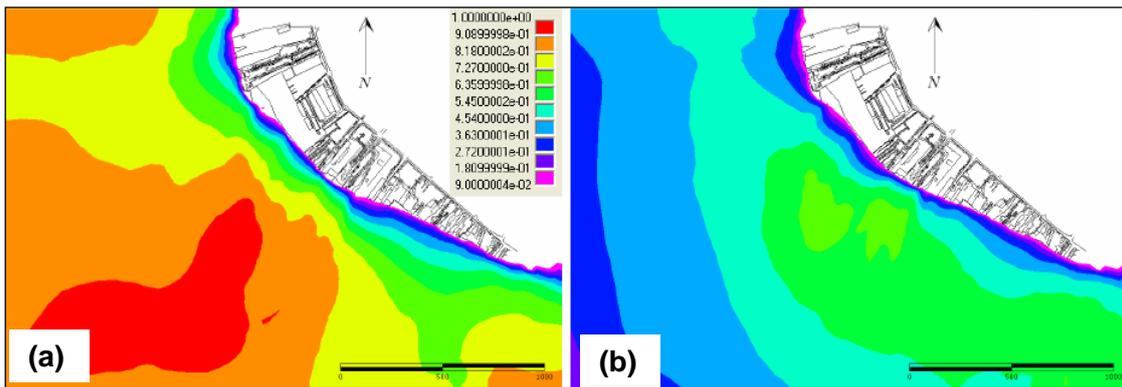


Figura 19. Campo de velocidade máxima para o cenário que reproduz a configuração atual da região durante *a)* maré enchente e *b)* maré vazante.

Modificado de BLANCO *et al.* (2009).

3. METODOLOGIA

Inicialmente a metodologia empregada consistiu em uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, a partir de livros, publicações técnico-científicas e materiais disponíveis na Internet, para uma melhor compreensão do objeto de estudo.

Após serem definidos os objetivos específicos do presente trabalho, foi feito um levantamento de informações buscando uma fundamentação teórica relacionada ao tema. Nesta etapa, além dos métodos de pesquisa citados anteriormente, foi consultado de modo aprofundado manuais sobre o *Princeton Ocean Model* (POM), modelo numérico escolhido para a realização do trabalho, e a linguagem de programação Fortran, já que esta é a linguagem na qual o código do modelo foi desenvolvido. O entendimento e aprofundamento sobre tais temas são essenciais, pois os modelos numéricos hidrodinâmicos constituem apenas um método de investigação da dinâmica de uma região e sua utilização de modo inadequado pode levar a resultados enganosos (ROSMAN, 2001).

As fases subseqüentes do trabalho compreenderam uma série de etapas relacionadas à implementação do modelo hidrodinâmico para a região da Baía de Guajará, conforme discriminado abaixo.

3.1. LEVANTAMENTO E PROCESSAMENTO DE DADOS DE BATIMETRIA

A etapa seguinte do trabalho compreendeu a aquisição de dados de batimetria e margem encontrados na área de estudo, através da consulta a dados previamente coletados. Tais fatores e suas interações são determinantes para a dinâmica de estuários (RIBAS, 2004). Em seguida, os dados obtidos foram processados para que fosse possível uma melhor interpretação dessas informações.

Com o propósito de observar as variações da morfologia de fundo sofridas pela Baía de Guajará e, posteriormente, determinar a relevância destas alterações sobre a hidrodinâmica local através da implementação de um modelo hidrodinâmico, foram considerados dois cenários distintos.

O primeiro cenário foi fundamentado em dados de batimetria e margem obtidos a partir da 1ª edição da carta náutica nº 316 (de Mosqueiro a Belém) de 1962 (Fig. 20a), publicada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN (MARINHA DO BRASIL, 1962).

O outro considerou os dados provenientes de um levantamento batimétrico realizado em 2002 (Fig. 20b), cuja malha de amostragem (cerca de 142 Km²)

compreendia oitenta linhas transversais à Baía de Guajará e ao rio Guamá, com espaçamento de 500m entre cada uma delas, e três linhas longitudinais paralelas entre si (GREGÓRIO, 2008). Os dados relativos à posição e profundidade foram registrados em intervalos de 100 m (GREGÓRIO, *op. cit.*).

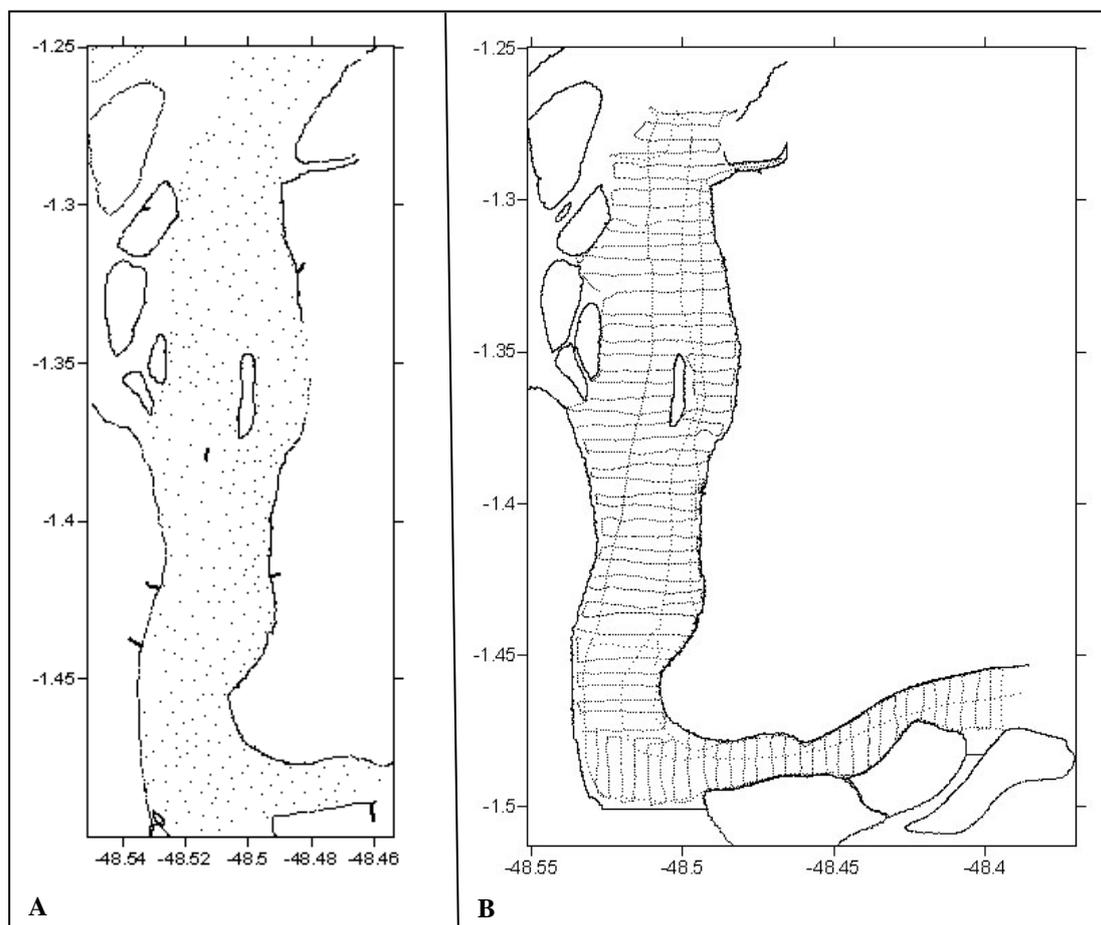


Figura 20. Disposição dos pontos a) da carta náutica nº 316 de 1962 e b) da malha do levantamento batimétrico realizado em 2002.

3.2. CONSTRUÇÃO DAS MALHAS NUMÉRICAS

Para a construção das grades numéricas optou-se pelo uso do *Seagrid*, aplicativo do software *Matlab*, já que permite a construção de grades curvilíneas, ortogonais e com resoluções variáveis, adequadas aos contornos de rios, estuários e regiões costeiras que são, em geral, curvos, não sendo facilmente representados em grades retangulares.

As grades construídas a partir dos dados batimétricos dos anos de 1962 e 2002 possuem 250 linhas e 200 colunas (Fig. 21). Buscou-se manter ambas as grades

com as mesmas resoluções espaciais. Na grade dos dados de 1962, a resolução zonal varia entre 25 e 45 m e a resolução meridional entre 80 e 135 m, enquanto na grade referente ao ano de 2002 a resolução zonal varia entre 20 e 45 m e a resolução meridional entre 80 e 150 m.

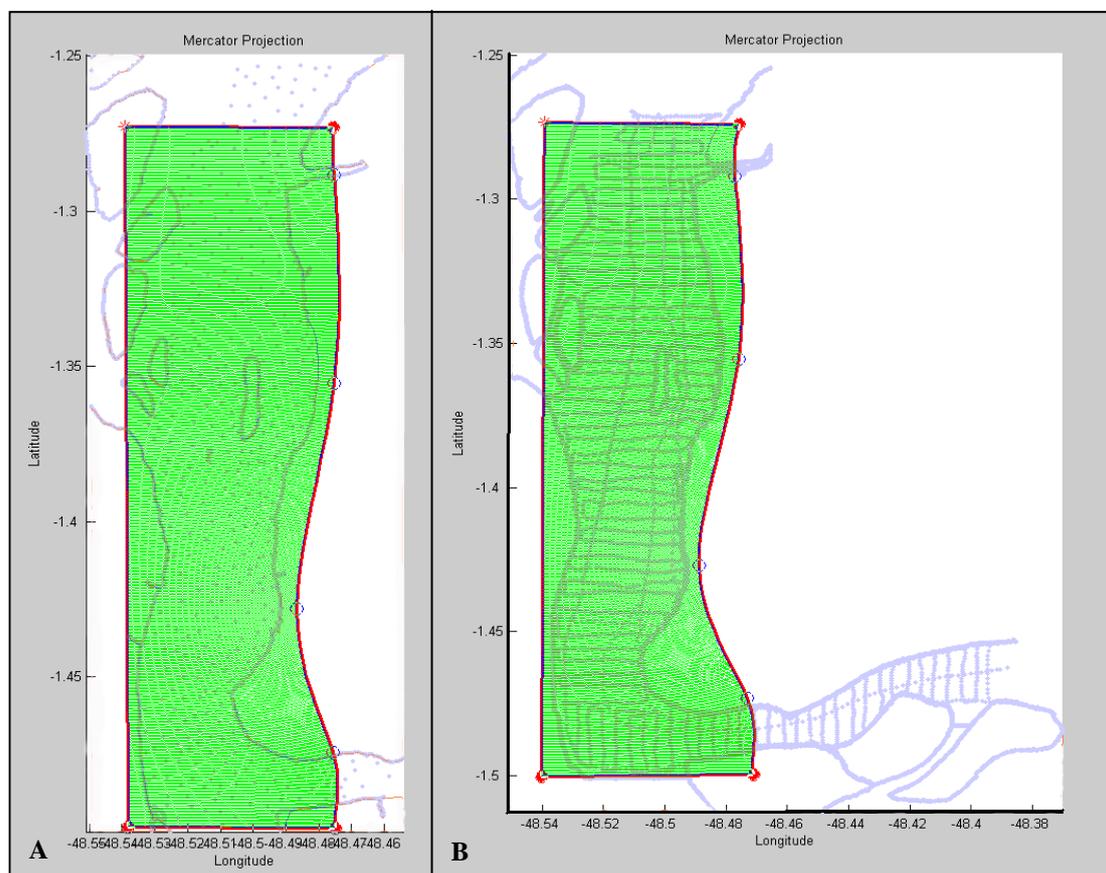


Figura 21. Grades numéricas construídas para a Baía de Guajará a partir dos dados referentes aos anos de a) 1962 e b) 2002.

Durante a construção das malhas buscou-se o aumento de resolução nas áreas da Baía de Guajará que, de acordo com estudos publicados anteriormente, apresentaram as maiores variações em sua morfologia: Furo do Maguarí (próximo ao distrito de Icoaraci) e nos Bancos da Ilha da Barra, do Meio, da Cidade e Sul da Cidade. Dessa forma serão gerados resultados mais precisos nas áreas de interesse.

Após a interpolação dos dados de batimetria à grade construída, foram gerados arquivos com matrizes referentes às características das grades: espaçamento entre os pontos no eixo das abscissas; espaçamento entre os pontos no eixo das coordenadas; ângulo de inclinação; batimetria, latitude e longitude de cada ponto da grade (Tab. V).

Esses dados foram usados para a construção de mapas batimétricos (Fig. 22) e para alimentar o modelo numérico.

Tabela V. Principais características das grades construídas com os dados de 1962 e 2002.

| PROPRIEDADES | GRADE DE 1962 | GRADE DE 2002 |
|---|----------------------|----------------------|
| Número de pontos da grade na direção x | 200 | 200 |
| Número de pontos da grade na direção y | 250 | 250 |
| Latitude mínima | 1° 29' 53" | 1° 29' 59" |
| Latitude máxima | 1° 16' 23" | 1° 16' 25" |
| Longitude mínima | 48° 32' 20" | 48° 32' 24" |
| Longitude máxima | 48° 28' 26" | 48° 28' 15" |
| Profundidade máxima | 47,9 m | 27,7 m |
| Mínima distância entre pontos no eixo x (dx) | 22,8 m | 20,0 m |
| Máxima distância entre pontos no eixo x (dx) | 43,2 m | 47,4 m |
| Mínima distância entre pontos no eixo y (dy) | 80,3 m | 76,1 m |
| Máxima distância entre pontos no eixo y (dy) | 141,5 m | 154,4 m |

De posse dos mapas batimétricos gerados, é possível observar que as resoluções usadas na construção das grades permitiram que as principais feições morfológicas da Baía de Guajará fossem representadas. O Canal da Ilha das Onças e o Canal Oriental são claramente visualizados nos dois mapas batimétricos. No mapa de 2002 ainda é possível identificar os bancos do Meio, da Cidade e Sul da Cidade.

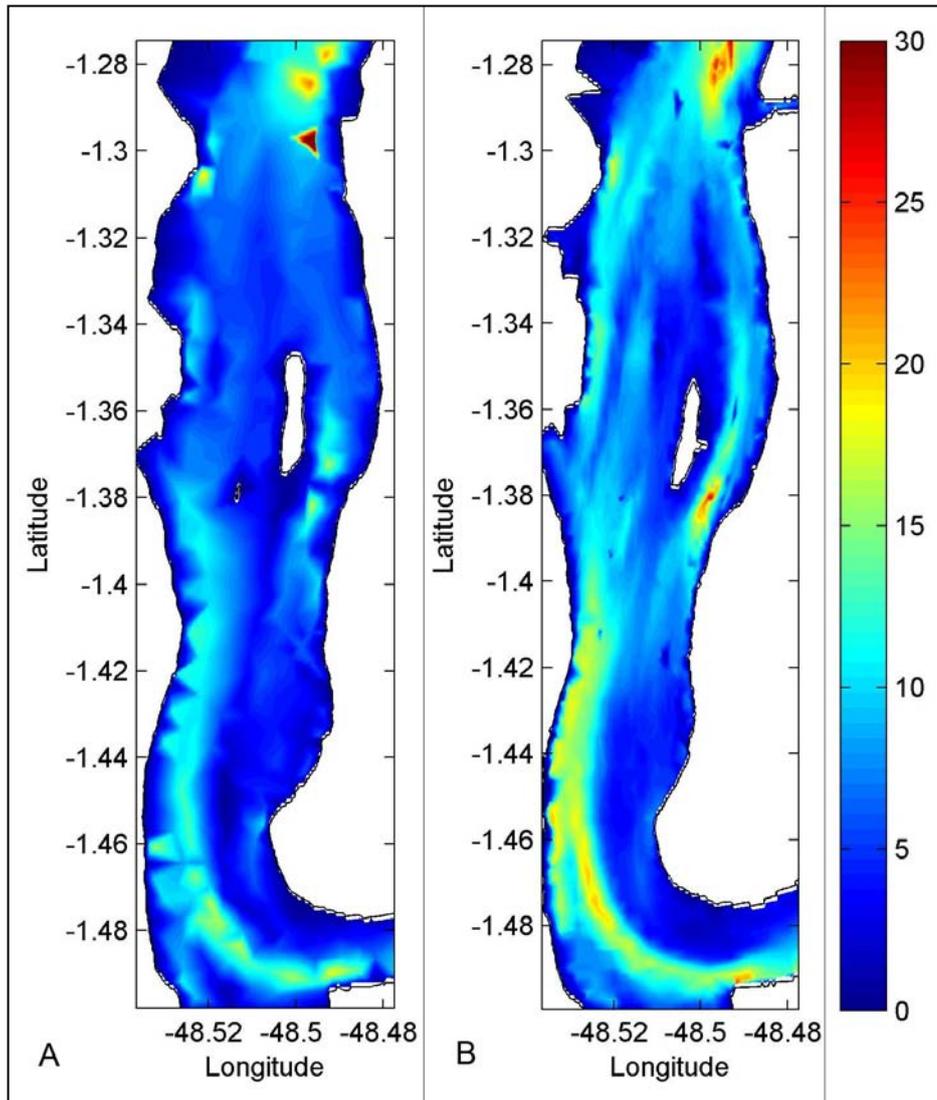


Figura 22. Mapas batimétricos obtidos a partir da interpolação dos dados das grades numéricas de a) 1962 e b) 2002. A escala de cores indica a profundidade (em metros).

Na batimetria de 1962, o ponto mais profundo possui cerca de 47,9 m e a profundidade média é de 5,8 m. O intervalo de profundidades mais freqüente na batimetria é o que varia de 5 m à 7 m, correspondendo a cerca de 25,3 % do total de pontos (Fig. 23). Os intervalos de 3 à 5 m e de 1 m à 3 m são, respectivamente, os segundo e o terceiro intervalos de profundidades mais freqüentes, correspondendo à 23,6 % e à 14,1 % do total de pontos.

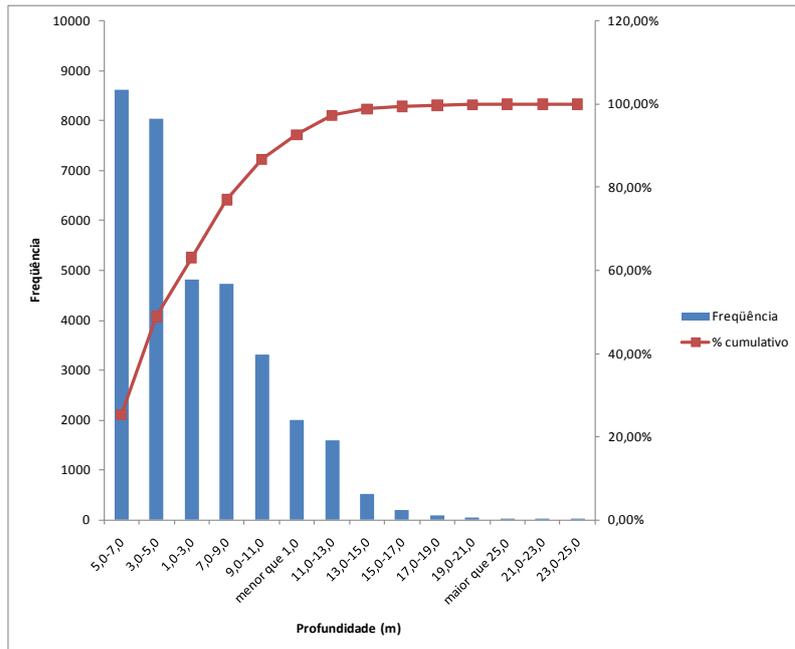


Figura 23. Histograma de frequência das profundidades da batimetria de 1962. As barras verticais, referentes ao eixo esquerdo, indicam a frequência absoluta e a linha pontilhada, referente ao eixo direito, representa a frequência acumulada.

Na batimetria de 2002, o ponto mais profundo possui cerca de 27,7 m e a profundidade média é de 7,6 m. O intervalo de profundidades mais freqüente na batimetria é o que varia de 7 m à 9 m, correspondendo a cerca de 21,2 % do total de pontos (Fig. 24). Os intervalos de 3 m à 5 m e de 5 m à 7 m são, respectivamente, os segundo e o terceiro intervalos de profundidades mais freqüentes, correspondendo à 17,1 % e à 15,9 % do total de pontos.

Para avaliar as diferenças espaciais entre as profundidades dos anos de 1962 e 2002, as matrizes das batimetrias foram interpoladas para uma grade de latitude e longitude regulares e a diferença entre elas foi determinada, como apresentado na figura 25. Nessa figura, a margem de cor preta representa a margem da batimetria de 2002 e a margem de cor verde representa a margem da batimetria de 1962. Os valores positivos indicam um aumento da profundidade na batimetria de 2002 e os valores negativos indicam uma redução da profundidade no ano de 2002. Valores iguais a zero indicam que não houve variação de profundidade entre os anos.

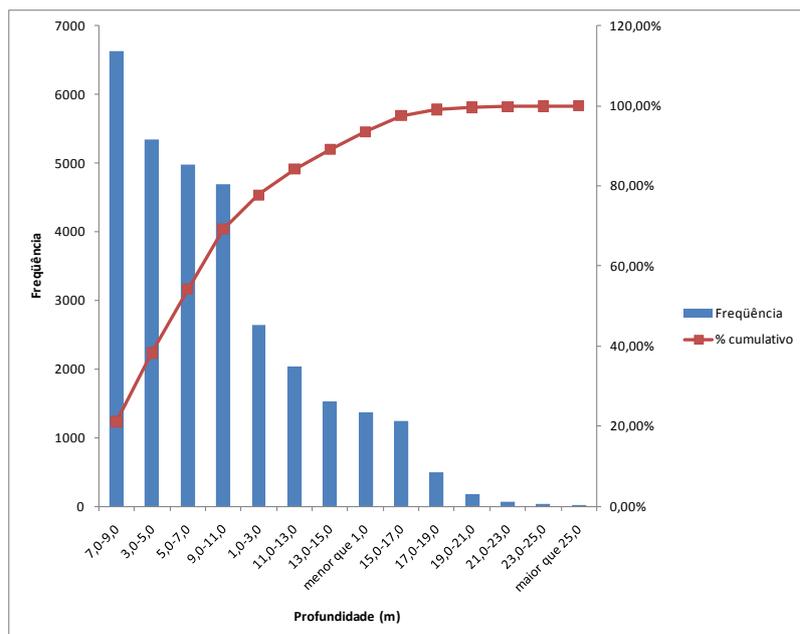


Figura 24. Histograma de frequência das profundidades da batimetria de 2002. As barras verticais, referentes ao eixo esquerdo, indicam a frequência absoluta e a linha pontilhada, referente ao eixo direito, representa a frequência acumulada.

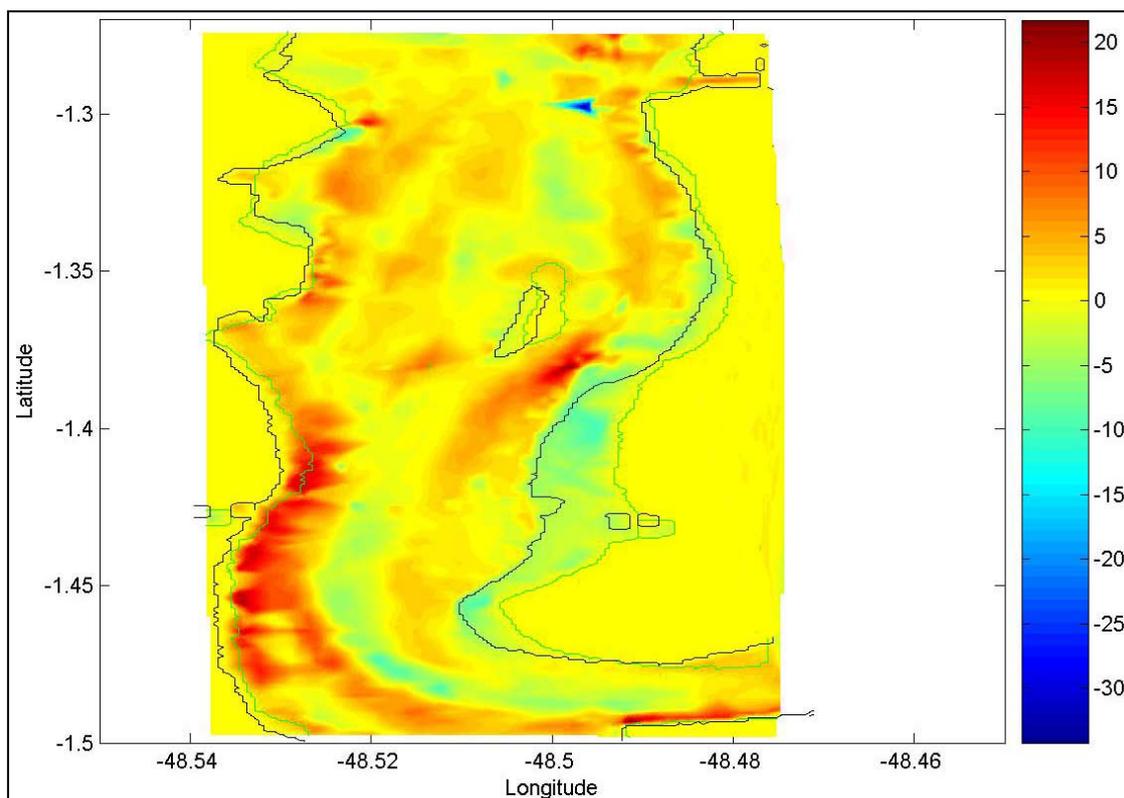


Figura 25. Diferença entre a matriz de batimetria dos anos de 1962 e 2002. A escala de cores indica a diferença de profundidade (em metros). A margem de cor preta representa a costa de 2002 e a margem de cor verde representa a costa de 1962. Os valores positivos indicam um aumento da profundidade na batimetria de 2002 e os valores negativos indicam uma redução da profundidade no ano de 2002.

Dessa forma, é possível observar que ao longo da margem esquerda, desde o Canal do Rio Guamá até a parte superior da baía, e também em parte do Canal Oriental e próximo ao distrito de Icoaraci, houve um aumento das profundidades em 2002. Em 2002, diminuição de profundidades foi observada na parte central e inferior da baía, até o canal do rio Guamá, e também em parte da margem direita da região superior da baía. É importante ressaltar que as linhas de costa dos anos de 1962 e 2002 apresentam grande diferença entre seus contornos.

3.3. MODELO NUMÉRICO HIDRODINÂMICO

O modelo numérico escolhido para a modelagem hidrodinâmica da Baía de Guajará foi o *Princeton Ocean Model* (POM), modelo de domínio público que foi desenvolvido no *Atmospheric and Oceanic Sciences Program* da Universidade de Princeton e no *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL) da *National Ocean and Atmosphere Agency* (NOAA) (BLUMBERG & MELLOR, 1987, MELLOR, 2003).

3.3.1. DESCRIÇÃO DO MODELO

Elaborado por Alan Blumberg e George Mellor na década de 70, o POM é um modelo numérico tridimensional, não linear, com superfície livre e de equações primitivas resolvidas por diferenças finitas (BLUMBERG & MELLOR, 1987, MELLOR, 2003).

As variáveis prognósticas são as componentes zonal (u), meridional (v) e vertical (w) da velocidade, a elevação da superfície livre, a temperatura e a salinidade, e duas quantidades que caracterizam a turbulência (energia de turbulência cinética e turbulência de macroescala). Os efeitos turbulentos são tratados através do modelo de fechamento turbulento de segunda ordem nível 2,5 de MELLOR & YAMADA (1982), permitindo uma melhor representação das camadas de Ekman de superfície e de fundo, as quais são de fundamental importância em águas costeiras (BLUMBERG & MELLOR, 1987).

O POM permite a realização de simulações bidimensionais e tridimensionais em função da técnica de separação de modos (*mode splitting*). O modo externo é bidimensional, calcula a elevação da superfície e as velocidades barotrópicas e usa um menor passo de tempo, baseado na condição de Courant Friedrichs Lewy (CFL) e

na velocidade de ondas longas de superfície. O modo interno calcula as velocidades baroclínicas, a salinidade, a temperatura e os parâmetros de turbulência, usando um passo de tempo mais longo, baseado na condição de CFL e na velocidade de ondas internas (BLUMBERG & MELLOR, 1987, MELLOR, 2003). A técnica de separação de modos proporciona uma economia de tempo de processamento ao mesmo tempo que não compromete a estabilidade do modelo, pois permite que sejam utilizados intervalos de tempo diferentes na integração do modelo (BLUMBERG & MELLOR, *op. cit.*, MELLOR, *op. cit.*).

O POM utiliza coordenadas ortogonais curvilíneas na horizontal, o que possibilita a resolução variável de grade e o esquema de diferenciação espacial aplicado é conhecido como grade C de Arakawa (MESSINGER & ARAKAWA, 1976). Nesta grade, os pontos de variáveis escalares estão dispostos sempre no centro das células e entre os pontos de velocidade. Os pontos de u estão dispostos a leste e oeste dos pontos de elevação da superfície e os pontos de v estão a norte e a sul, conforme apresentado na figura 26, onde ω é a velocidade vertical, q e l são parâmetros do modelo de fechamento turbulento.

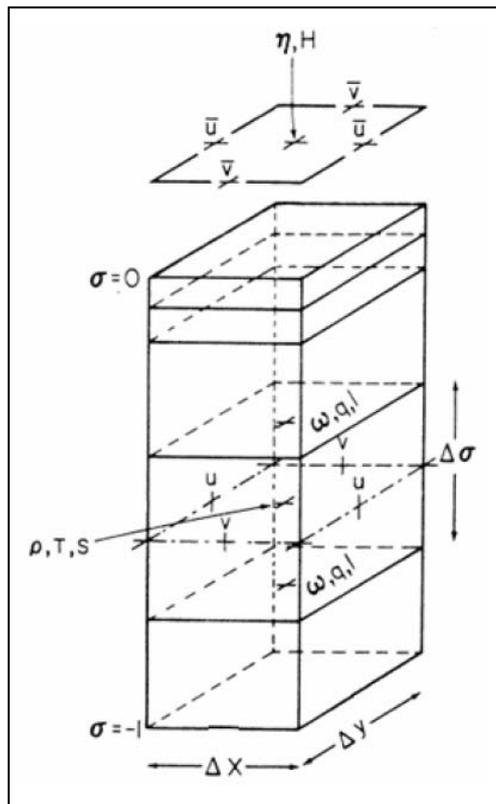


Figura 26. Grade C de Arakawa utilizada pelo POM.

Fonte: MELLOR (2003).

Já na vertical, o POM utiliza a coordenada sigma (σ), que substitui a coordenada vertical (z) e tem como referência o fundo e a superfície livre do mar (Fig. 27). Esse tipo de substituição é muito útil em regiões que apresentam grandes variações de topografia, já que a grade numérica apresentará o mesmo número de camadas em qualquer espessura, o que permite boa representação tanto de águas rasas como de águas profundas. A transformação é dada por

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta} \quad (1)$$

Onde η é a elevação da superfície livre e H a profundidade local. A coordenada σ varia de 0, na superfície ($z = \eta$), a -1, no fundo ($z = H$).

As equações primitivas do movimento compõem o conjunto de equações governantes do POM, que faz uso de três aproximações: de Boussinesq, que assume que é desprezível o efeito das variações de densidade sobre a massa do fluido se estas forem muito pequenas, a menos que multiplicada pela gravidade; hidrostática, que impõe que a pressão em qualquer profundidade é igual a pressão hidrostática e, por fim, a do plano Beta, que adota uma latitude de referência para a qual é calculado o parâmetro de Coriolis, e a esse valor é somado a variação deste com a latitude.

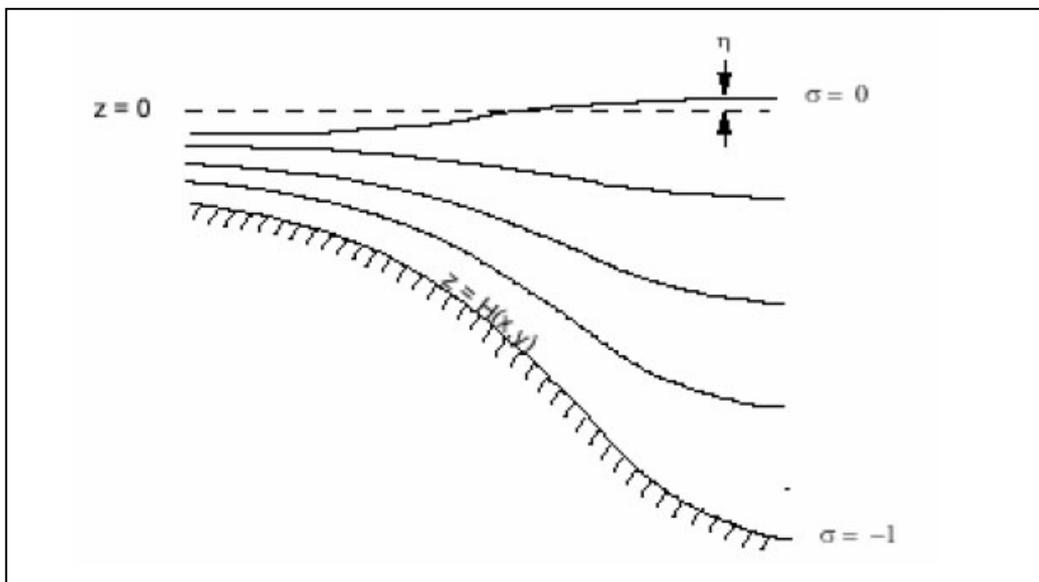


Figura 27. Esquema das definições de coordenada sigma e superfície livre.

Fonte: MELLOR (2003).

Referenciando-se a um sistema de coordenadas cartesianas ortogonais com valores positivos de x para leste, de y para norte e z verticalmente para cima e realizando a transformação para coordenada σ , obtém-se o conjunto de equações básicas utilizado pelo POM, conforme apresentado abaixo.

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção zonal:

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} + \frac{\partial U \omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \dots \\ \dots = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned} \quad (3)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento na direção meridional:

$$\begin{aligned} \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V \omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' \dots \\ \dots = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y \end{aligned} \quad (4)$$

Equação da conservação de calor:

$$\frac{\partial \theta D}{\partial t} + \frac{\partial \theta UD}{\partial x} + \frac{\partial \theta VD}{\partial y} + \frac{\partial \theta \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial \theta}{\partial \sigma} \right] + F_{\theta} - \frac{\partial R}{\partial z} \quad (5)$$

Equação da conservação de sal:

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S \quad (6)$$

Equação de estado da água do mar:

$$\rho = \rho(S, \theta, P) \quad (7)$$

Nestas equações $D = H + \eta$, U e V são os componentes zonal e meridional da velocidade, respectivamente, f é o parâmetro de Coriolis, g é a aceleração da gravidade, ρ é a densidade, ρ_0 é a densidade de referência, ρ' é a anomalia de densidade, θ é a temperatura potencial, S é a salinidade, K_M é o coeficiente de viscosidade cinemática vertical, K_H é o coeficiente de difusão de calor vertical, $\frac{\partial R}{\partial z}$ é o termo de fluxo de calor radiativo e ω é a velocidade vertical transformada, correspondente à componente de velocidade normal às superfícies σ . Essa transformação se dá segundo:

$$W = \omega + U \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (8)$$

Os termos F_x , F_y , F_θ e F_S (atrito turbulento) são os chamados termos sub-grade, ou seja, com resolução menor do que a da grade, sendo então necessárias parametrizações para resolvê-los, representadas a seguir:

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (9)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \quad (10)$$

$$F_{S,\theta} = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_H \frac{\partial(S,\theta)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_H \frac{\partial(S,\theta)}{\partial y} \right] \quad (11)$$

O termo A_M é resolvido utilizando a solução de Smagorinsky:

$$A_M = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

onde C é a constante de Smagorinsky e A_H é o coeficiente de difusão de calor horizontal.

A rugosidade no fundo, utilizada no cálculo das velocidades, é definida por:

$$C_D = \left[\frac{k}{\ln\left(\frac{h_0}{z_{0b}}\right)} \right]^2, \quad (13)$$

onde C_D é o coeficiente de atrito, k é a constante de von Karman (0,4), h_0 é a altura do fundo até o meio da primeira camada e z_{ob} é o parâmetro de rugosidade, sendo a sua ordem de grandeza da ordem de um centímetro para um fundo moderadamente rugoso.

No POM, a discretização do conjunto de equações utilizado pelo modelo no tempo e no espaço horizontal é realizada através de um esquema explícito de 2ª ordem centrado no tempo e no espaço (*Leap-frog*), esquema este capaz de resolver apropriadamente os processos altamente dependentes do tempo e não-lineares (BLUMBERG & MELLOR, 1987). Para a discretização das equações no espaço vertical, é utilizado um esquema implícito chamado método da inversão de linha (KOWALIK & MURTY, 1993).

Escrito essencialmente em Fortran 77, o POM não faz uso de nenhuma extensão, tendo seu gerenciamento de memória todo em estruturas de acesso à memória através de blocos de memória comuns – *Common Blocks* (DA SILVA, 2005). Segundo DA SILVA (*op. cit.*), possui estruturas simples, com poucas subrotinas e com tarefas bem amplas para cada uma destas, que podem ser separadas em três partes bem definidas:

1. definição de constantes físicas e matemáticas, passo de tempo, tempo de integração, variáveis fixas no tempo como parâmetro de Coriolis, latitudes e longitudes, definição da grade do modelo, leitura de arquivos com condições iniciais, aplicação da batimetria e máscara de continente e outras informações que sejam necessárias no momento inicial;
2. integração numérica das equações governantes, com chamadas à funções, que possuem seus objetivos bem definidos. Funções definidas para cálculo das condições de contorno, cálculos dos termos advectivos e outras;
3. finalização do modelo com análise de erros, armazenamento de informações para re-inicialização do modelo e descarga de memória.

Devido a estas características, o modelo é capaz de simular processos de circulação e mistura em rios, estuários, plataformas continentais e taludes, lagos, mares semi-fechados e oceano aberto. É especialmente adequado para regiões que apresentam grandes variações batimétricas, pois um mesmo número de camadas é utilizado em todos os pontos do domínio (em águas rasas ou profundas) já que o modelo permite o uso de camadas verticais de espessura variável que se adequem a topografia local (CIRANO, 2002).

Amplamente testado pela comunidade científica, diversos trabalhos já foram desenvolvidos com o uso do POM, demonstrando a importância e aplicabilidade deste

modelo em diversos tipos de estudos. Especificamente à modelagem numérica de baías, pesquisas como a de DRAGO (2008), que demonstrou, através da implementação do modelo POM, que as feições topográficas específicas de duas baías na costa norte de Malta desempenham um papel fundamental na transformação e amplificação de seiches próximas a costa. HUANG (2007) construiu um modelo que representasse a circulação em um pequeno estuário de *North Bay* (Flórida), para que fosse estimada a distribuição da salinidade e, desta maneira, a fração de água doce pela estimativa do tempo de residência no estuário. Já LE *et al.* (2006) estudaram o transporte de sedimento na Baía Ishikari durante a época de derretimento do gelo, através do acoplamento dos modelos de transporte de sedimentos e da camada limite de fundo no POM, para calcular a concentração de sedimentos em suspensão no sistema.

Dessa forma, o POM adequa-se à investigação proposta no presente trabalho, já que diversas pesquisas similares de trabalho, envolvendo a avaliação do padrão de circulação de baías, foram desenvolvidas, apresentando resultados positivos.

3.3.2. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

Segundo ANDRADE & ROSMAN (2001 *apud* RIBAS, 2004), os tipos de modelos hidrodinâmicos mais adequados para a modelagem de um dado problema em um corpo d'água dependem do tipo de escoamento e das características da estrutura vertical da coluna d'água, sobretudo no que tange as condições de estratificação.

Assim, para a adequação do método computacional ao estudo da hidrodinâmica da Baía de Guajará, devemos analisar suas principais características (PINHEIRO, 1987 *apud* SENA *et al.*, 2002):

- ausência de estratificação térmica marcante;
- variações laterais de salinidade;
- pequenas componentes dos vetores velocidade na direção vertical;
- mecanismo de circulação dominado por fortes correntes de maré (com amplitudes entre 3,0 m e 2,5 m).

PINHEIRO (1987) ressalta que durante os momentos próximos ao início das enchentes e das vazantes são evidenciadas as características da Baía de Guajará como um estuário parcialmente misturado e com variações laterais de salinidade decorrentes da morfologia. Porém, no decorrer das enchentes e das vazantes, o

estuário assume características do tipo homogêneas com águas mais diluídas na superfície (PINHEIRO, 1987).

Estas análises do comportamento hidrodinâmico da Baía de Guajará indicam que o sistema pode ser considerado homogêneo, comportamento este dominado pelo efeito barotrópico. Desta maneira, o modelo implementado para a Baía de Guajará foi o do tipo bidimensional (modo barotrópico), no modo 2 do POM.

3.3.2.1. FORÇANTES

Para representar os cenários hidrodinâmicos mais característicos da Baía de Guajará, foram considerados como forçantes na modelagem a maré astronômica, o vento e a descarga fluvial.

Para a introdução da elevação de maré no contorno norte do modelo hidrodinâmico da Baía de Guajará foi necessário o levantamento sobre as estações maregráficas existentes na área, mais especificamente mais próximo ao domínio da modelagem (Fig. 28), para que uma escolha adequada sobre qual estação usar para o fornecimento das constantes harmônicas usadas para a predição de maré fosse realizada.

Sendo assim, a estação maregráfica Companhia de Pesca Pina foi escolhida em função de sua proximidade com o contorno norte da grade numérica, local de entrada das correntes de maré. No Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar – FEMAR (2000) foram obtidas as constantes harmônicas desta estação, conforme apresentado na figura 29.

A partir das constantes harmônicas Q_1 , O_1 , K_1 , N_2 , M_2 , S_2 e K_2 da estação supracitada, duas séries de marés, uma para o mês de abril de 2007 (Fig. 30) e outra para o mês de outubro de 2007 (Fig. 31), foram reconstruídas através do programa de análise e previsão de marés PACMARÉ desenvolvido pelo Vice Almirante Alberto dos Santos Franco (FRANCO, 1992). A definição do período de simulação (ano de 2007) foi feita em função da disponibilidade de dados de intensidade e direção dos ventos durante este período.

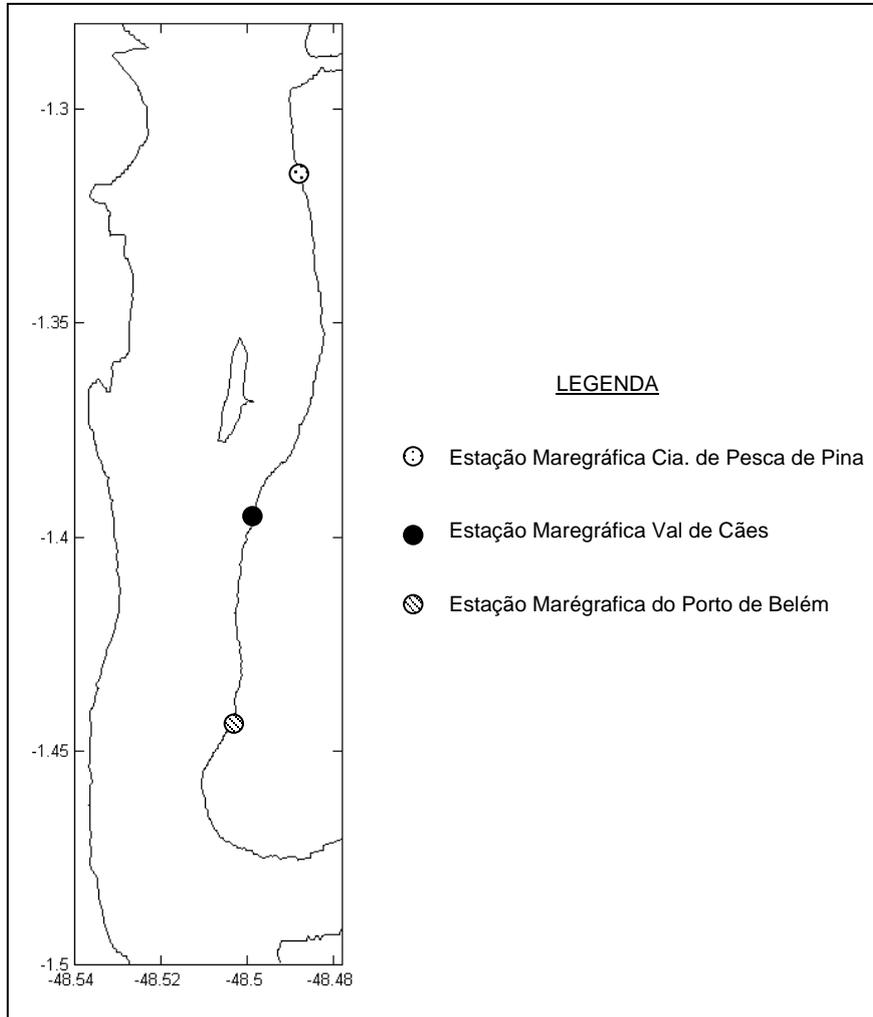


Figura 28. Estações maregráficas localizadas dentro do domínio de integração do modelo.

| Nome da Estação : CIA DE PESCA PINA - PA | | | | | |
|---|---------------------------------|---|------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Localização : Em Belem, no trapiche próximo ao CIABA | | | | | |
| Organ. Responsável : DHN | | | | | |
| Latitude : 01° 18,9' S | Longitude : 048° 29,0' W | | | | |
| Período Analisado : 17/03/76 a 17/04/76 | Nº de Componentes : 36 | | | | |
| Análise Harmônica : Método Tidal Liverpool Institute | | | | | |
| Classificação : Maré Semidiurna. | | | | | |
| Estabelecimento do Porto: (HWF&C) | XI H 57 min | Nível Médio (Zo) : | 201 cm acima do NR. | | |
| Médias das Preamares de Sízigia (MHWS) : | 365 cm acima do NR. | Média das Preamares de Quadratura (MHWN) : | 290 cm acima do NR. | | |
| Média das Baixa-mares de Sízigia (MLWS) : | 37 cm acima do NR. | Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) : | 112 cm acima do NR. | | |
| CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS | | | | | |
| Componentes | Semi-amplitude (H) cm | Fase (g) graus (°) | Componentes | Semi-amplitude (H) cm | Fase (g) graus (°) |
| Sa | - | - | MU ₂ | 5,2 | 115 |
| Ssa | - | - | N ₂ | 27,0 | 303 |
| Mm | 10,3 | 009 | NU ₂ | 5,1 | 307 |
| Mf | - | - | M ₂ | 126,5 | 328 |
| MTM | 8,9 | 119 | L ₂ | 8,4 | 315 |
| Msf | 8,1 | 022 | T ₂ | 2,2 | 015 |
| Q ₁ | 0,5 | 214 | S ₂ | 37,3 | 002 |
| O ₁ | 8,6 | 280 | K ₂ | 10,1 | 335 |
| M ₁ | - | - | MO ₃ | 3,4 | 159 |
| P ₁ | 3,4 | 306 | M ₃ | 2,2 | 160 |
| K ₁ | 10,4 | 308 | MK ₃ | 4,6 | 153 |
| J ₁ | 2,6 | 034 | MN ₄ | 6,6 | 222 |
| OO ₁ | 5,6 | 173 | M ₄ | 16,0 | 247 |
| MNS ₂ | - | - | SN ₄ | - | - |
| 2N ₂ | 3,6 | 278 | MS ₄ | 8,9 | 275 |
| Referências de Nível: RN-1 instalada no batente da porta da garagem de barcos do Centro de Instrução Alte. Braz de Aguiar (CIABA). | | | | | |
| Obs: Outros Períodos: 04/12/88 a 04/01/89. | | | | | |

Código BND0: 10514

Figura 29. Constantes harmônicas para a estação maregráfica Companhia de Pesca Pina.

Fonte: FEMAR (2000).

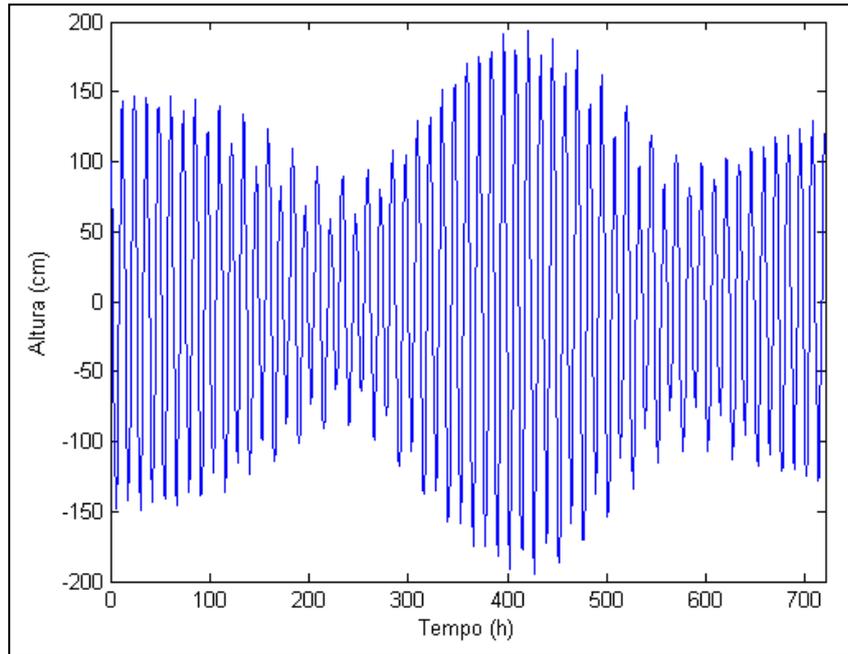


Figura 30. Maregrama para o mês de abril de 2007.

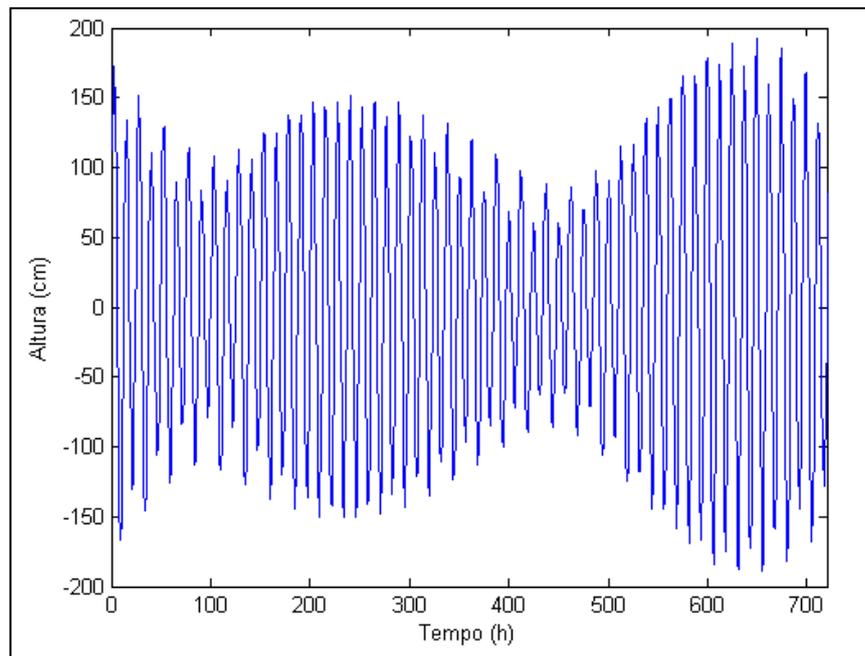


Figura 31. Maregrama para o mês de outubro de 2007.

Séries temporais das componentes zonal e meridional do vento no ano de 2007 para a região de Belém (Fig. 32) foram obtidas através de simulações numéricas com o modelo regional *Mesoscale Modeling – Fifth Generation* (MM5) a partir de resultados gerados anteriormente pelo modelo global *Global Forecast System* (GFS) (PIATAM-MAR, 2008). Essas séries indicaram que a componente zonal do vento predomina de

leste em todas as estações do ano nesta região (PIATAM-MAR, 2008). Porém é possível observar reversões do vento de leste, que embora nem sempre consiga passar para vento de oeste, apresenta um padrão oscilatório associado à brisa. Já para as componentes meridionais, em todas as estações do ano, observa-se o padrão oscilatório, possivelmente associado ao fenômeno de brisa marítima (PIATAM-MAR, 2008).

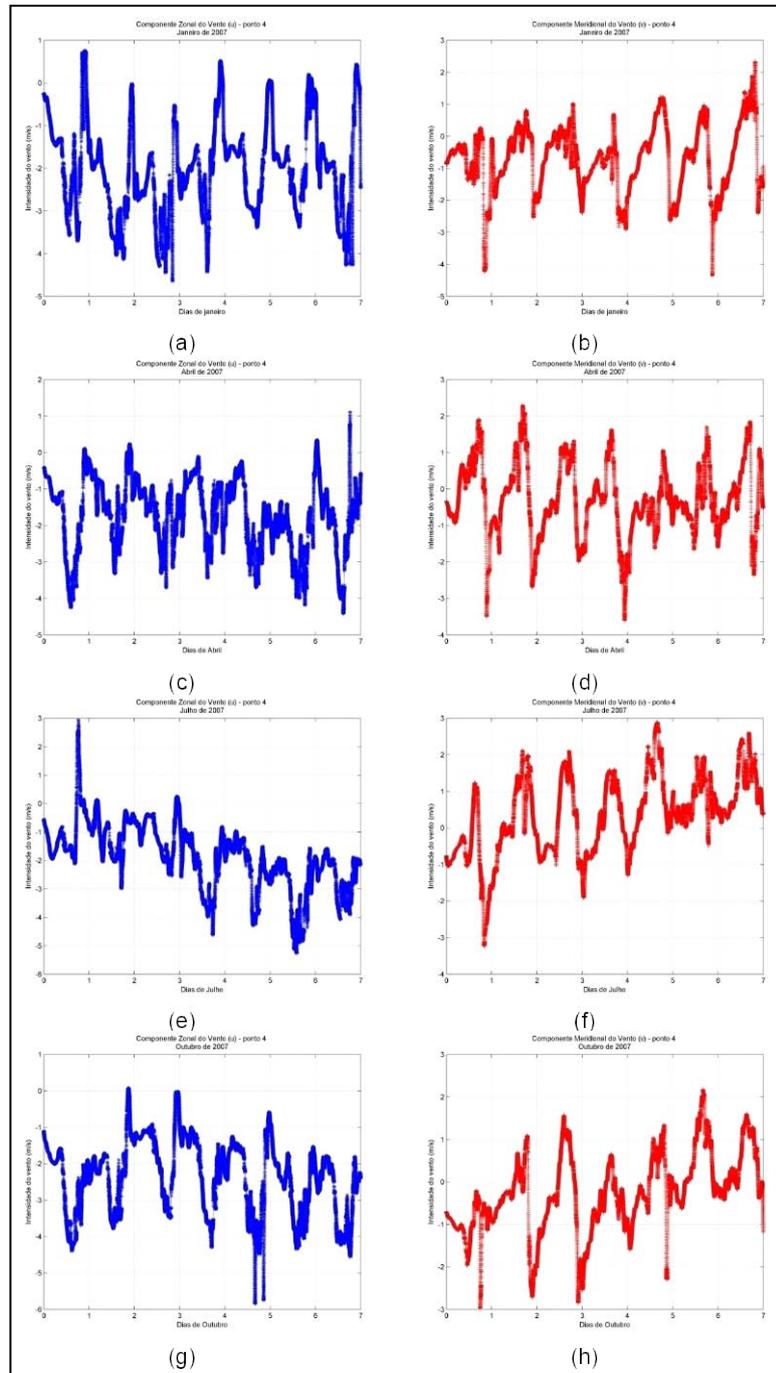


Figura 32. Séries temporais das componentes zonal (em azul) e meridional (em vermelho) do vento na região de Belém, para a primeira semana dos meses de a) e b) janeiro, c) e d) abril, e) e f) julho e g) e h) outubro de 2007, respectivamente.

Fonte: PIATAM - MAR (2008).

Na análise espectral, observa-se em todas as estações do ano e para ambas as componentes do vento, um pico de energia bem definido no período dos fenômenos que ocorrem durante o ciclo diurno, o que para a região é associado ao fenômeno de brisa marítima (PIATAM-MAR, 2008).

Ainda através de simulações com o modelo MM5 (PIATAM-MAR, *op. cit.*), foi determinada a frequência de ocorrência do vento por direções, para o mês central de cada uma das estações do ano, ou seja, janeiro, abril, julho e outubro de 2007, representando as estações de verão, outono, inverno e primavera (Fig. 33). Nota-se que a maior frequência, durante todas as estações do ano, é de ventos de leste, que correspondem a mais de 70 % dos ventos em outubro e cerca de 40 % nos outros meses.

A opção do uso do vento constante no espaço foi tomada em função das pequenas dimensões da área modelada. O vento foi também considerado constante no tempo durante as simulações, pois os resultados dos experimentos de cenários com vento e sem vento apresentaram variações não significativas.

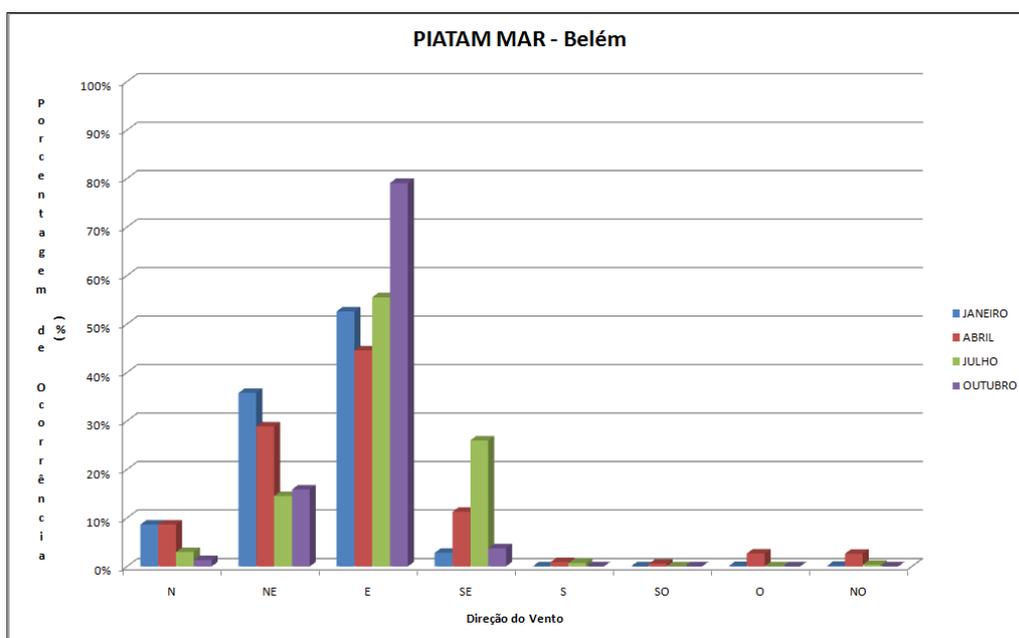


Figura 33. Frequência de ocorrência de vento distribuído por direções na região de Belém.

Fonte: PIATAM-MAR (2008).

Em função da ausência de informações na literatura relativas aos valores de vazões dos rios Guamá, Acará e Mojú próximo à confluência entre estes rios e a Baía de Guajará, mas sabendo da grande influência que a descarga fluvial possui sobre a hidrodinâmica local (PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989, MENDES *et al.*, 2004, PAIVA

et al., 2006, MIRANDA & MENDES, 2007, GREGÓRIO, 2008, GREGÓRIO & MENDES, 2009), foram atribuídas vazões constantes aos rios Guamá e Acará-Moju.

Além disso, foi considerada a grande variação das vazões destes rios ao longo do ano, descrita por PINHEIRO (1987) para a estação fluviométrica Bom Jardim, localizada no rio Guamá à cerca de 150 Km de Belém, entre os anos de 1965 e 1975 (Fig. 34), comportamento este intimamente relacionado às variações do regime de chuvas da região (período chuvoso e de estiagem), conforme mencionado anteriormente.

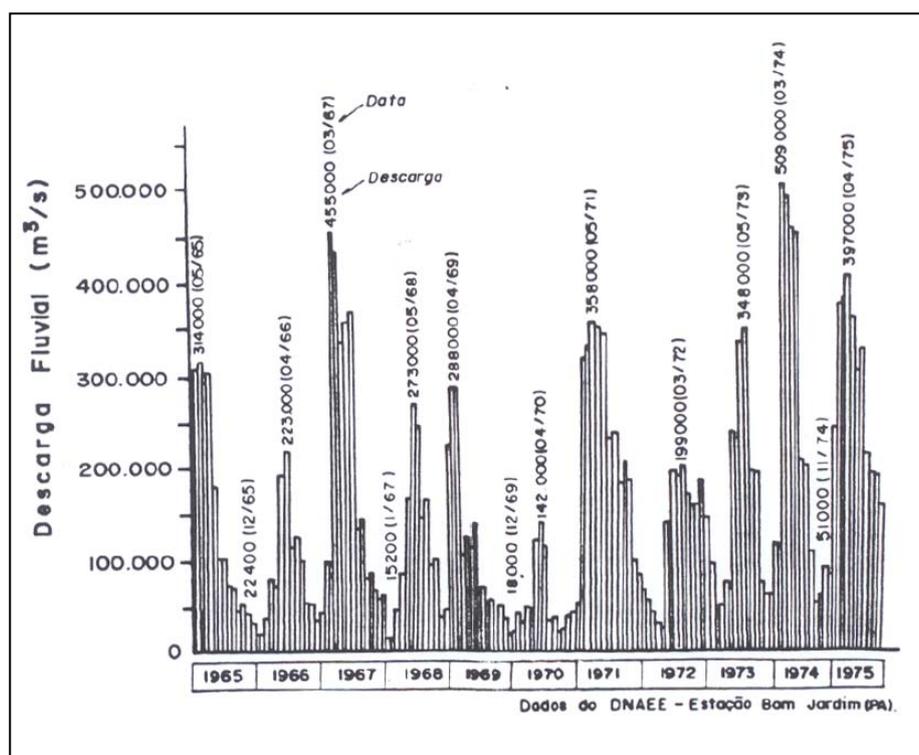


Figura 34. Variação da descarga do rio Guamá para o período entre 1965 e 1975 na estação Bom Jardim.

Fonte: PINHEIRO (1987).

3.3.3. CENÁRIOS

Como a região de estudo é dominada pelo regime de marés (PINHEIRO, 1987) e as condições hidrodinâmicas sofrem variações anuais ligadas principalmente aos padrões sazonais de precipitação (PINHEIRO, *op. cit.*), que influenciam fortemente as descargas fluviais, os cenários desta modelagem levam em consideração os cenários de influência fluvial (ciclo anual) e os ciclos lunares (sizígia e quadratura). Em função dos resultados apresentados anteriormente, também foi considerado nas simulações

hidrodinâmicas vento de leste constante no tempo e no espaço, típico na região durante todo o ano de 2007 (PIATAM-MAR, 2008), com velocidade de 6 m/s.

a) Período Chuvoso

Para as duas grades, de 1962 e 2002, este cenário envolve as vazões máximas dos rios Guamá e Acará-Moju, que ocorrem normalmente no mês de abril (mês posterior aos meses mais chuvosos do ano, segundo relatado ao longo do trabalho), conforme apresentado por PINHEIRO (1987). Foram adotadas vazões, constantes no tempo, de 2200 m³/s para o rio Guamá e 2000 m³/s para o rio Acará-Moju³. Os dados de marés usados foram referentes ao do mês de abril de 2007.

b) Período de Estiagem

Para as duas grades, de 1962 e 2002, este cenário envolve as vazões mínimas dos rios Guamá e Acará-Moju, que ocorrem normalmente no mês de outubro (mês posterior aos meses menos chuvosos do ano), conforme apresentado por PINHEIRO (1987). Com este intuito, foram adotadas vazões, constantes no tempo, de 1100 m³/s para o rio Guamá e 1000 m³/s para o rio Acará-Moju, valores de vazões equivalentes a metade dos valores de vazões máximas usados nas simulações do período chuvoso. A série de maré usada foi a do mês de outubro de 2007.

Estas simulações têm como objetivos principais o conhecimento da hidrodinâmica da Baía de Guajará, bem como avaliar as variações na circulação local relacionadas às variações da batimetria local.

Dessa forma, para a modelagem da Baía de Guajará, foram definidos os cenários para a modelagem, apresentados na figura 35. Foram simulados no modelo hidrodinâmico períodos de 30 dias, que equivalem à 720 horas, para todos os cenários, a fim de representar os períodos de sizígia e quadratura.

³ GREGÓRIO, Aderson Manoel da Silva. *Modelagem Hidrodinâmica da Baía de Guajará* [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <carina_bock@yahoo.com.br > em 2 julho 2009.

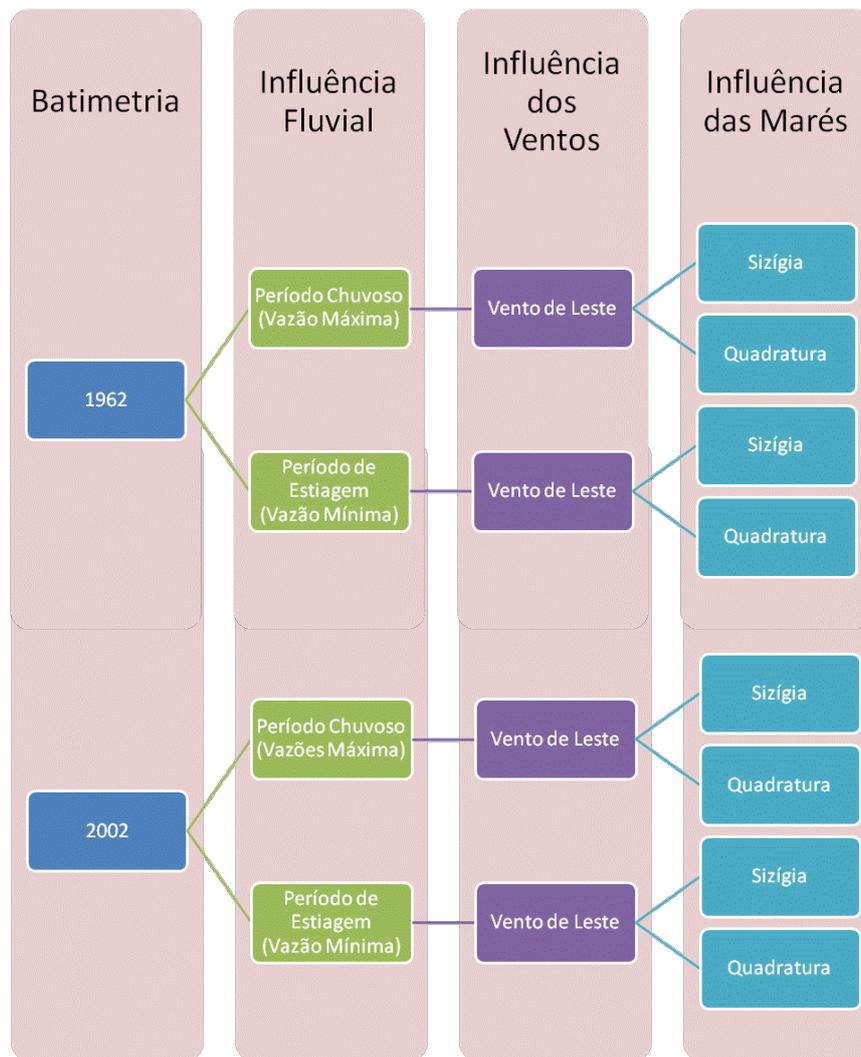


Figura 35. Cenários ambientais considerados para a modelagem hidrodinâmica de Baía de Guajará.

3.3.4. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

O modelo foi rodado no modo 2 (barotrópico), que realiza a simulação bidimensional e calcula o stress com o fundo na rotina denominada advave. O esquema de advecção usado foi o do tipo centrado. Foi estipulado um passo de tempo externo (dte) igual a 0,5 segundos, obedecendo a condição CFL.

Os principais parâmetros do modo bidimensional do POM, apresentados na tabela VI, foram configurados de acordo com trabalhos realizados com este modelo para regiões estuarinas semelhantes à Baía de Guajará. Quando necessário, os valores adotados eram alterados sempre sendo ajustados para a obtenção de padrões de circulação semelhantes ao descrito pela literatura para a área estudada.

Foi utilizada em todas as simulações uma função rampa inercial nas primeiras 50 horas, para que o tempo de ajuste ou aquecimento do modelo, denominado *spin up*, fosse alcançado. A partir deste período, a energia cinética do modelo já estava estabilizada. O *spin-up* é definido como período inicial do processo de integração das equações realizado pelo modelo em que a energia cinética média normalizada pela área aumenta até um valor aproximadamente constante (NETO, 2005). A partir do momento que a energia alcança este patamar de valores constantes, o modelo está estável. Portanto, pode-se considerar que qualquer resultado do modelo encontrado após a estabilização é adequado para análise (NETO, *op. cit.*).

Todas as simulações foram conduzidas nas dependências do Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), em uma mesma plataforma computacional, com o processador *Intel Pentium D*, com 3,00 GHz e 3,00 GB de RAM. O compilador utilizado para a realização das modelagens foi o *Compaq Visual Fortran 6.5*.

Tabela VI. Coeficientes e parâmetros usados no modelo hidrodinâmico POM.

| PARÂMETROS DO POM | VALOR |
|--|-----------------------|
| Coeficiente de difusividade Smagorinsky (horcorn) | 0,5 m ² /s |
| Coeficiente de viscosidade cinemática inicial (aam) | 500 m ² /s |
| Coeficiente mínimo de fricção do fundo (cbcmin) | 0,0025 |
| Comprimento de rugosidade de fundo (z0b) | 0,01 m |
| Número de Prandtl Turbulento horizontal inicial (tpni) | 2,0 |
| Número de Von-Karman (kappa) | 0,4 |
| Razão entre passo de tempo interno e passo de tempo externo (isplit) | 30 |

4. RESULTADOS

No presente capítulo os resultados obtidos através da aplicação do modelo hidrodinâmico POM são apresentados. Foram conduzidas análises sob o ponto de vista das variações da morfologia de fundo apresentadas pela Baía de Guajará, bem como a caracterização da hidrodinâmica da Baía de Guajará nos cenários simulados. Dados hidrodinâmicos observados na área foram também comparados aos resultados obtidos a partir do modelo implementado, conforme descrito no tópico seguinte.

4.1. COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS NO MODELO HIDRODINÂMICO COM DADOS OBSERVADOS

Inicialmente foi realizada uma análise preliminar dos resultados obtidos para observar se o modelo foi capaz de representar as principais feições dinâmicas observadas na Baía de Guajará e descritas no capítulo 2.

Considerando a existência de dados de velocidade superficial coletados em pontos de amostragem ao longo de seções posicionadas na Baía de Guajará (S1 e S2) e no rio Guamá (S5) obtidos pela PORTOBRÁS em 1980 e apresentados no capítulo 2 deste trabalho, optou-se pela análise comparativa dos mesmos com os resultados obtidos pelo modelo em pontos próximos. Tal análise foi realizada para a batimetria de 1962, pois, assumiu-se que a batimetria de 1962 era mais próxima da de 1980, época em que o levantamento sobre os dados de correntes foi realizado. Os dados de comportamento das correntes foram comparados com os dados da PORTOBRÁS em função da ausência de outra fonte de dados que possibilitasse a comparação com os resultados obtidos.

Foram selecionados 3 pontos próximos à seção S1 e 3 pontos próximos à seção S2. A grade numérica não cobre o local da seção S5. No entanto, foram escolhidos também 3 pontos posicionados próximo a desembocadura do rio Guamá para que os resultados também pudessem ser avaliados. Optou-se por utilizar os resultados do cenário do período chuvoso de 1962.

Não havia a localização exata das seções usadas nas medições da PORTOBRÁS na bibliografia consultada e nem dos pontos de amostragem. A escolha dos pontos para representar as seções foi feito de modo visual, tentando a maior proximidade possível com a posição representada em figuras de PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989).

A distribuição dos pontos foi feita de modo semelhante à adotada no levantamento feito pela PORTOBRÁS (Fig. 36). Nas seções 1 e 2, o ponto 1 foi posicionado próximo a margem direita da Baía de Guajará, o ponto 2 foi posto na parte central da baía e o ponto 3 próximo à margem esquerda. Na seção S5, o ponto 1 foi posicionado próximo à margem esquerda do rio Guamá, o segundo ponto na parte central do canal do rio e o ponto três próximo à margem direita.

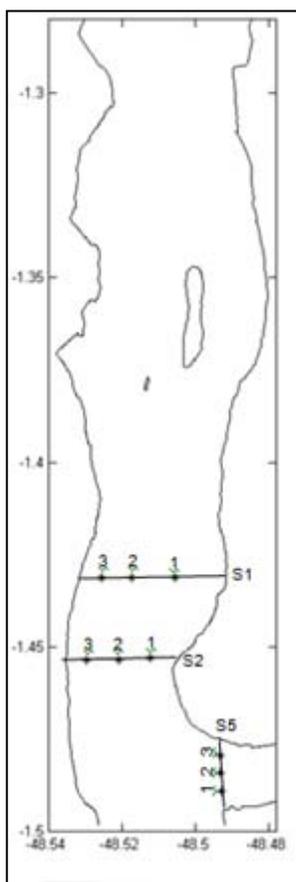


Figura 36. Posicionamento dos pontos escolhidos para a análise comparativa entre o cenário de 1962 e os dados obtidos por PORTOBRÁS (1980 *apud* PINHEIRO, 1987).

Foram utilizadas para a avaliação as componentes normais às seções. Dessa forma, para os pontos em S1 e S2 foram determinadas as velocidades máximas da componente meridional (v) durante a enchente e a vazante em cenários de sizígia e de quadratura (Tabs. VII e VIII). Para os pontos em S5 foram determinadas as velocidades máximas da componente zonal (u) durante a enchente e a vazante em cenários de sizígia e de quadratura (Tab. IX). Apesar do sinal da componente meridional ser negativo em fluxo de enchente e positivo em fluxo de vazante na baía e

da componente zonal ser negativa em fluxo de vazante e positiva em fluxo de enchente, serão apresentados apenas os valores absolutos dos resultados.

Tabela VII. Velocidades máximas (em m/s) da componente meridional da velocidade e durante marés de sizígia e quadratura na seção S1.

| Ponto | SIZÍGIA | | QUADRATURA | |
|-------|----------|---------|------------|---------|
| | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante |
| 01 | 0,34 | 0,28 | 0,30 | 0,25 |
| 02 | 0,40 | 0,32 | 0,35 | 0,30 |
| 03 | 0,63 | 0,49 | 0,61 | 0,47 |

Tabela VIII. Velocidades máximas (em m/s) da componente meridional da velocidade durante marés de sizígia e quadratura na seção S2.

| Ponto | SIZÍGIA | | QUADRATURA | |
|-------|----------|---------|------------|---------|
| | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante |
| 01 | 0,26 | 0,23 | 0,24 | 0,20 |
| 02 | 0,45 | 0,35 | 0,42 | 0,31 |
| 03 | 0,54 | 0,44 | 0,51 | 0,43 |

Tabela IX. Velocidades máximas (em m/s) da componente zonal da velocidade durante marés de sizígia e quadratura na seção S5.

| Ponto | SIZÍGIA | | QUADRATURA | |
|-------|----------|---------|------------|---------|
| | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante |
| 01 | 0,65 | 0,43 | 0,61 | 0,41 |
| 02 | 0,39 | 0,21 | 0,36 | 0,19 |
| 03 | 0,22 | 0,11 | 0,21 | 0,10 |

Os resultados indicam que, nas três seções consideradas, as mais intensas velocidades máximas ocorrem durante a sizígia, na enchente, enquanto as menos intensas velocidades máximas ocorrem durante as marés de quadratura na vazante. Este padrão foi observado nos trabalhos de PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989) ao analisarem os dados do relatório da PORTOBRÁS.

Nas seções 1 e 2, durante a sizígia e a quadratura, as maiores velocidades máximas de enchente e de vazante foram encontradas no ponto 3, ponto mais próximo a margem esquerda da baía. Tal fato está associado às maiores profundidades encontradas nesse ponto. Em S1, o ponto 3 apresenta 10,8 m de profundidade e em S2, 6,8 m de profundidade. Durante a enchente a maior velocidade máxima ocorre no ponto 3 da seção 1, atingindo valor de cerca de 0,63 m/s. Durante a vazante a mais alta velocidade máxima ocorre também no ponto 3 da seção 1, alcançando valor de 0,49 m/s.

As medições realizadas pela PORTOBRÁS na seção 1 indicam que as velocidades máximas de enchente nos 8 pontos monitorados variam entre 0,67 m/s a 1,68 m/s, enquanto as velocidades máximas de vazante oscilam entre 0,63 m/s e 1,74m/s. Na seção 2, as velocidades máximas de enchente nos 8 pontos monitorados variam entre 0,83 m/s a 2,10m/s, enquanto as velocidades máximas de vazante oscilam entre 0,88 m/s e 1,80 m/s.

Na seção 5, durante a sizígia e a quadratura, as mais altas velocidades de enchente e de vazante foram encontradas no ponto 1, ponto mais próximo a margem esquerda do rio. Durante a enchente a maior velocidade máxima atinge valor de cerca de 0,65 m/s, enquanto na vazante a mais alta velocidade máxima apresenta valor de 0,43m/s.

As medições realizadas pela PORTOBRÁS na seção 5 indicam que as velocidades máximas de enchente nos 4 pontos monitorados variam entre 0,78 m/s a 1,89 m/s, enquanto as velocidades máximas de vazante oscilam entre 0,60 m/s e 1,82 m/s. No entanto, os valores de velocidades obtidos no atual trabalho são bastante semelhantes aqueles encontrados por BERNARDI *et al.* (1989 *apud* SILVEIRA, 1989) em medições realizadas no rio Guamá. Os autores descreveram que nas proximidades do Campus da Universidade Federal do Pará, durante a enchente e a vazante, os valores máximos absolutos de velocidade são próximos à 0,4 m/s. Essas velocidades máximas são, segundo os autores, encontrados em período de sizígia e quadratura.

As velocidades máximas encontradas nas simulações nos pontos escolhidos para representar as seções 1, 2 e 5 são inferiores a maioria daquelas medidas pela PORTOBRÁS. Algumas considerações devem ser feitas.

A batimetria comparada foi a de 1962 e as medições da PORTOBRÁS foram realizadas em 1980. Como demonstrado por MIRANDA & MENDES (2007), a baía passou entre os anos de 1962 e 2002 por intensas modificações em sua batimetria, o que também implica em variações hidrodinâmicas.

Além disso, as medições de velocidade foram tomadas à 1 m abaixo da superfície. Enquanto as velocidades obtidas com um modelo barotrópico são o resultado da promediação das equações governantes do modelo na vertical. Tal fato pode explicar as baixas velocidades modeladas com relação às observadas na região.

Os resultados do modelo reproduzem de forma satisfatória as feições dinâmicas descritas por PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989) para os períodos de final de enchente e início de vazante, para marés de sizígia e final de vazante e início de enchente para marés de quadratura.

Na figura 37 está representada a distribuição espacial das correntes, obtida através da modelagem, no período de final de enchente e início de vazante durante a sizígia. É possível observar o fluxo de vazante próximo a margem direita da baía, nas proximidades do Canal do Meio e do Canal Oriental, enquanto no Canal da Ilha das Onças as correntes ainda não reverteram seu sentido. Padrão de dinâmica de correntes semelhante aos observados pela PORTOBRÁS.

A figura 38 representa o mapa da distribuição espacial das correntes, obtida através da modelagem, no período de final da vazante e início de enchente durante a quadratura. É claramente observado um fluxo de vazante próximo a margem esquerda da baía, sobre o Canal da Ilha das Onças, enquanto na margem direita da baía, próximo ao Canal do Meio e ao Canal Oriental, as correntes de enchente já são observadas. Este padrão de dinâmica de correntes apresenta grande semelhança ao padrão observado pela PORTOBRÁS.

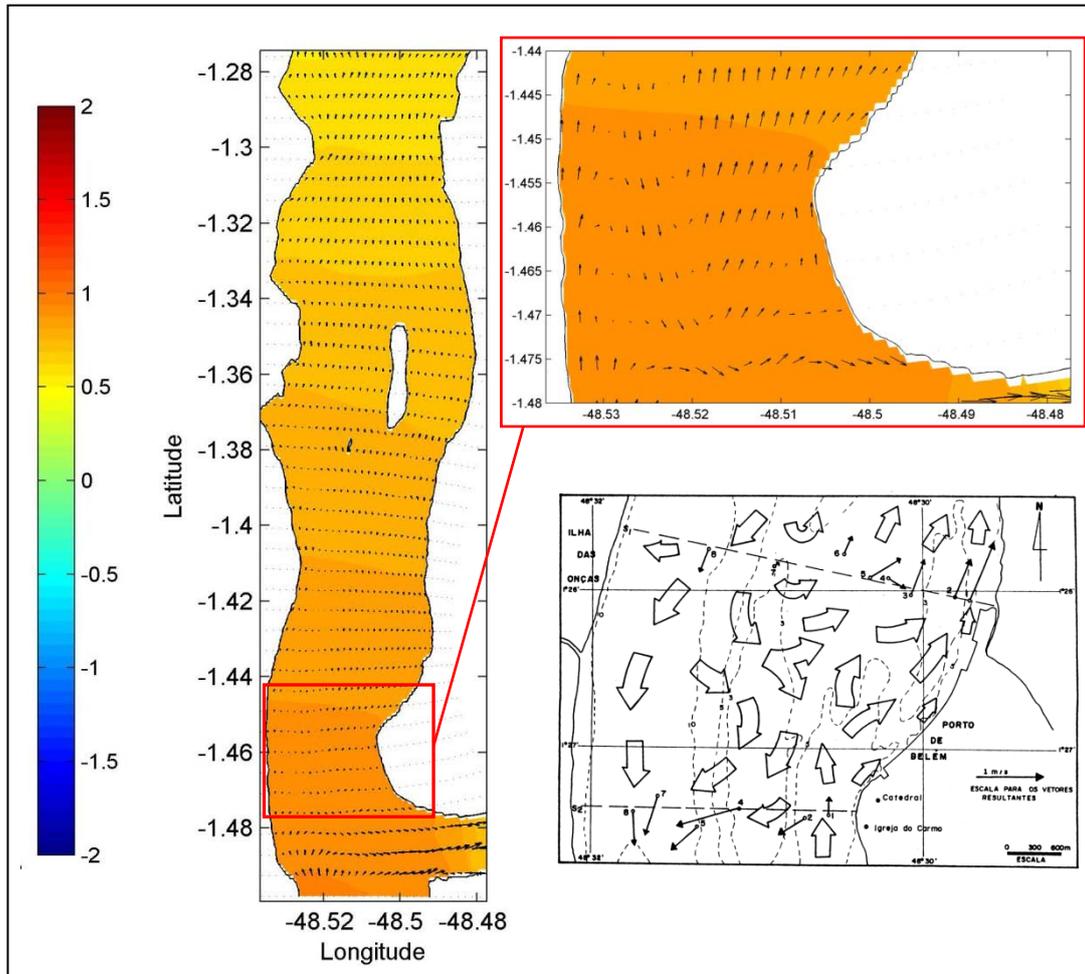


Figura 37. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a sizígia para o momento de início da vazante. Os vetores indicam o sentido e a intensidade das correntes e a escala de cores indica a elevação da superfície em metros.

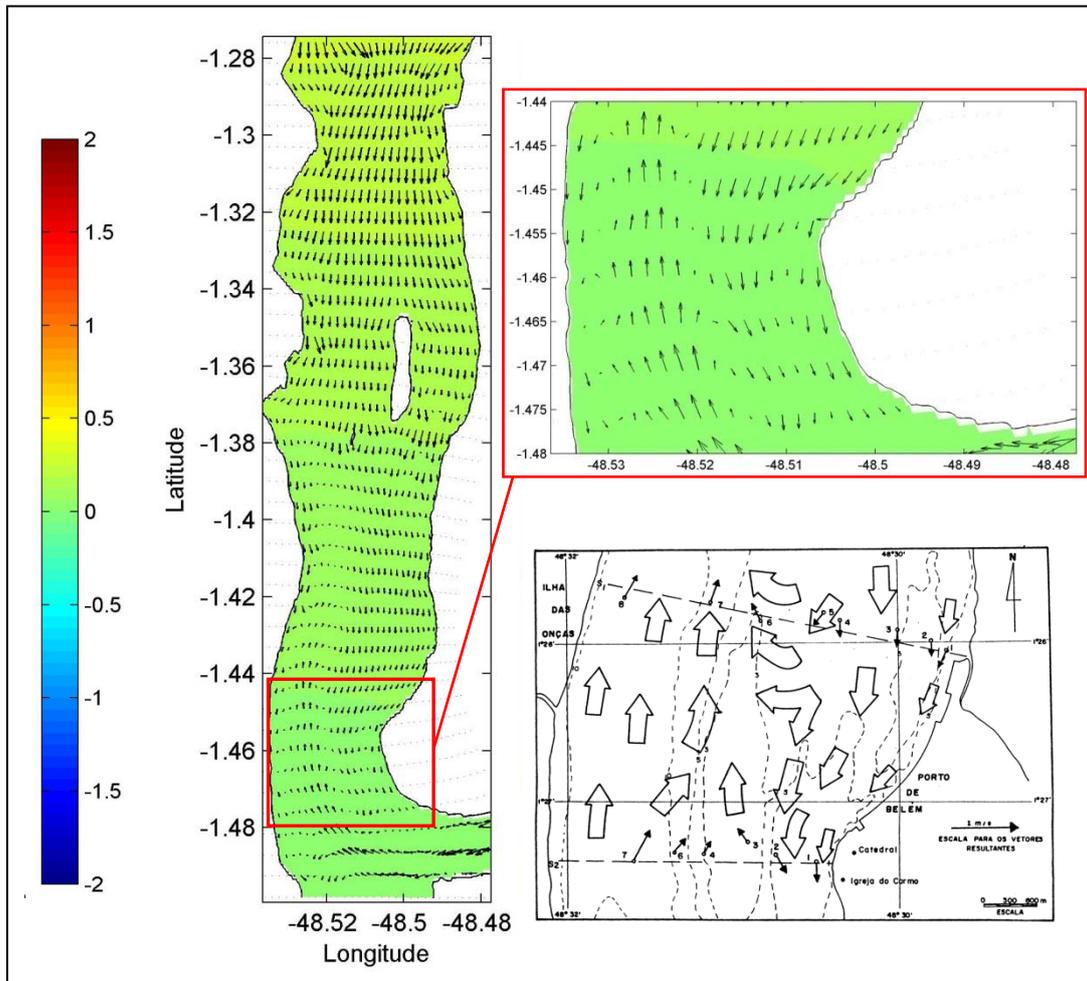


Figura 38. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a quadratura para o momento de início da enchente. Os vetores indicam o sentido e a intensidade das correntes e a escala de cores indica a elevação da superfície em metros.

4.2. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CENÁRIOS DE 1962 E 2002

Nessa seção serão realizadas análises comparativas entre as variações de morfologia de fundo observadas entre os anos de 1962 e 2002 e das principais características hidrodinâmicas. Séries temporais de variáveis prognósticas do modelo em pontos localizados em áreas de interesse da região e vazões de seções transversais à baía e a rio Guamá serão também caracterizadas.

Alguns instantes da circulação na Baía de Guajará, durante o período de sizígia nos momentos de maré enchente e de maré vazante, para os cenários estudados, são apresentados nas figuras 39 e 40.

Tanto durante a sizígia quanto durante a quadratura, as maiores velocidades das correntes em todos os cenários considerados na modelagem são encontradas durante a enchente, concordando com as observações feitas por PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989).

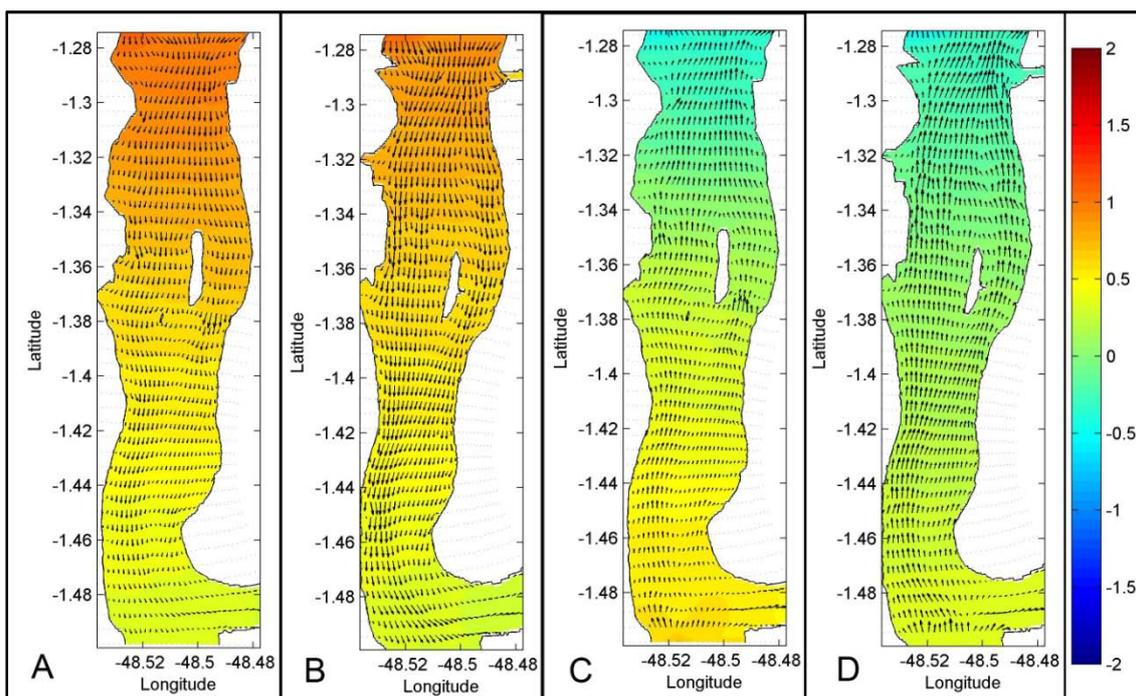


Figura 39. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a sizígia nos cenários que englobam o período chuvoso. Momentos de maré enchente no a) cenário de 1962 e no b) cenário de 2002. Maré vazante no c) cenário de 1962 e no d) cenário de 2002. Os vetores indicam o sentido e a intensidade das correntes e a escala de cores indica a elevação da superfície em metros.

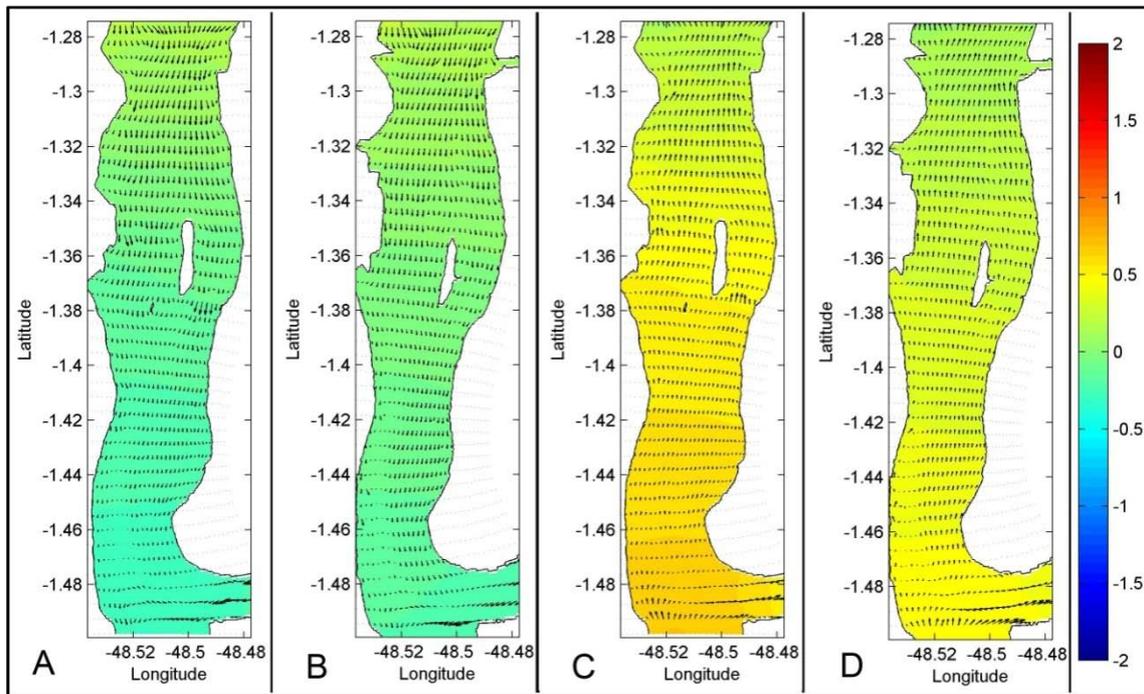


Figura 40. Campos de corrente na Baía de Guajará durante a sizígia nos cenários que englobam o período de estiagem. Momentos de maré enchente no a) cenário de 1962 e no b) cenário de 2002. Maré vazante no c) cenário de 1962 e no d) cenário de 2002. Os vetores indicam o sentido e a intensidade das correntes e a escala de cores indica a elevação da superfície em metros.

É observado que, nos cenários de 1962, as velocidades máximas de vazante ocorrem primeiramente no Canal da Ilha das Onças e na parte inferior do Canal Oriental. Já nos cenários de 2002, as velocidades máximas de vazante são encontradas primeiramente no Canal da Ilha das Onças e na parte superior da baía, próximo à margem esquerda.

Para avaliar as diferenças entre as magnitudes das correntes entre os cenários, as matrizes das magnitudes de corrente de cada um dos quatro cenários, em um mesmo instante de sizígia, foram interpoladas para uma grade de latitude e longitude regulares. Foram construídas figuras com a diferença entre as magnitudes nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 41a) e com a diferença entre as magnitudes nos cenários de estiagem 1962 e 2002 (Fig. 41b). Nessas figuras, os valores positivos indicam um aumento da magnitude da corrente no cenário de 2002 considerado e os valores negativos indicam uma redução da magnitude da corrente no cenário de 2002. Valores iguais a zero indicam que não houve variação na magnitude das correntes entre os cenários.

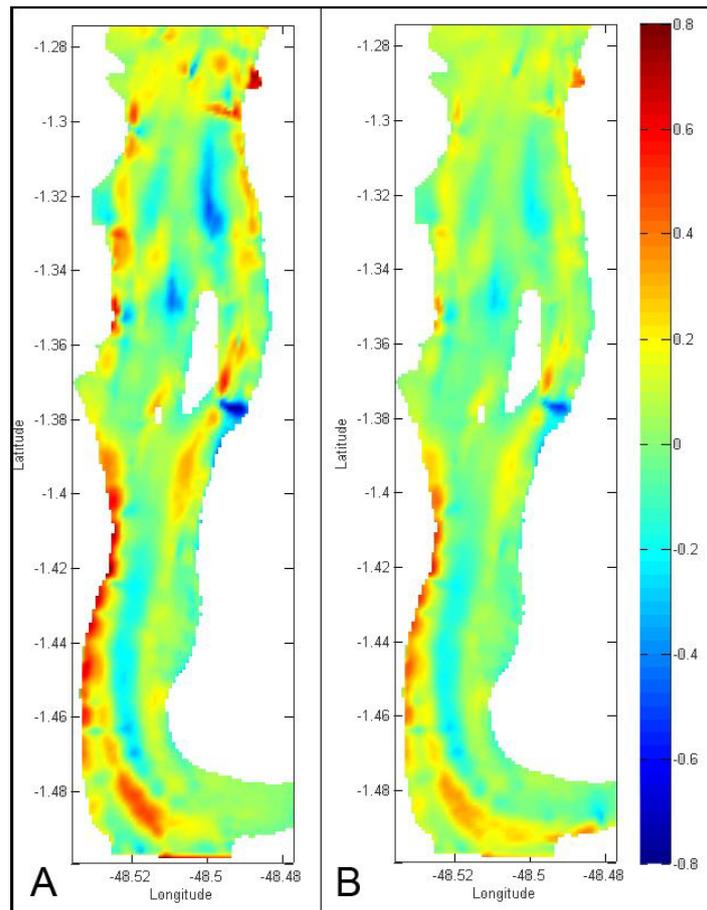


Figura 41. Diferença entre a matriz de magnitude das correntes, em um instante de sizígia, entre a) os cenários chuvosos de 1962 e 2002 e b) entre os cenários de estiagem de 1962 e 2002. A escala de cores indica a diferença entre as magnitudes (em m/s). Os valores positivos indicam aumento da magnitude no cenário de 2002 e os valores negativos indicam redução da magnitude no cenário de 2002.

As maiores diferenças entre as magnitudes das correntes são encontradas entre os cenários chuvosos de 1962 e 2002. Entretanto, em ambos os mapas de diferença, é possível observar um padrão semelhante de variação da magnitude entre os cenários.

Através das figuras é possível observar que ao longo da margem esquerda, desde o Canal do Rio Acará-Moju, passando pelo Canal da Ilha das Onças até a parte superior da baía, e também em parte do Canal Oriental e próximo ao distrito de Icoaraci, houve um aumento das magnitudes das correntes tanto no cenário chuvoso de 2002 quanto no cenário de estiagem de 2002. Nos cenários chuvoso e de estiagem de 2002, uma pequena redução na magnitude das correntes pode ser observada na parte central e inferior da baía. As maiores reduções da magnitude nos cenários de 2002 são observadas em uma região próxima ao Canal Oriental e na região central superior da baía.

No cenário do período chuvoso de 1962, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,43 m/s no período de sizígia e 1,34 m/s durante o período de quadratura. Já na vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,32 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,27 m/s.

No cenário do período chuvoso de 2002, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,89 m/s no período de sizígia e 1,70 m/s durante o período de quadratura. Na vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,78 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,63 m/s.

No cenário do período de estiagem de 1962, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,35 m/s no período de sizígia e 1,25 m/s durante o período de quadratura. Durante a vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,22 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,09 m/s.

No cenário do período de estiagem de 2002, as correntes durante a enchente alcançam valores próximos de 1,74 m/s no período de sizígia e 1,62 m/s durante o período de quadratura. Na vazante, a velocidade máxima de corrente encontrada foi próxima de 1,59 m/s em período de sizígia enquanto em período de quadratura a maior velocidade foi de cerca de 1,55 m/s.

Tanto nos cenários de 2002, quanto nos cenários de 1962, as maiores velocidades são encontradas durante as simulações que caracterizam os períodos chuvosos.

Para efeito de comparação entre os resultados obtidos na modelagem dos cenários de 1962 e 2002, foram escolhidos 7 pontos de interesse (Tab. X). A escolha da posição destes pontos foi fundamentada em resultados de trabalhos realizados anteriormente (Fig. 42), em áreas da baía que sofreram grandes alterações da morfologia de fundo e batimetria ao longo do tempo (MENDES *et al.*, 2004, MIRANDA & MENDES, 2007, GREGÓRIO, 2008).

Tabela X. Localização e profundidade dos pontos analisados.

| <i>Ponto</i> | <i>Local</i> | <i>Latitude</i> | <i>Longitude</i> | <i>Profundidade em 1962 (m)</i> | <i>Profundidade em 2002 (m)</i> |
|--------------|-------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 | Icoaraci | 1° 17' 26" | 48° 29' 29" | 3,08 | 7,23 |
| 2 | Banco da Barra | 1° 20' 45" | 48° 30' 02" | 3,55 | 3,85 |
| 3 | Canal Oriental | 1° 22' 24" | 48° 29' 46" | 7,64 | 13,08 |
| 4 | Terminal Miramar | 1° 24' 37" | 48° 30' 13" | 5,72 | 6,86 |
| 5 | Belém | 1° 27' 34" | 48° 30' 41" | 5,59 | 6,38 |
| 6 | Canal da Ilha das Onças | 1° 28' 07" | 48° 31' 34" | 11,36 | 19,70 |
| 7 | Rio Guamá | 1° 28' 56" | 48° 30' 26" | 4,06 | 3,05 |

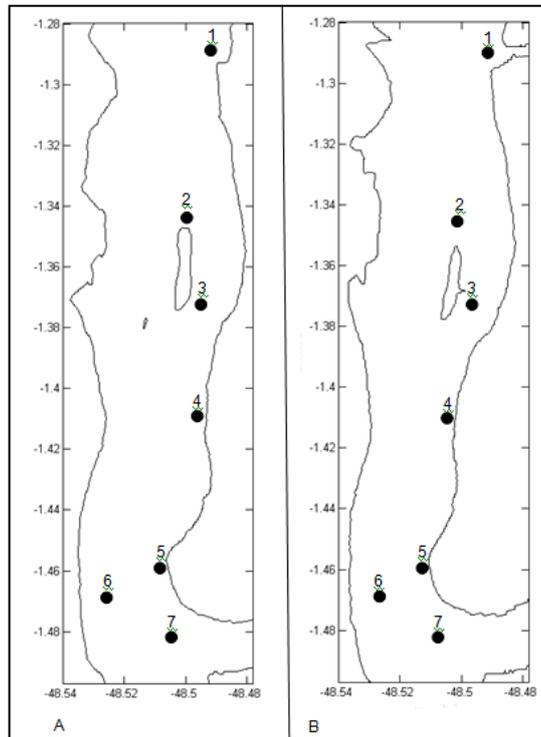


Figura 42. Posicionamento dos 7 pontos escolhidos para a análise da variação das componentes meridional e zonal da velocidade, da elevação da superfície livre e da profundidade entre os anos de 1962 e 2002.

Na parte superior da baía, o ponto 1 está localizado próximo ao distrito de Icoaraci e o ponto 2 está posicionado sobre o Banco da Barra. Na região central estão o ponto 3, sobre o Canal Oriental, e o ponto 4, próximo ao Terminal Miramar. Na zona inferior estão localizados os pontos 5, próximo a orla de Belém, 6, sobre o Canal da Ilha das Onças, e o 7, próximo desembocadura do rio Guamá.

Os pontos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 apresentaram aumento em suas profundidades entre os anos de 1962 e 2002. Somente a profundidade do ponto 7 demonstrou uma redução dentro do período, diminuindo em cerca de 24,8 %.

O ponto que apresentou maior variação na profundidade ao longo dos anos considerados foi o ponto 1, cuja profundidade aumentou em cerca de 134 %. O ponto cuja profundidade sofreu menor variação no período foi o de número 2, no qual pode ser constatado um aumento de 8,4 % em sua profundidade.

Outros pontos que apresentaram variações significativas na batimetria foram os pontos 6, com aumento de 73,4 % na profundidade, e o 3, aumentando em 71,2 % sua profundidade.

Séries de elevação da superfície livre modeladas para os pontos foram analisadas e os valores máximos de elevação da superfície livre foram determinados (Tabs. XI e XII). As maiores elevações de superfície livre durante a vazante e a enchente em todos os cenários foram encontradas no ponto 1. Entre os períodos chuvosos de 1962 e 2002, a maior variação entre as elevações máximas de superfície livre nos pontos considerados ocorreu durante a enchente de quadratura. Nos períodos de estiagem, as maiores variações entre as elevações máximas de superfície livre nos pontos ocorreram também durante a enchente de quadratura e também durante a enchente de sizígia.

No período chuvoso de 1962, na sizígia, os pontos 1, 2 e 4 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas, enquanto os pontos 3, 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante. Na quadratura, os pontos 1, 2 e 3 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas, enquanto os pontos 4, 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante.

No período chuvoso de 2002, na sizígia, os pontos 1 e 2 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas, enquanto os pontos 3, 4, 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante. Na quadratura, os pontos 1, 2, 3 e 4 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas, enquanto os pontos 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante.

Tabela XI. Valores máximos de elevação da superfície livre, em m, para os pontos de interesse nas simulações dos períodos chuvosos de 1962 e 2002.

| Seção | <i>CENÁRIO CHUVOSO DE 1962</i> | | | | <i>CENÁRIO CHUVOSO DE 2002</i> | | | |
|-------|--------------------------------|---------|------------|---------|--------------------------------|---------|------------|---------|
| | SIZÍGIA | | QUADRATURA | | SIZÍGIA | | QUADRATURA | |
| | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante |
| 1 | 1,22 | 1,17 | 1,18 | 1,06 | 1,22 | 1,17 | 1,04 | 0,88 |
| 2 | 1,07 | 0,85 | 1,07 | 0,71 | 1,07 | 0,85 | 0,91 | 0,59 |
| 3 | 1,03 | 0,74 | 1,03 | 0,62 | 1,00 | 0,74 | 0,84 | 0,48 |
| 4 | 0,96 | 0,53 | 0,96 | 0,39 | 0,93 | 0,53 | 0,80 | 0,39 |
| 5 | 0,95 | 0,46 | 0,95 | 0,25 | 0,85 | 0,46 | 0,73 | 0,27 |
| 6 | 0,96 | 0,45 | 0,96 | 0,25 | 0,86 | 0,45 | 0,73 | 0,26 |
| 7 | 0,96 | 0,45 | 0,96 | 0,25 | 1,00 | 0,45 | 0,71 | 0,24 |

Tabela XII. Valores máximos de elevação de superfície livre, em m, para os pontos de interesse nas simulações dos períodos de estiagem de 1962 e 2002.

| Seção | <i>CENÁRIO DE ESTIAGEM DE 1962</i> | | | | <i>CENÁRIO DE ESTIAGEM DE 2002</i> | | | |
|-------|------------------------------------|---------|------------|---------|------------------------------------|---------|------------|---------|
| | SIZÍGIA | | QUADRATURA | | SIZÍGIA | | QUADRATURA | |
| | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante |
| 1 | 1,22 | 1,18 | 1,22 | 1,17 | 1,07 | 1,01 | 1,06 | 1,00 |
| 2 | 1,07 | 0,86 | 1,07 | 0,85 | 0,91 | 0,73 | 0,90 | 0,73 |
| 3 | 1,00 | 0,74 | 1,01 | 0,74 | 0,81 | 0,60 | 0,80 | 0,60 |
| 4 | 0,93 | 0,53 | 0,93 | 0,53 | 0,76 | 0,53 | 0,76 | 0,53 |
| 5 | 0,85 | 0,47 | 0,85 | 0,46 | 0,65 | 0,41 | 0,64 | 0,41 |
| 6 | 0,85 | 0,46 | 0,86 | 0,45 | 0,64 | 0,40 | 0,64 | 0,40 |
| 7 | 0,86 | 0,46 | 0,86 | 0,45 | 0,62 | 0,41 | 0,61 | 0,40 |

No período de estiagem de 1962, na sizígia, os pontos 1, 2 e 4 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas, enquanto os pontos 3, 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante. Na quadratura, os pontos 1, 2 e 4 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas cada, enquanto os pontos 3, 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante.

No período de estiagem de 2002, na sizígia, os pontos 1, 2 e 3 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas cada, enquanto os pontos 4, 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante. Na quadratura, os pontos 1, 2 e 3 apresentaram tempo de enchente e de vazante de 6 horas, enquanto os pontos 4, 5, 6 e 7 apresentaram 5 horas como tempo de enchente e 7 horas como tempo de vazante.

Os pontos mais próximos aos rios Guamá, Acará e Moju, apresentam um tempo maior de vazante do que de enchente nos cenários, que pode ser explicado pela influência fluvial que provoca uma defasagem no tempo de vazante em relação aos pontos localizados à jusante. Além disso, os pontos mais próximos aos rios apresentam séries de elevação de superfície livre com curvas mais assimétricas em função do efeito do encontro no nível da maré com a descarga dos rios, bem como pelo atrito que a onda de maré sofre ao se propagar em direção a montante dos rios (Fig. 43). Também pode ser notado uma pequena redução nas amplitudes de maré nos pontos mais próximos aos rios, de maneira geral, durante os períodos chuvosos de 1962 e 2002 quando comparados aos períodos de estiagem.

NICOLITE *et al.* (2009) ressaltam que as marés oceânicas podem sofrer distorções em suas amplitudes e modificação na fase durante sua progressão no sentido de águas rasas e ambientes restritos como baías e estuários. Estas alterações ocorrem em função do atrito com o fundo; à compressão das margens do canal; à configuração da costa que direciona o fluxo de marés, e à profundidade do canal estuarino (NICOLITE *et al.*, 2009). Além dessas alterações, perturbações hidrológicas e meteorológicas também são responsáveis por distorções na maré astronômica (NICOLITE *et al.*, 2009).

Para a avaliação conjunta da velocidade e direção da corrente, o vetor velocidade foi decomposto em componentes meridional e zonal e séries temporais para cada um dos 7 pontos de interesse foram construídas.

Para a construção das séries temporais da componente meridional da velocidade nos pontos analisados nos cenários dos períodos chuvosos de 1962 e de 2002, foi considerado um período de 24 horas durante a sizígia, compreendido entre 370 horas e 394 horas, conforme representado na figura 44. São apresentadas no

trabalho: as séries temporais da componente meridional da velocidade do ponto 1 nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 45); as séries temporais da componente meridional da velocidade do ponto 2 nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 46); as séries temporais da componente meridional da velocidade do ponto 3 nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 47); as séries temporais da componente meridional da velocidade do ponto 4 nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 48); as séries temporais da componente meridional da velocidade do ponto 5 nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 49); as séries temporais da componente meridional da velocidade do ponto 6 nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 50) e as séries temporais da componente meridional da velocidade do ponto 7 nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 51).

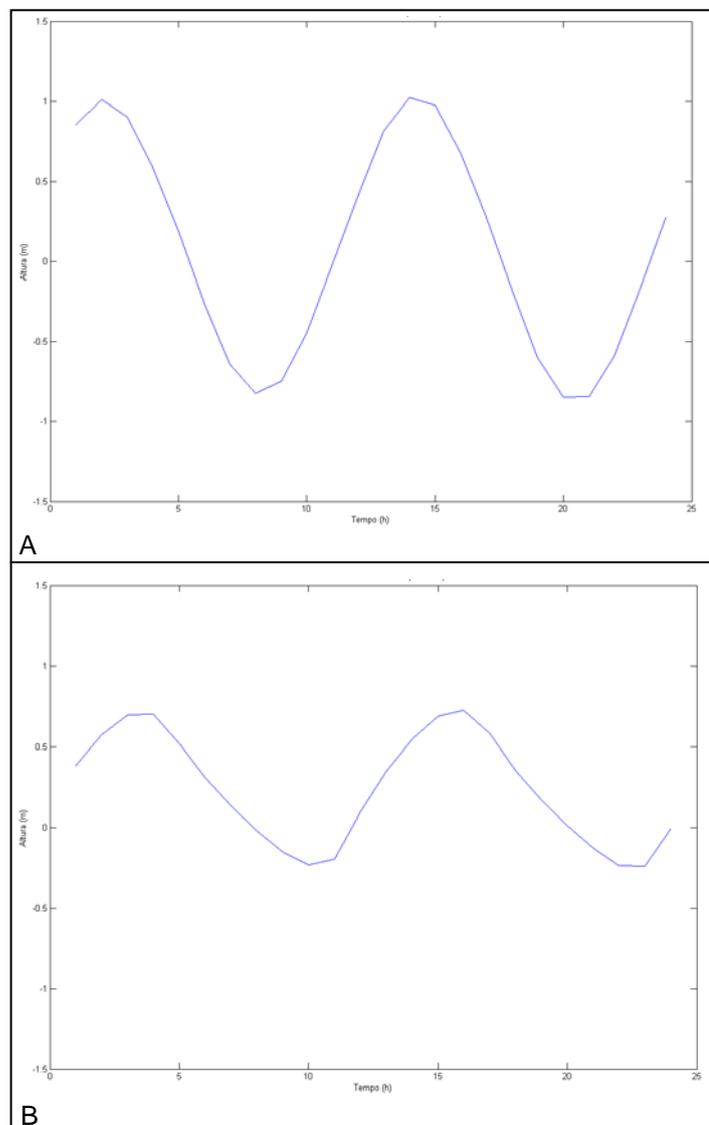


Figura 43. Elevação da superfície livre nos a) ponto 1 e b) ponto 6, ambos no cenário chuvoso de 2002.

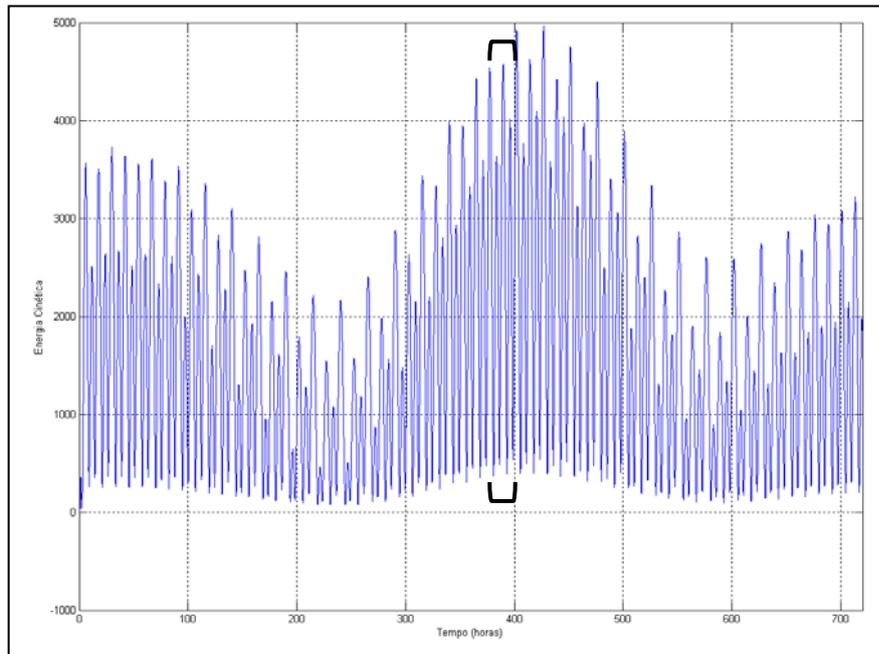


Figura 44. Evolução temporal da energia cinética durante os 30 dias, ou 720 horas, de simulação numérica do cenário chuvoso. Os colchetes destacam o intervalo de tempo dentro da sizígia usado para a construção das séries temporais da componente meridional da velocidade.

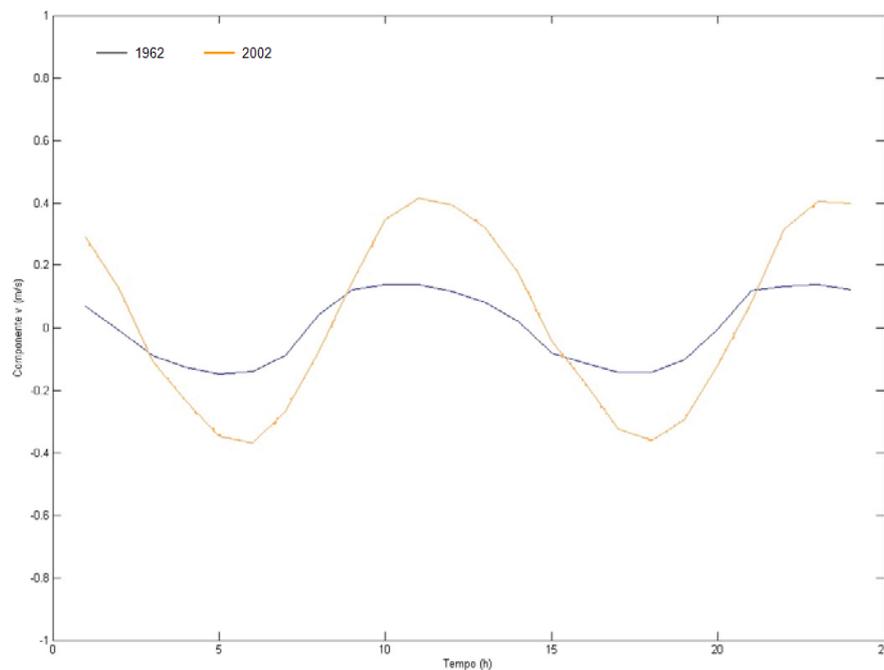


Figura 45. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 1, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

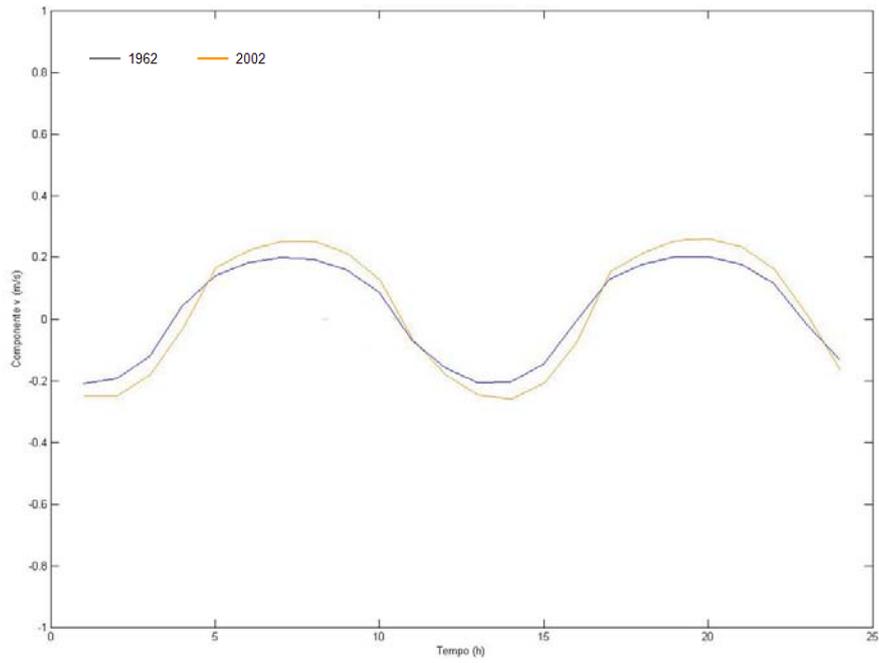


Figura 46. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 2, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

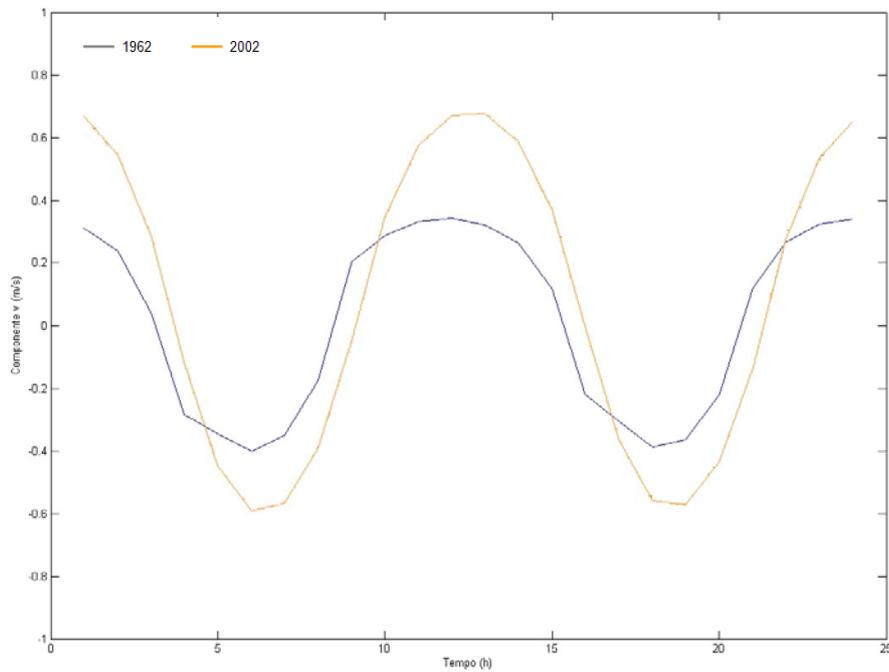


Figura 47. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 3, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

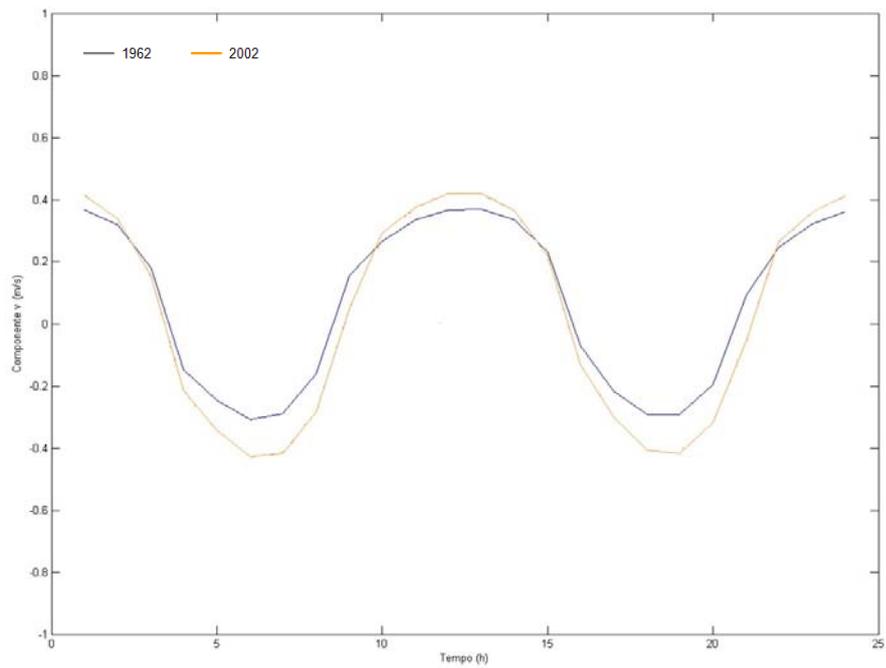


Figura 48. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 4, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

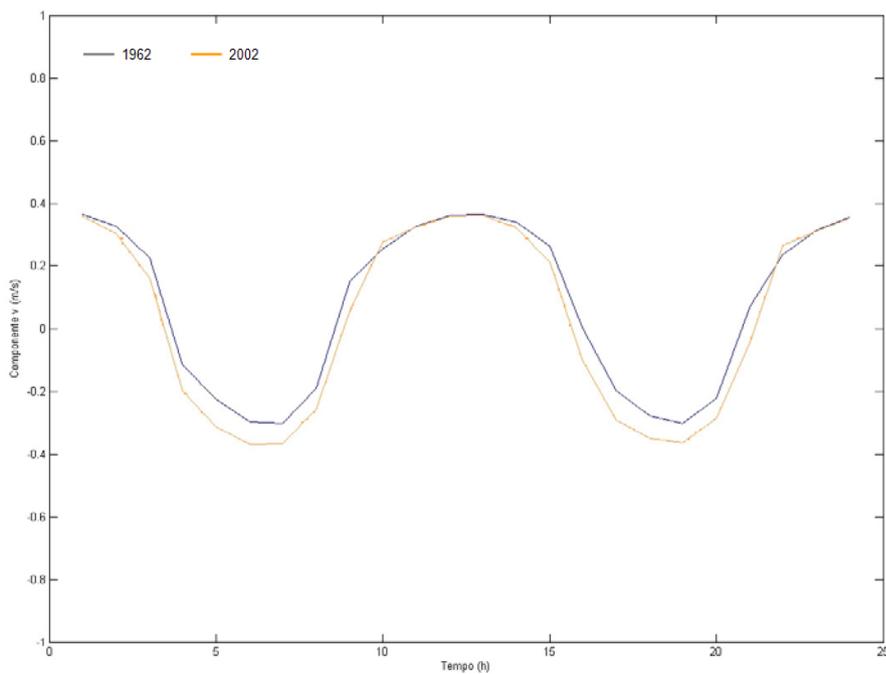


Figura 49. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 5, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

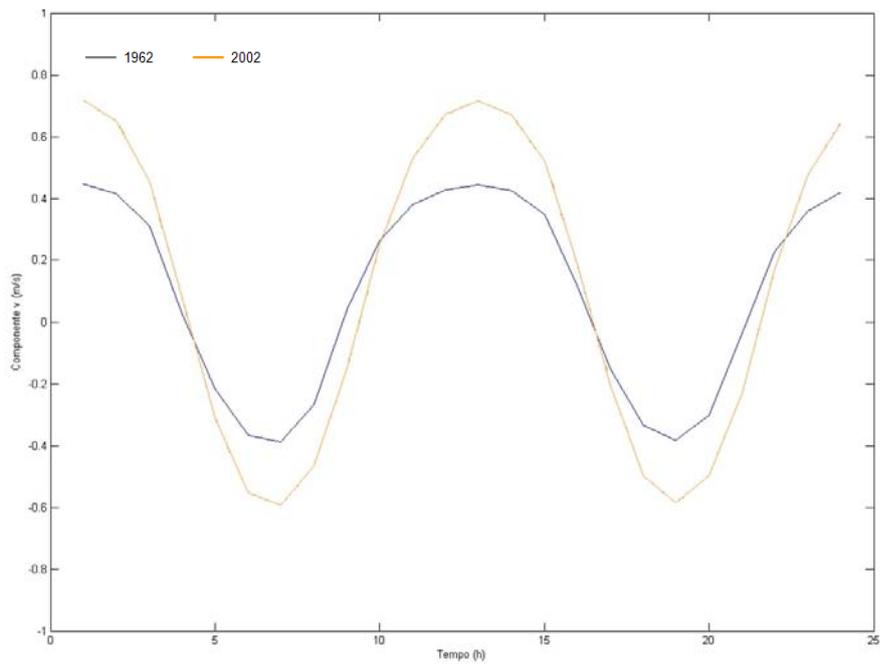


Figura 50. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 6, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

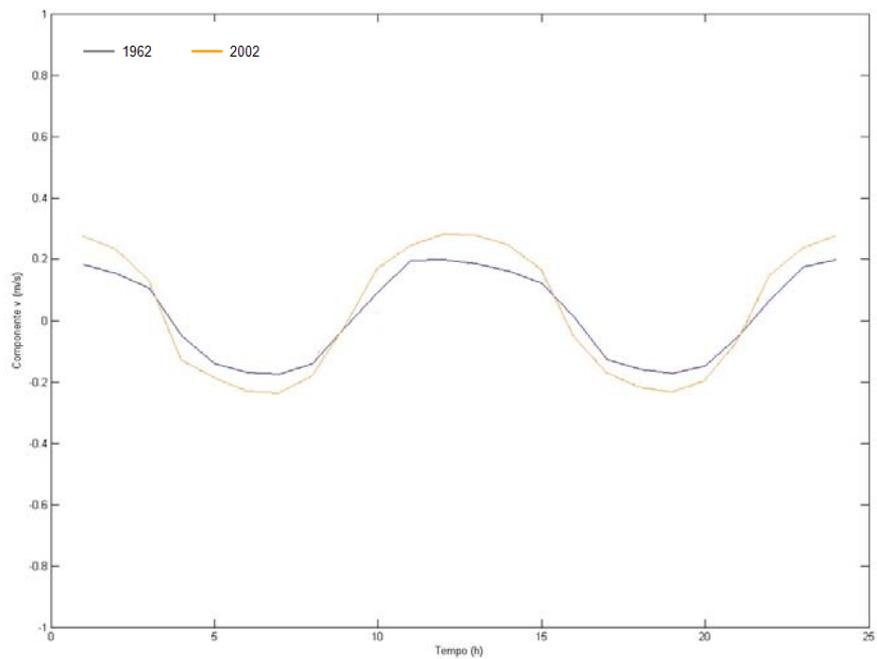


Figura 51. Séries temporais da componente meridional da velocidade (em m/s) no ponto 7, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

Considerando os resultados dos cenários do período chuvoso de 1962 (Tab. XIII) e 2002 (Tab. XIV), é observado que há um aumento nos valores das velocidades máximas das componentes zonal e meridional no ano de 2002, tanto em sizígia quanto em quadratura, para a maior parte dos pontos.

No cenário chuvoso de 1962, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia, com valor próximo de 0,46m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a quadratura, com valor próximo de 0,61 m/s. Neste cenário, as maiores velocidades máximas de enchente ocorrem nos pontos 4 e 6, enquanto as maiores velocidades máximas de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

No cenário chuvoso de 2002, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia, com valor próximo de 0,72m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a quadratura, com valor próximo de 0,62 m/s. As maiores velocidades máximas de enchente e de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

Entre 1962 e 2002 nos cenários dos períodos chuvosos, as maiores variações entre os valores de velocidade meridional máxima na enchente ocorreram no ponto 3, em sizígia e quadratura. Na vazante, as maiores variações foram observadas no ponto 1, na sizígia, e nos pontos 3 e 4 na quadratura.

Tabela XIII. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (Umax) e meridional (Vmax), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário chuvoso de 1962.

| Ponto | SIZÍGIA | | | | QUADRATURA | | | |
|-------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante |
| 1 | 0,07 | 0,06 | 0,15 | 0,16 | 0,06 | 0,05 | 0,14 | 0,37 |
| 2 | 0,11 | 0,15 | 0,21 | 0,24 | 0,09 | 0,14 | 0,20 | 0,26 |
| 3 | 0,07 | 0,03 | 0,35 | 0,44 | 0,05 | 0,02 | 0,33 | 0,60 |
| 4 | 0,09 | 0,09 | 0,38 | 0,35 | 0,08 | 0,07 | 0,38 | 0,44 |
| 5 | 0,11 | 0,09 | 0,38 | 0,37 | 0,08 | 0,06 | 0,35 | 0,38 |
| 6 | 0,08 | 0,08 | 0,46 | 0,47 | 0,10 | 0,07 | 0,44 | 0,61 |
| 7 | 0,24 | 0,22 | 0,20 | 0,20 | 0,06 | 0,20 | 0,18 | 0,25 |

Tabela XIV. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (Umax) e meridional (Vmax), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário chuvoso de 2002.

| Ponto | SIZÍGIA | | | | QUADRATURA | | | |
|-------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante |
| 1 | 0,14 | 0,15 | 0,42 | 0,37 | 0,12 | 0,02 | 0,40 | 0,37 |
| 2 | 0,11 | 0,15 | 0,27 | 0,25 | 0,05 | 0,08 | 0,26 | 0,25 |
| 3 | 0,18 | 0,17 | 0,69 | 0,59 | 0,17 | 0,16 | 0,66 | 0,57 |
| 4 | 0,09 | 0,08 | 0,43 | 0,43 | 0,02 | 0,07 | 0,41 | 0,41 |
| 5 | 0,10 | 0,08 | 0,37 | 0,36 | 0,02 | 0,01 | 0,35 | 0,38 |
| 6 | 0,13 | 0,15 | 0,72 | 0,60 | 0,11 | 0,14 | 0,69 | 0,62 |
| 7 | 0,24 | 0,22 | 0,29 | 0,24 | 0,15 | 0,22 | 0,28 | 0,24 |

Considerando os resultados dos cenários do período estiagem de 1962 (Tab. XV) e 2002 (Tab. XVI), é observado que há um aumento nos valores das velocidades máximas das componentes zonal e meridional no ano de 2002, tanto em sizígia quanto em quadratura, para a maior parte dos pontos.

No cenário de estiagem de 1962, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia, com valor próximo de 0,43 m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a sizígia e a quadratura, com valor próximo de 0,46 m/s. Neste cenário, as maiores velocidades máximas de enchente ocorrem nos pontos 4, 5 e 6, enquanto as maiores velocidades máximas de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

No cenário de estiagem de 2002, a maior velocidade máxima da componente meridional de enchente ocorre no ponto 6, durante a sizígia e a quadratura, com valor próximo de 0,72 m/s. A maior velocidade máxima da componente meridional de vazante também ocorre no ponto 6, durante a quadratura, com valor próximo de 0,69 m/s. As maiores velocidades máximas de enchente e de vazante ocorrem nos pontos 6 e 3.

Entre 1962 e 2002 nos cenários dos períodos de estiagem, as maiores variações entre os valores de velocidade máxima de meridional na enchente

ocorreram no ponto 3, em sizígia e quadratura. Na vazante, a maior variação foi observada no ponto 1, na sizígia e na quadratura.

Tabela XV. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (Umax) e meridional (Vmax), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário de estiagem de 1962.

| Ponto | SIZÍGIA | | | | QUADRATURA | | | |
|-------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante |
| 1 | 0,07 | 0,06 | 0,15 | 0,16 | 0,05 | 0,05 | 0,13 | 0,15 |
| 2 | 0,11 | 0,15 | 0,21 | 0,23 | 0,10 | 0,13 | 0,20 | 0,22 |
| 3 | 0,07 | 0,02 | 0,33 | 0,43 | 0,05 | 0,02 | 0,30 | 0,44 |
| 4 | 0,08 | 0,09 | 0,36 | 0,34 | 0,08 | 0,07 | 0,30 | 0,32 |
| 5 | 0,09 | 0,08 | 0,35 | 0,36 | 0,08 | 0,08 | 0,33 | 0,33 |
| 6 | 0,07 | 0,07 | 0,43 | 0,46 | 0,07 | 0,06 | 0,41 | 0,46 |
| 7 | 0,23 | 0,20 | 0,18 | 0,20 | 0,19 | 0,20 | 0,16 | 0,19 |

Tabela XVI. Valores de velocidade máximas das componentes zonal (Umax) e meridional (Vmax), em m/s, dos pontos de interesse encontrados para o cenário de estiagem de 2002.

| Ponto | SIZÍGIA | | | | QUADRATURA | | | |
|-------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante | Umax Enchente | Umax Vazante | Vmax Enchente | Vmax Vazante |
| 1 | 0,14 | 0,15 | 0,42 | 0,40 | 0,13 | 0,16 | 0,43 | 0,41 |
| 2 | 0,05 | 0,09 | 0,26 | 0,28 | 0,03 | 0,07 | 0,25 | 0,28 |
| 3 | 0,18 | 0,18 | 0,69 | 0,65 | 0,17 | 0,17 | 0,67 | 0,65 |
| 4 | 0,03 | 0,08 | 0,43 | 0,47 | 0,02 | 0,08 | 0,42 | 0,47 |
| 5 | 0,03 | 0,02 | 0,37 | 0,42 | 0,03 | 0,01 | 0,36 | 0,39 |
| 6 | 0,15 | 0,14 | 0,72 | 0,68 | 0,14 | 0,12 | 0,72 | 0,69 |
| 7 | 0,14 | 0,22 | 0,28 | 0,26 | 0,14 | 0,21 | 0,28 | 0,27 |

Com o objetivo de melhor entender as variações na hidrodinâmica em todos os cenários decorrentes das alterações na morfologia de fundo e na batimetria da Baía de Guajará, foram estabelecidas 5 seções transversais à baía (seções A, B, C, D e E) e uma transversal ao rio Guamá (seção F), totalizando 6 seções (Fig. 52), das quais foram determinados os transportes de volume normais à cada seção na baía, valor este representado pela vazão total para cada seção durante os períodos de enchente e de vazante.

Foram determinadas as vazões, em um determinado instante, de enchente e vazante, em períodos de sizígia e quadratura, para cada um dos cenários considerados.

Para os cálculos das vazões das seções nos cenários chuvosos, foram considerados os seguintes instantes:

- 380 h, para caracterizar a enchente durante a sizígia;
- 374 h, para caracterizar a vazante durante a sizígia;
- 199 h, para caracterizar a enchente durante a quadratura;
- 193 h, para caracterizar a vazante durante a quadratura.

Para os cálculos das vazões das seções nos cenários de estiagem, foram considerados os seguintes instantes:

- 601 h, para caracterizar a enchente durante a sizígia;
- 606 h, para caracterizar a vazante durante a sizígia;
- 432 h, para caracterizar a enchente durante a quadratura;
- 430 h, para caracterizar a vazante durante a quadratura.

Os perfis transversais de batimetria das 6 seções no ano de 1962 e de 2002 são apresentados na figura 53. As variações da morfologia do leito verificadas pela batimetria das seções transversais foram bastante acentuadas ao longo do período e a área total de cada perfil também apresentou grandes mudanças (Tab. XVII).

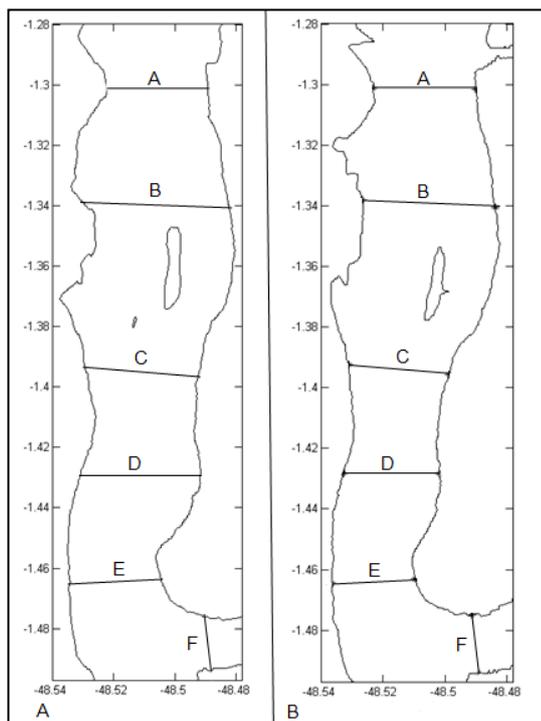


Figura 52. Posicionamento das seções escolhidas para a análise da variação das vazões entre os anos de 1962 e 2002.

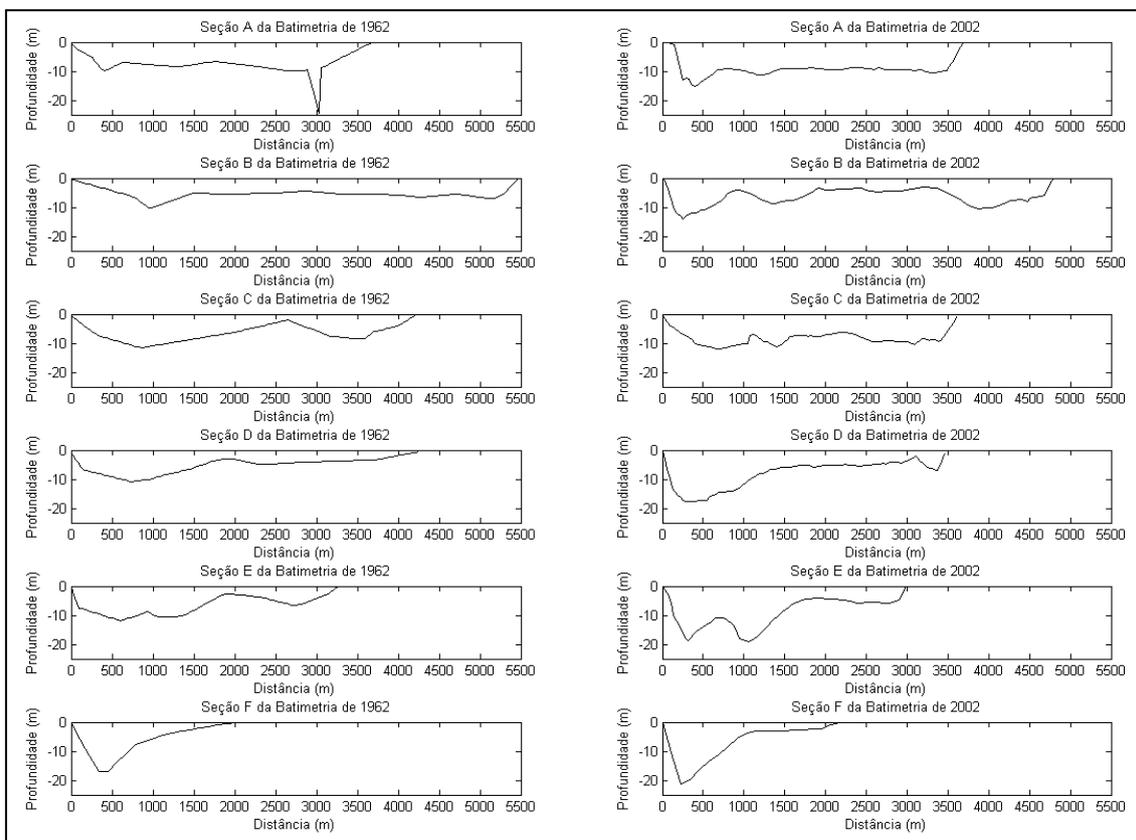


Figura 53. Morfologia do fundo das seções transversais à Baía de Guajará (A, B, C, D e E) e ao rio Guamá (F) nos anos de 1962 e 2002.

Tabela XVII. Áreas, em m², das seções A, B, C, D, E e F nos anos de 1962 e 2002.

| Seção | Área em 1962 | Área em 2002 |
|-------|--------------|--------------|
| A | 27.772 | 34.182 |
| B | 30.083 | 31.085 |
| C | 27.936 | 30.476 |
| D | 22.475 | 28.090 |
| E | 22.287 | 27.408 |
| F | 12.959 | 15.381 |

Na seção A, a profundidade máxima em 1962 era de 24,4 m e em 2002 a profundidade máxima reduziu para 15,3 m, ou seja, uma redução de cerca de 37,3 %. A largura da seção em 1962 era 3.689 m e em 2002 passou a ser 3.688 m. A área da seção aumentou em 23,1 % entre 1962 e 2002.

Na seção B, a profundidade máxima em 1962 era de 10,2 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 14,2 m, ou seja, um aumento de cerca de 39,2 %. A largura da seção em 1962 era 5.464 m e em 2002 passou a ser 4.795 m. A área da seção aumentou em 3,3 % entre 1962 e 2002.

Na seção C, a profundidade máxima em 1962 era de 11,5 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 12,1 m, ou seja, um aumento de cerca de 5,2 %. A largura da seção em 1962 era 4.223 m e em 2002 passou a ser 3.623 m. A área da seção aumentou em 9,1 % entre 1962 e 2002.

Na seção D, a profundidade máxima em 1962 era de 10,8 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 17,6 m, ou seja, um aumento de cerca de 62,9 %. A largura da seção em 1962 era 4.267 m e em 2002 passou a ser 3.457 m. A área da seção aumentou em 24,9 % entre 1962 e 2002.

Na seção E, a profundidade máxima em 1962 era de 12,0 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 19,8 m, ou seja, um aumento de cerca de 65 %. A largura da seção em 1962 era 3.305 m e em 2002 passou a ser 2.993 m. A área da seção aumentou em 22,9 % entre 1962 e 2002.

Na seção F, a profundidade máxima em 1962 era de 17,2 m e em 2002 a profundidade máxima aumentou para 21,2 m, ou seja, um aumento de cerca de 23,5

%. A largura da seção em 1962 era 2.014 m e em 2002 passou a ser 2.178 m. A área da seção aumentou em 18,6 % entre 1962 e 2002.

Na tabelas XVIII e XIX são apresentados os resultados das vazões calculadas ao longo das seções consideradas para os cenários. Apesar de nas seções A, B, C, D e E os valores de vazão serem negativos para a enchente e positivo para a vazante e o inverso para a seção F (positivo para a enchente e negativo para a vazante), as vazões serão apresentados com seus valores absolutos.

Para a construção das séries temporais de vazão nas seções analisadas nos cenários dos períodos chuvosos de 1962 e de 2002, foi considerado um período de 12 horas durante a sizígia, compreendido entre 370 horas e 382 horas, conforme representado na figura 54. São apresentadas no trabalho: as séries temporais da vazão na seção A nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 55); as séries temporais da vazão na seção B nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 56); as séries temporais da vazão na seção C nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 57); as séries temporais da vazão na seção D nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 58); as séries temporais da vazão na seção E nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 59) e as séries temporais da vazão na seção F nos cenários chuvosos de 1962 e 2002 (Fig. 60).

Tabela XVIII. Valores das vazões, em m³/s, calculadas para as seções A, B, C, D, E e F, com os resultados das simulações dos períodos chuvosos de 1962 e 2002.

| Seção | CENÁRIO CHUVOSO DE 1962 | | | | CENÁRIO CHUVOSO DE 2002 | | | |
|-------|-------------------------|---------|------------|---------|-------------------------|---------|------------|---------|
| | SIZÍGIA | | QUADRATURA | | SIZÍGIA | | QUADRATURA | |
| | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante |
| A | 12.954 | 14.798 | 11.747 | 12.390 | 15.156 | 17.607 | 12.132 | 11.359 |
| B | 10.415 | 12.087 | 8.706 | 9.497 | 13.524 | 15.689 | 9.748 | 11.624 |
| C | 8.153 | 9.424 | 5.437 | 7.187 | 11.702 | 13.850 | 7.239 | 10.000 |
| D | 6.805 | 8.572 | 3.884 | 6.473 | 11.092 | 13.269 | 6.264 | 9.594 |
| E | 6.274 | 8.618 | 2.784 | 6.591 | 10.543 | 12.752 | 5.321 | 9.177 |
| F | 3.914 | 4.304 | 1.956 | 2.162 | 4.931 | 5.896 | 3.034 | 2.796 |

Tabela XIX. Valores das vazões, em m³/s, calculadas para as seções A, B, C, D, E e F, com os resultados das simulações dos períodos de estiagem de 1962 e 2002.

| Seção | CENÁRIO DE ESTIAGEM DE 1962 | | | | CENÁRIO DE ESTIAGEM DE 2002 | | | |
|-------|-----------------------------|---------|------------|---------|-----------------------------|---------|------------|---------|
| | SIZÍGIA | | QUADRATURA | | SIZÍGIA | | QUADRATURA | |
| | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante | Enchente | Vazante |
| A | 12.147 | 15.125 | 10.218 | 6.806 | 13.059 | 15.419 | 9.453 | 10.004 |
| B | 9.381 | 11.160 | 7.310 | 8.531 | 11.075 | 12.657 | 7.187 | 11.503 |
| C | 7.048 | 7.696 | 4.225 | 8.517 | 9.377 | 10.025 | 4.356 | 12.411 |
| D | 6.043 | 6.340 | 2.807 | 8.087 | 8.810 | 9.117 | 3.166 | 12.429 |
| E | 5.816 | 5.797 | 1.363 | 7.899 | 8.353 | 8.239 | 1.845 | 12.187 |
| F | 1.130 | 1.289 | 1.081 | 1.189 | 4.377 | 3.963 | 2.150 | 2.283 |

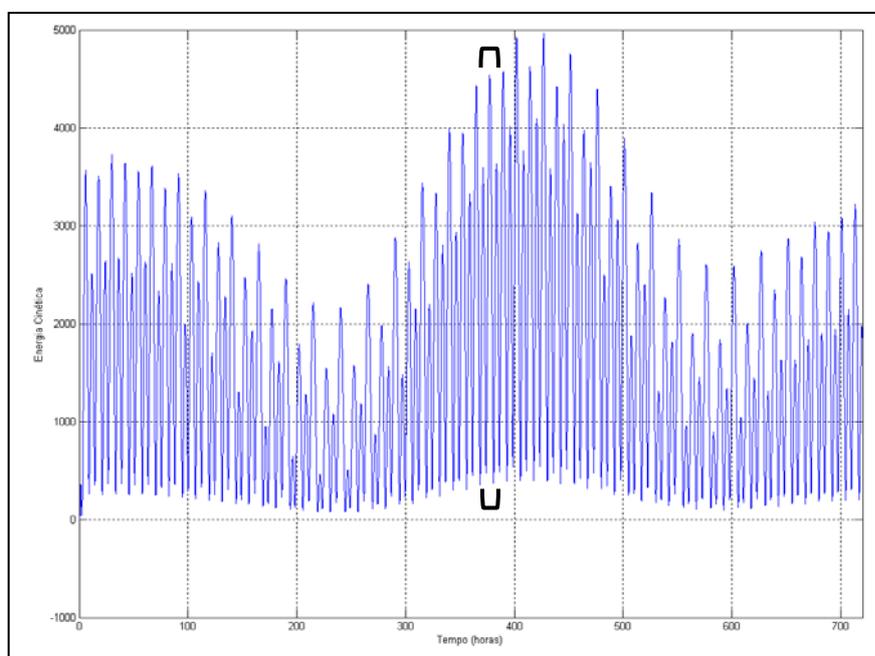


Figura 54. Evolução temporal da energia cinética durante os 30 dias, ou 720 horas, de simulação numérica do cenário chuvoso. Os colchetes destacam o intervalo de tempo dentro da sizígia usado para a construção das séries de vazões.

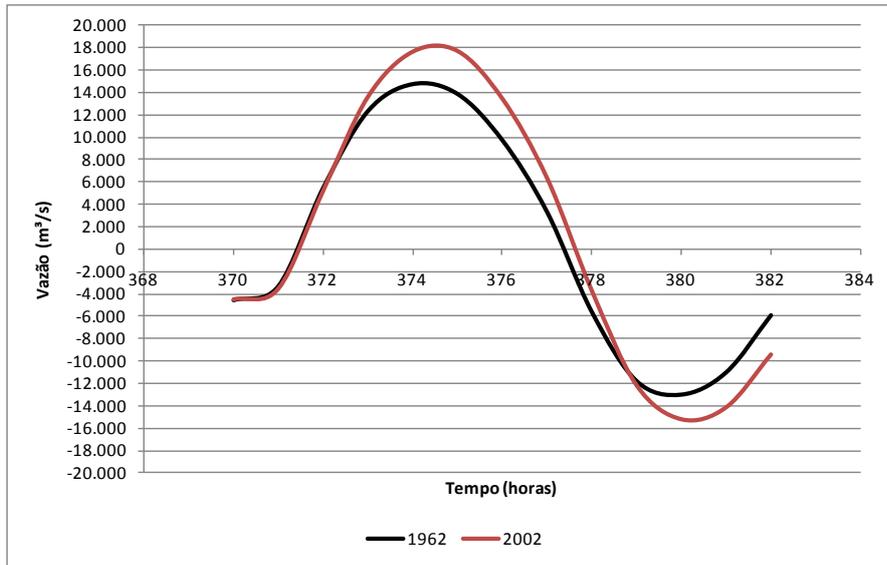


Figura 55. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção A, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

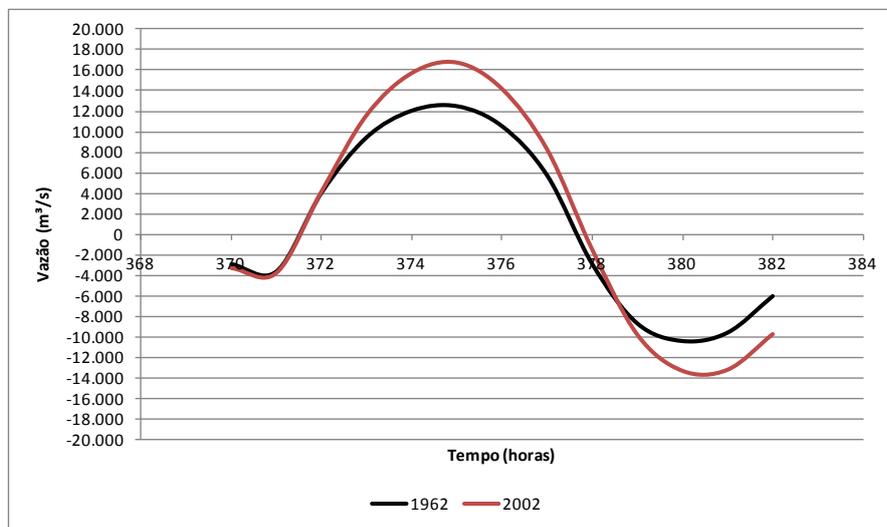


Figura 56. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção B, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

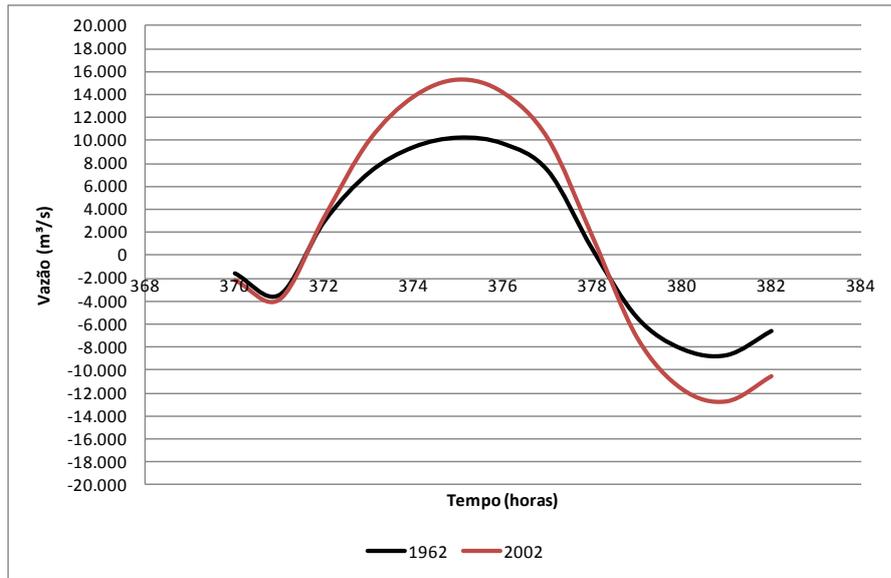


Figura 57. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção C, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

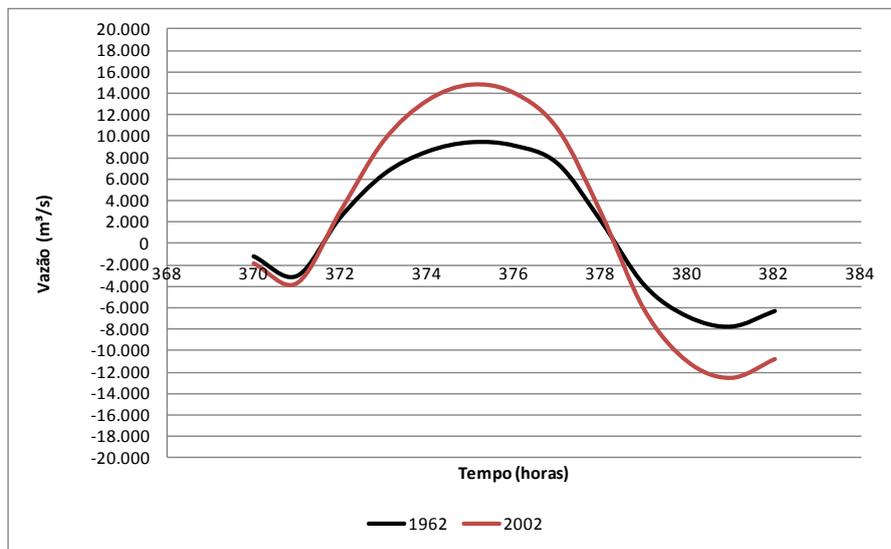


Figura 58. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção D, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

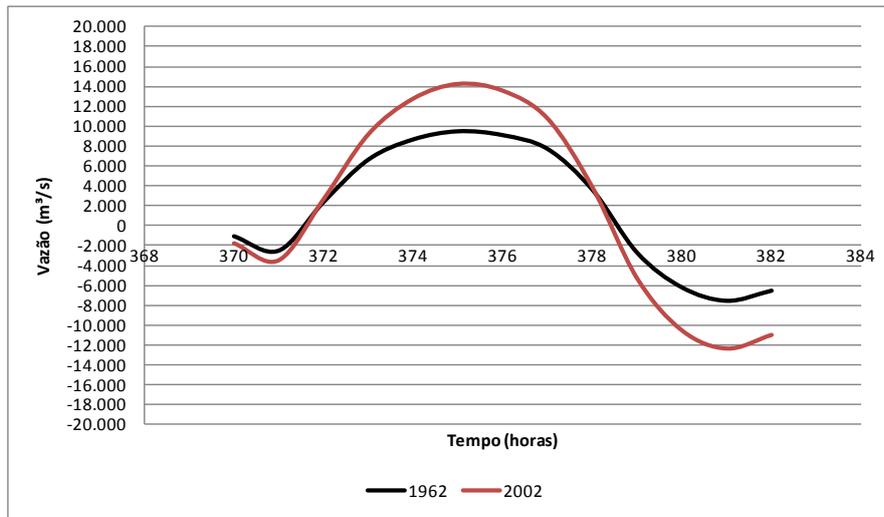


Figura 59. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção E, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

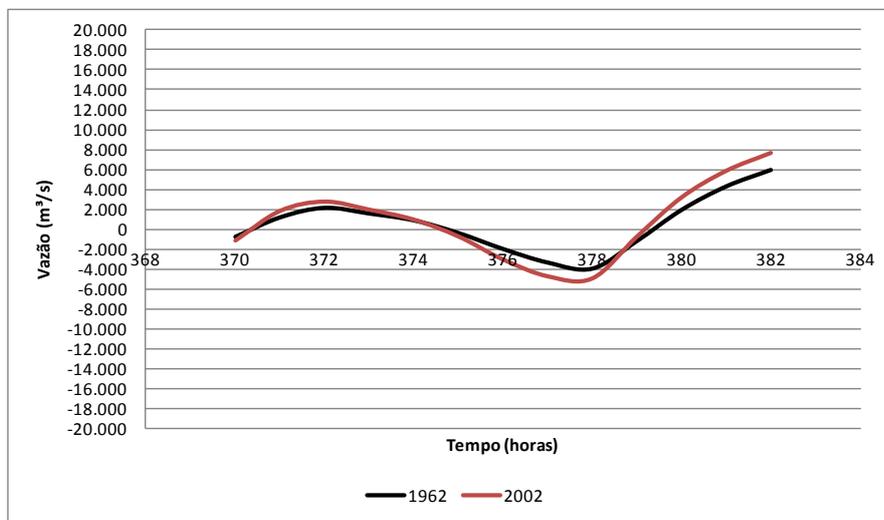


Figura 60. Séries temporais da vazão (em m³/s) na seção F, durante instantes da sizígia, nos cenários chuvosos de 1962 e 2002.

Os maiores valores de vazão pertencem à seção A no cenário chuvoso de 2002 durante a sizígia. Na enchente, a vazão foi cerca de 15.156 m³/s e na vazante a vazão foi de 17.607 m³/s.

As menores vazões foram encontradas na seção F no cenário de estiagem de 1962 durante a quadratura. Na enchente, a vazão foi cerca de 1.081 m³/s e na vazante a vazão foi de 1.189 m³/s.

Considerando os períodos chuvosos, é observado que há um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, nas seções no ano de 2002 quando comparado com os valores de 1962. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 3.329 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 1.440 m³/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 3.868 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 2.357 m³/s.

Avaliando os períodos de estiagem, também é notado um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, nas seções no ano de 2002 quando comparado com os valores de 1962. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 2.433 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 421 m³/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 2.386 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 3.546 m³/s.

Analisando os cenários de 1962, é notado um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, durante o período chuvoso quando comparado com período de estiagem. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 921 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 1.100 m³/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 2.232 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 3.275 m³/s.

Considerando os cenários de 2002, também é notado um aumento das vazões, tanto de enchente quanto de vazante durante a sizígia e a quadratura, durante o período chuvoso quando comparado com período de estiagem. A variação média das vazões durante as enchentes do período de sizígia é de 2.236 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 2.700 m³/s. A variação média das vazões durante as vazantes do período de sizígia é de 3.429 m³/s, enquanto no período de quadratura a variação média é de 2.835 m³/s.

5. DISCUSSÃO

Ao analisar os resultados de um modelo numérico, uma das mais importantes questões é sobre sua capacidade de efetivamente reproduzir a circulação observada, embora a reprodução exata dos dados observados seja considerada impossível, devido às limitações do modelo, dos dados forçantes e de erros inerentes às próprias medições (CECÍLIO, 2006). Mesmo assim, é fundamental uma análise comparativa entre os dados observados e os dados obtidos pelo modelo empregado.

Sendo assim, a comparação entre dados hidrodinâmicos medidos pela PORTOBRÁS (*apud* PINHEIRO, 1987, SILVEIRA, 1989) e os resultados obtidos no presente trabalho confirma a aplicabilidade do modelo para a caracterização da hidrodinâmica da Baía de Guajará.

Apesar da diferença encontrada entre os valores de velocidade medidos e os encontrados nos resultados, possivelmente relacionada às próprias características físicas do experimento realizado, parâmetros como o coeficiente de arrasto com o fundo e os coeficientes turbulentos (viscosidade) podem ainda ser melhor ajustados às características do escoamento na região.

A diferença entre os dados de batimetria usados na comparação e os realmente encontrados na época do levantamento, os padrões de reversão das correntes na porção central da baía ao final do período de enchente e ao final do período de vazante, descritos por PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989), foram bem caracterizados pelo modelo.

Na análise comparativa entre os cenários de 1962 e 2002, parâmetros hidrodinâmicos, tais como as componentes meridional e zonal da velocidade e vazão, foram usados para caracterizar o padrão de circulação da baía e avaliar sua variação ao longo do tempo considerado.

Os pontos e seções selecionadas para a avaliação desses parâmetros apresentaram variações significativas em sua batimetria, sendo que a maioria deles apresentou aprofundamento na batimetria do ano de 2002. Sendo assim, o alto regime hidrodinâmico deste ambiente, especialmente próximo a margem esquerda da baía, destacado pelos trabalhos de MIRANDA & MENDES (2007) e GREGÓRIO (2008), foi evidenciado. PINHEIRO (1987) destaca que a alta energia hidráulica do estuário ocasiona não apenas mudanças na fisiografia regional, mas também no próprio relevo da calha estuarina, que está sujeito a modificações periódicas relativamente rápidas.

É importante destacar o modo como ocorre a interação entre os agentes da hidrodinâmica e a morfologia de fundo, ressaltando que nesta relação há a influência

tanto da hidrodinâmica sobre a morfologia de fundo quanto da morfologia de fundo sobre a hidrodinâmica.

De fato, a interação, em um estuário, entre os forçantes ambientais específicos da região, tais como a ação das marés, as descargas fluviais e os ventos, condiciona os padrões de transporte de sedimentos que determinam as formas de fundo. A caracterização das formas de fundo e das propriedades dos sedimentos que as compõem, em especial, tamanho, forma, densidade e composição, podem fornecer informações sobre o regime hidrodinâmico atuante no ambiente em questão, padrão este responsável pelo transporte e distribuição desses sedimentos.

Por outro lado, em um estuário, as irregularidades na morfologia de fundo podem afetar significativamente a propagação da maré e das águas marinhas. MEDEIROS (2003) destaca que a batimetria pode afetar significativamente a hidrodinâmica, retardando a propagação da intrusão salina na presença de soleiras, ou ainda pelo aprisionamento de águas salinas (mais densas) em depressões.

As maiores velocidades de corrente, em todos os cenários, foram encontradas durante o período de enchente na sizígia e as menores velocidades foram encontradas durante o período de vazante na quadratura, confirmando as descrições apresentadas por PINHEIRO (1987) e SILVEIRA (1989).

No cenário chuvoso de 2002 foram encontradas as maiores velocidades e no cenário de estiagem de 1962 foram obtidas as menores velocidades. A diferença encontrada pode ser atribuída em grande parte ao aprofundamento da batimetria de 2002.

As diferenças obtidas entre os tempos de enchente e vazante dos pontos selecionados para as análises indicam que os pontos mais próximos aos rios apresentam maior tempo de vazante que os pontos mais distantes.

As maiores vazões foram encontradas nas seções próximas ao contorno norte da baía, ou seja, fortemente sujeitas a ação das marés, e as menores vazões foram encontradas na seção posicionada sobre o rio Guamá. As vazões calculadas para o ano de 2002 foram maiores do que as calculadas para as mesmas seções em 1962, resultado esperado em função das maiores velocidades encontradas neste cenário. Para esse cálculo foi considerada a componente normal à seção, no entanto observa-se que para a seção posicionada sobre o rio Guamá, tanto a componente meridional quanto a zonal da velocidade apresentam significativas contribuições.

O aumento da velocidade das correntes observado em algumas áreas a Baía de Guajará como, por exemplo, no Canal da Ilha das Onças, pode ser explicado pela maior profundidade e pela própria configuração do canal, que provoca o estreitamento das correntes, com conseqüente aumento de suas intensidades.

A circulação obtida sugere pequena influência do vento constante de leste usado como forçante do modelo, já que a imposição do vento causou variações não significativas quando comparadas com experimentos realizados sem o uso do vento como forçante. A ação de ventos de leste sobre a baía pouco influencia a dinâmica das correntes, talvez pela pequena intensidade do vento considerada que causa baixa intensidade das correntes geradas pelo vento em relação às correntes de maré e fluviais.

As variações hidrodinâmicas observadas entre os cenários de 1962 e 2002 não podem ser atribuídas exclusivamente às variações de morfologia de fundo ocorridas na Baía de Guajará entre esses anos, mas também podem estar relacionadas com as diferenças entre os procedimentos de coleta de cada levantamento batimétrico realizado e na quantidade de dados batimétricos existentes para cada cenário. A batimetria de 2002 possui 3370 pontos de profundidade, enquanto a batimetria de 1962 apresenta apenas 387 pontos de profundidade.

5.1. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o modelo hidrodinâmico implementado constitui-se em um importante método de investigação da circulação na Baía de Guajará. Os resultados obtidos, quando comparados com dados medidos em campo, mostram que a configuração utilizada é capaz de responder aos objetivos deste trabalho, já que foi capaz de representar as principais feições dinâmicas da Baía de Guajará e sua variabilidade em função das variações morfológicas. Tal fato consolida o modelo utilizado como um importante método de gestão ambiental para a região.

A morfologia geral da Baía de Guajará é marcada pela presença de bancos sedimentares e canais profundos, que influenciam fortemente a hidrodinâmica local. As análises comparativas entre as batimetrias da baía de 1962 e 2002 puderam caracterizar as grandes alterações apresentadas pela baía ao longo desses anos, com o aprofundamento de muitas de suas áreas em 2002, principalmente o Canal da Ilha das Onças e a parte inferior do Canal Oriental.

Evidentemente que alterações em alguns parâmetros no modelo, especialmente os relacionados à rugosidade de fundo, ainda podem ser feitos de modo que possam ser gerados resultados sobre as velocidades na baía mais próximos aos descritos em medições realizadas.

Os resultados obtidos com a implementação do modelo numérico hidrodinâmico da Baía de Guajará indicam que a hidrodinâmica local, em todos os cenários, é fortemente influenciada pela ação das marés e pela descarga fluvial dos rios Guamá e Acará-Moju e que alterações na batimetria implicam em variações significativas no padrão de circulação.

Nos cenários dos períodos chuvosos, as maiores vazões dos rios Guamá e Acará-Moju, consideradas nas simulações em decorrência da elevada precipitação pluviométrica do período chuvoso registrada principalmente no mês de abril para a região, juntamente com o aumento da amplitude de maré apresentada durante este período, foram responsáveis pelo aumento das velocidades e vazões nestes cenários quando comparado as cenários de estiagem.

A influência da descarga fluvial sobre a dinâmica da Baía de Guajará pode ser verificada, já que a alteração da vazão dos rios nos cenários resultou em alterações significativas na circulação. No entanto, as regiões mais próximas à desembocadura dos rios Acará-Moju e Guamá são mais sensíveis às variações de vazão, exibindo períodos de vazante mais longos quando comparados com os períodos de enchente.

De maneira geral, os cenários de 2002, comparativamente aos cenários de 1962, apresentaram as maiores velocidades, principalmente durante o período de enchente, e as maiores vazões, sobretudo durante o período de vazante, padrão este relacionado ao aumento das profundidades em 2002 quando comparadas com as profundidades de 1962.

Cabe ressaltar que quaisquer informações adicionais obtidas a partir de levantamentos de campo podem ser facilmente incorporadas ao modelo existente. Dessa forma, por exemplo, a obtenção de valores reais sobre as vazões dos rios Guamá e Acará-Moju e suas variações sazonais, assim como de batimetria e campo dos ventos, seriam de extrema importância para o aperfeiçoamento do modelo.

A recomendação para estudos futuros inclui a incorporação, ao modelo numérico, da distribuição sedimentológica da baía. Dessa forma, correlacionado os tipos de sedimentos aos coeficientes de arrasto empregados, a avaliação desta influência sobre a hidrodinâmica também poderá ser avaliada.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009, *Site do Sistema de Informações Hidrológicas -Hidroweb*. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. Acesso em: 10 de março de 2009.
- AMARANTE, O.A.C., BROWER, M., ZACK, J., *et al.*, 2001, **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 1 ed. Brasília, Ministério de Minas e Energia.
- BARROS, M.L.C., SENA, M.J.S., MESQUITA, A.L.A., *et al.*, 2005, “Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica para Calibração de Modelo Hidrodinâmico da Baía do Guajará”. In: *II Congresso de Tecnologia da Informação e Comunicação da Amazônia*, pp. 35–46, Belém, Nov. 2005.
- BLANCO, C.J.C., MESQUITA, A.L.A., SENA, M.J.S., *et al.*, 2009, “Application of a 2D Shallow Water Model to Analyze the Flow and the Use of Groins to Protect an Area of the Amazon River Estuary”, **Revista Ambiente & Água- An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 4, n. 2, pp. 10-20.
- BLUMBERG, A.F., MELLOR, G.L., 1987, “A Description of a Three-Dimensional Coastal Ocean Circulation Model”. In: N. S. Heaps (eds.), *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*, 1 ed., v. 4, chapter 1, Washington D.C., USA, American Geophysical Union.
- CECÍLIO, R.O., 2006, *Estrutura Tridimensional das Correntes Geradas Pelo Vento na Plataforma Continental da Região Sul do Brasil*. Dissertação de M.Sc., Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- CIRANO, M., 2002, “Técnicas Para A Simulação de Forçantes Remotas em um Modelo de Circulação Oceânica Regional”. In: *I Workshop Interno Sobre Modelagem de Derramamento de Óleo No Mar*, pp. 1 – 17, Rio de Janeiro, Ago. 2002.
- COMPANHIA DOCAS DO PARÁ, 2009, *Site informativo sobre a Companhia Docas do Pará*. Disponível em: <<http://www.cdp.com.br>>. Acesso em: 2 de março de 2009.

- DA SILVA, R.M., 2005, *Acoplamento dos Modelos de Área Limitada de Atmosfera (MM5) e Oceano (POM) e Sua Aplicação ao Trecho Sudoeste da Bacia do Atlântico Sul*. Dissertação de M.Sc., Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DRAGO, A., 2008, "Numerical Modelling of Coastal Seiches in Malta", ***Physics and Chemistry of the Earth***, v. 33, n. 3, pp. 260-275.
- ENGESOLO ENGENHARIA, 2006, *Modelagem Hidrodinâmica do Escoamento do Rio Guamá no Contexto do Projeto Orla da Estrada Nova*. Projeto Executivo de Engenharia, Implantação da 1ª Etapa da Via Urbana Orla Estrada Nova.
- FRANCO, A.S., 1992, **Marés – Programas Para Previsão e Análise (Manual do Sistema PAC)**. 1 ed. São Paulo, Cotia.
- FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR (FEMAR), 2000, **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras**. 1 ed. Rio de Janeiro, FEMAR.
- GONÇALVES, F.D.; SOUZA FILHO, P.W.M., 2005, "Integração Digital de Imagens Radarsat-1 e Landsat-7 Para o Mapeamento dos Índices de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo na Baía de Guajará (Belém-PA)". In: *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, pp. 1789-1796, Goiânia, Set. 2005.
- GREGÓRIO, A.M.S., 2008, *Contribuição à Gestão Ambiental da Baía de Guajará (Belém-Pará-Amazônia) Através de Estudo Batimétrico e Sedimentológico*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.
- GREGÓRIO, A.M.S., MENDES, A.C., 2009, "Characterization of Sedimentary Deposits at the Confluence of Two Tributaries of the Pará River Estuary (Guajará Bay, Amazon)", ***Continental Shelf Research***, v. 29, n. 3, pp. 609-618.
- GREGÓRIO, A.M.S., MENDES, A., SILVA, C.A., *et al.*, 2006, "Depósitos Lamosos da Baía de Guajará (Pará, Amazônia, Brasil)". In: *I Semana Acadêmica dos Alunos de Pós-Graduação em Geociências*, pp. 63-66, Porto Alegre, Mar. 2006.

- GUERRA, A.T., 1975, **Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 4 ed. Rio de Janeiro, IBGE.
- HUANG, W., 2007, "Hydrodynamic Modeling of Flushing Time in a Small Estuary of North Bay, Florida, USA", **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 74, n. 4, p. 722-731.
- KOWALIK, K., MURTY, T.S., 1993, **Numerical Modeling of Ocean Dynamics**. 1 ed. V. 5. Singapore, Advanced Series on Ocean Engineering.
- LE, V.S., YAMASHITA, T., OKUNISHI, T., *et al.*, 2006, "Characteristics of Suspended Sediment Material Transport in the Ishikari Bay in Snowmelt Season", **Applied Ocean Research**, v. 28, n. 4, pp. 275-289.
- MAGALHÃES, L., 2007, Assoreamento da Baía do Guajará é o Mais Grave em 40 Anos. *Agência da Ciência e Tecnologia*, Brasília, 17 de dezembro de 2007. Disponível em: <<http://agenciact.mct.gov.br>>. Acesso em: 15 de agosto de 2008.
- MARINHA DO BRASIL, 1962, *Carta Náutica nº 316 – Brasil - Rio Pará - de Mosqueiro a Belém*. 1 ed. Escala 1:49.990.
- MEDEIROS, A.D., 2003, *A Influência da Maré e da Batimetria Sobre a Intrusão Salina no Estuário do Rio Itajaí-Açu*. Dissertação de M.Sc., Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MELLOR, G.L., 2003, **Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model**. 1 ed. Princeton, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences.
- MELLOR, G.L., YAMADA, T., 1982, "Development of a Turbulence Closure Models for Geophysical Fluid Problems", **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 20, n. 4, pp. 851-875.
- MENDES, A.C., SILVA, C.A., FRAZÃO, E.P., 2004, "Levantamento Batimétrico da Baía de Guajará, Belém/PA". In: *III Workshop Técnico-Científico do Projeto Petrorisco*, pp.1-3, 3, Belém, Set. 2004.

- MESSINGER, F., ARAKAWA, A., 1976, "Numerical Methods Used in Atmospheric Models", **GARP Publication Series - WMO/ICSU Joint Organizing Committee**, v. 1, n. 14, pp. 01-64.
- MIRANDA, A.G., MENDES, A.C., 2007, "Evolução Batimétrica da Baía de Guajará, Belém/PA". In: *XI Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*, pp. 1-60, Belém, Abr. 2007.
- MONTEIRO, I.O., PEARSON, M.L., MÖLLER JUNIOR, O.O., *et al.*, 2005, "Hidrodinâmica do Saco da Mangueira: Mecanismos que Controlam as Trocas Com o Estuário da Lagoa dos Patos", **Atlântica**, v. 27, n. 2, pp. 87-101.
- MOURA, E.M., 2007, *Mapeamento do Halo de Dispersão Formado por Efluentes Industriais Lançados na Baía do Guajará no Trecho Compreendido entre o Bairro de Val-De-Cães e o Distrito de Icoaraci*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- NETO, D.F.U., 2005, *Dinâmica da Contra-Corrente Norte Equatorial na Região Oeste do Oceano Atlântico Tropical*. Tese de D.Sc., Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- NICOLITE, M., TRUCCOLO, E.C., SCHETTINI, C.A.F., *et al.*, 2009, "Oscilação do Nível de Água e a Co-Oscilação da Maré Astronômica no Baixo Estuário do Rio Paraíba do Sul, RJ", **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 2, pp. 225-239.
- PAIVA, R.S., ESKINAZI-LEÇA, E., PASSAVANTE, J.Z.O., *et al.*, 2006, "Considerações Ecológicas Sobre o Fitoplâncton da Baía de Guajará e Foz do Rio Guamá (Pará, Brasil)", **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais**, v. 1, n. 2, pp. 133-146.
- PEREIRA, L.C.C., 2007, "A Zona Costeira Amazônica Brasileira: Limite e Características". In: *59ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira Para o Progresso da Ciência*, pp.1-2, Belém, Abr. 2007.

- PINHEIRO, R.V.L., 1987, *Estudo Hidrodinâmico e Sedimentológico do Estuário Guajará-Belém (Pará)*. Dissertação de M.Sc., Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- POTENCIAIS IMPACTOS DO TRANSPORTE DE PETÓLEO E DERIVADOS NA ZONA COSTEIRA AMAZÔNICA (PIATAM-MAR), 2008, *Relatório de Andamento das Atividades de Modelagem Computacional do Projeto PIATAM – MAR fase 2*.
- RIBAS, T.M., 2004, *Implementação de Modelo Numérico Para Estudo Hidrodinâmico das Baías de Antonina e de Paranaguá – PR*. Dissertação de M.Sc., Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- ROSMAN, P.C.C., 2001, “Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental”. In: Rui Carlos Vieira da Silva (ed.), *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*, 1 ed., v. 5, capítulo 1, Porto Alegre, Brasil, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- SARAIVA, A.L.L., 2007, *Estudo Sedimentológico e Geoquímico em Sedimentos de Fundo na Baía de Guajará-Belém (PA)*. Dissertação de M.Sc., Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- SECRETARIA EXECUTIVA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE (SECTAM), 2009, *Site da Secretaria Executiva de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente*. Disponível em: < <http://www.sema.pa.gov.br>>. Acesso em: 10 de março de 2009.
- SENA, M.J.S., MESQUITA, A.L.A., SECRETAN, Y., 2002, “Eco-Informática: Usando Abordagem Integrada SIG - Elementos Finitos Para Modelagem da Baía do Guajará”. In: *XVI Semana Paraense de Informática*, pp. 1-10, Belém, Mai. 2002.
- SENNA, C.S.F., LOPES, P.R.C., 2008, “Conservação do Patrimônio Arqueológico no Estuário Amazônico no Âmbito do Projeto Bauxita Paragominas/PA”. In: *X Coloquio Internacional de Geocrítica Barcelona*, pp.2-7, Barcelona, Mar. 2008.

SILVEIRA, O.F.M., 1989, *Estudo Batimétrico/Sonográfico do Estuário Guajará, Belém-PA*. Dissertação de M.Sc., Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

SOUSA, A.J.S., OLIVEIRA, L.L., LUCAS, E.W.M., *et al.*, 2006, “Estudo Comparativo Entre a Precipitação Pluviométrica e o Número de Casos de Dengue em Belém-PA (1998-2003)”, ***Revista Soluções Para o Desenvolvimento do Brasil (Sodebras)***, v. 1, n. 2, pp. 01-07.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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